

III Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad

Editores:
Rafael Asorey Cacheda
Rosa Devesa Rey
M. Mercedes Solla Carracelas
José M. Pousada Carballo

Universidade Vigo
Centro Universitario de la Defensa ENM - Marín
Escuela Naval Militar
Cátedra Isdefe
Ministerio de Defensa

DESEi+d 2015

III Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad

Actas

Celebrado en:
Centro Universitario de la Defensa de Marín
Escuela Naval Militar
19 y 20 de noviembre de 2015

IEEE

Universidad de Vigo

Cátedra Isdefe

MINISTERIO DE DEFENSA

Para citar la obra, por favor utilice la siguiente referencia:

Asorey-Cacheda, R. et al., Actas: III Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad, DESEi+d 2015. Ed. Centro Universitario de la Defensa de Marín, 2015.

Los contenidos son fieles a los originales presentados como artículos definitivos por sus autores.

No se admite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, reprográfico, gramofónico u otro, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del copyright.

© Rafael Asorey Cacheda, Rosa Devesa Rey, M. Mercedes Solla Carracelas, José M. Pousada Carballo
© De la presente edición, Centro Universitario de la Defensa de Marín, 1ª edición, 2015

Edita: Centro Universitario de la Defensa de Marín
Escuela Naval Militar, Plaza de España s/n, 36900 Marín

ISBN: 978-84-944537-0-0

Prólogo

La aprobación por parte del Gobierno de España de la Ley de la Carrera Militar en el año 2007 generó cambios en el ámbito de la FFAASS dentro de los cuales tiene una especial relevancia la adaptación de la enseñanza militar a lo que en el entorno universitario se ha denominado Reforma de Bolonia. Como consecuencia de ello, dentro de cada una las Academias Militares (AGM, ENM y AGA), junto con la de la Guardia Civil y la Academia Central de la Defensa existe un Centro Universitario adscrito a una universidad pública que imparte un título de grado como parte de la formación que reciben los futuros oficiales.

Esta reforma de la enseñanza militar trae consigo un valor añadido que, aunque no era un objetivo buscado inicialmente en la propia reforma de la carrera militar, sí resulta de gran interés para la Defensa en particular y para España en general. Esta mejora no es otra más que la capacidad investigadora del personal docente de los centros universitarios de la defensa (CUD). Desde el año 2010, el Ministerio de Defensa cuenta con nuevos centros de investigación para cada uno de sus ejércitos que no pretenden competir pero sí servir de complemento a los recursos ya existentes dentro de la estructura del propio ministerio.

Dejando a un lado el apoyo del profesorado de universidades adscritas, como es el caso de la Universidad de Vigo en el CUD de la ENM y de la Universidad de Alcalá en el CUD de la ACD, a día de hoy el profesorado contratado a tiempo completo por los CUD supera los 160 profesores, mayoritariamente acreditados como Contratado Doctor o superior. Esto significa que el potencial investigador del Ministerio de Defensa se ha incrementado en más de 160 personas, un número para nada pequeño.

Sería un error que el Ministerio de Defensa no aprovechase estas nuevas capacidades puesto que, entre las prioridades tecnológicas actuales, se contempla el desarrollo de nuevas tecnologías e innovaciones que refuercen la seguridad y las capacidades de defensa a nivel nacional e internacional. Para ello, este congreso del que celebramos la tercera edición debe servir de elemento de cohesión, no ya entre los investigadores de los diferentes CUD, sino también entre todos los organismos de investigación de la Defensa y la Seguridad y de las FFAASS en general.

Personalmente, pienso que vamos en el buen camino. Al menos es lo que indican los números: en la primera edición de 2013 en Madrid se presentaron 67 ponencias y en la segunda edición en Zaragoza el número de comunicaciones aceptadas se elevó a 75. Para esta tercera edición, cuando en un principio todos pensábamos que la singularidad de celebrarse en Marín, lo que de alguna manera dificulta el desplazamiento, haría disminuir el interés de la asistencia, ha ocurrido todo lo contrario: tenemos 140 ponencias. De ellas, 71 proceden de los CUD, siendo únicamente 30 del CUD organizador, 16 se corresponden con otros organismos del entorno de las FFAASS (reseñar que hay una de los Mossos d'Esquadra), 11 pertenecen a empresas del entorno de la defensa y 42 de universidades públicas, de las que únicamente 13 son de la Universidad de Vigo.

Hay que destacar también lo abierto de la temática del congreso. Que los CUD impartan 2 grados en Organización Industrial, uno en Ingeniería Mecánica, otro en Ingeniería de la Seguridad y un quinto grado en Medicina, conforman un amplio abanico de temáticas de investigación que creemos enriquecerán este tipo de congresos. Cabe esperar que en próximas ediciones sea necesario ampliar su duración y estructurar más las áreas de interés.

En el terreno de los agradecimientos me gustaría empezar destacando a Mercedes Solla, Rafael Asorey y Rosa Devesa sin cuyo trabajo y dedicación el congreso no habría podido desarrollarse.

A todos los miembros de los Comités Organizador y Científico.

Al Vicealmirante D. Jesús Manrique Braojos, Subdirector General de Planificación Tecnología e Innovación, y a ISDEFE, particularizado en el Presidente de su Cátedra ISDEFE D. Vicente Ortega.

Al IEEE y todas las empresas que participan en las conferencias plenarias.

Quiero terminar agradeciendo el apoyo recibido del Rector de la Universidad de Vigo, D. Salustiano Mato, del Director General de Armamento y Materia, TG D. Juan García Montaño, del Subdirector de Enseñanza del Ministerio de Defensa, Vicealmirante D. Andrés Breijo Claur, del Comandante Director de la Escuela Naval Militar, el CN D. José María Núñez Torrente, y de todos los que de alguna manera han contribuido a la realización de este congreso.

Está previsto que la próxima edición del congreso, que será la cuarta, sea en el Centro Universitario de la Defensa de la Academia General del Aire. Deseamos firmemente el mejor de los éxitos a nuestros compañeros de San Javier.

José María Pousada

Director del Centro Universitario de la Defensa - ENM
Presidente de Comité Organizador del Congreso DESEi+d 2015

Presentación

En el ámbito de la Defensa y la Seguridad se celebran al cabo del año jornadas, seminarios, reuniones, exposiciones y conferencias, que abordan temas de índole político, estratégico, organizativo y expositivo sobre las Fuerzas Armadas, y Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado. La experiencia de los últimos 30 años demuestra que en el área de la Defensa y la Seguridad se han llevado a cabo muchas innovaciones tecnológicas en cooperación entre los distintos agentes involucrados en tareas de I+D+i (Investigación, Desarrollo e innovación).

Sin embargo, hasta ahora no existía ninguna reunión periódica en la que los grupos de I+D de universidades, OPI (Organismos Públicos de Investigación), empresas y laboratorios de los propios ejércitos o de las policías pudiesen exponer los trabajos de índole científico-técnico llevados a cabo dentro de los Planes Nacionales de I+D+i, el Programa Marco de la Unión Europea de I+D, los programas y proyectos de I+T de la Agencia Europea de Defensa (EDA), convenios y contratos con empresas del sector, etc.

Por este motivo, la Cátedra Isdefe de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) organizó en noviembre de 2013 el Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad (DESEi+d), con la colaboración del Ministerio de Defensa, a través de la Subdirección de Tecnología e Innovación, e Isdefe. La segunda edición del Congreso se celebró en Noviembre de 2014, y el Centro Universitario de la Defensa en Zaragoza organizó el II Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad. Siguiendo con el objetivo de dichos encuentros, este año el Centro Universitario de la Defensa de Marín organiza el III Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad. Con él se pretende que investigadores y expertos de las instituciones mencionadas puedan intercambiar experiencias y conocimientos, como sucede en otros congresos temáticos.

Para cumplir con ese objetivo, el Congreso se ha estructurado en tres partes: una en la que expertos de diferentes instituciones, universidades y empresas aportarán la visión estratégica de la I+D en el sector de la Defensa y la Seguridad, tanto a nivel nacional como europeo; otra de carácter más específico, con conferencias sobre casos de éxito del I+D en Defensa y Seguridad; y una tercera en la que, a través de comunicaciones orales, podrán participar todas aquellas personas que quieran compartir sus conocimientos en alguna de las cuatro áreas tecnológicas en las que se dividirá el Congreso, alineadas con la agrupación tecnológica de la Agencia Europea de Defensa.

A esta idea inicial del Congreso que se celebró el pasado año en el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, y que este año se celebrará los días 19 y 20 de noviembre en la Escuela Naval Militar de Marín, se han unido diferentes instituciones y organizaciones relacionadas con el sector de la Defensa y la Seguridad. Esperamos que la idea y la convocatoria susciten un alto interés y se logre el éxito de esta nueva iniciativa.

Comité Organizador

Presidente: *José María Pousada Carballo* – Centro Universitario de la Defensa de Marín

- UPM – Cátedra ISDEFE – *Vicente Ortega Castro*
- ISDEFE – *Jesús Efrén Yániz Igal*
- Ministerio de Defensa – DGAM -Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación (SDGPLATIN) – *CF. José María Riola Rodríguez*
- Escuela Naval Militar de Marín – *CF. Vicente Rubio Bolívar*
- Centro Universitario de la Defensa de San Javier – *Joaquín Roca Dorda*
- Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza – *Antonio Elipe Sánchez*
- Centro Universitario de la Defensa de Marín – *María Mercedes Solla Carracelas*
- Centro Universitario de la Defensa de Marín – *Rafael Asorey Cacheda*
- Centro Universitario de la Defensa de Marín – *Rosa Devesa Rey*

Secretaría

Centro Universitario de la Defensa de Marín – *Rafael Asorey Cacheda*

Comité Científico

Presidenta: *María Mercedes Solla Carracelas* – Centro Universitario de la Defensa de Marín

- Centro Universitario de la Defensa de San Javier

  Carmen de Nieves Nieto
  Pedro J. García Laencina
  Fernando Gimeno Bellver
  Germán Rodríguez Bermúdez
  José Serna Serrano
  Nina Skorin Kapov

- Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza

  Ángeles Dena Arto
  Alberto García Martín
  Teresa Lamelas Gracia
  Javier Martínez Torres
  María Dolores Peláez Coca
  Teresa Sánchez Rúa

- Centro Universitario de la Defensa de Marín

  Francisco Javier Fernández Fernández
  Paula Gómez Pérez
  Francisco Javier Rodríguez Rodríguez
  Carlos Ulloa Sande

- INTA - Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial

  Pedro D. de Vicente y Cuenca
  Óscar González Espasadín
  David Poyatos Martínez
  Juan Gregorio Rejas Ayuga

- ISDEFE - Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España

  Fernando Arias Miguélez

- Unidad de Prospectiva y Estrategia Tecnológica, SDG PLATIN-DGAM, Ministerio de Defensa

  Angélica Acuña Benito
  Yolanda Benzi Rabazas
  Pedro Carda Barrio
  Fernando Cases Vega
  Héctor Criado de Pastors
  Jaime de la Parra Díaz
  Juan Jesús Díaz Hernández
  David García Dolla
  Cristina Mateos Fernández de Betoño
  Óscar Rubio Gutiérrez

- Universidad Politécnica de Madrid

  Ana González Marcos
  Luis Ramón Núñez Rivas
  Félix Pérez Martínez

- Universidad Carlos III de Madrid

  Luis Inclán Sánchez
  Eva Rajo Iglesias
  Luis Sánchez Fernández

- Universitat Politècnica de Catalunya

  Daniel Di Capua
  Vega Pérez Gracia

- Universidad del País Vasco

  Pablo Angueira Buceta

- Universidad de la Rioja

  Luis María López González

- Universidad de Cantabria

  Elías Revestido Herrero
  Francisco Jesús Velasco González

- Universidad de Salamanca

  Diego González Aguilera
  Susana Lagüela López

- Universidad de Extremadura

Antonio José Calderón Godoy

- Universidad Politécnica de Cartagena

  Joan García Haro
  Antonio Javier García Sánchez
  Andrés Iborra García
  Joaquín Zueco Jordán

- Universidade de Vigo

  Íñigo Cuiñas Gómez
  José Durany Castrillo
  Francisco Javier González Castaño
  José Luis Míguez Tabarés
  Faustino Patiño Barbeito
  Juan María Pou Saracho
  Julio Prada Rodríguez
  Rosa María Ricoy Casas

- Universidade de Santiago de Compostela

  Emilio Grandío Seoane
  Rubén Miranda Gonçalves
  Peregrina Quintela Estévez
  Carlos Teijo García
  Luis Velasco Martínez

- Universidade da Coruña

  Javier Cuadrado Aranda
  Miguel Ángel Naya Villaverde
  Juan José Varela Tembra
  Carlos Vázquez Cendón

En memoria de

Pedro J. García Laencina,

compañero y profesor del Centro Universitario de la Defensa de San Javier.

Índice de Contenidos

Sesión I-A. *Adquisición de Información y Procesado.*

Jueves 19 de noviembre de 16:00 a 17:30h.

Modera: Norberto Fernández García – *Centro Universitario de la Defensa de Marín*

- Martín-Rodríguez, Fernando, *"Autentificación Segura de Documentos Escaneados mediante Marcado al Agua"* 3
- Luque-Nieto, Miguel A.; Moreno-Roldán, José M.; Poncela, Javier; Otero, Pablo; Fernández-Salas, Luis M. y Díaz-del-Río, Víctor, *"Planificación S-TDMA en Redes Submarinas de Comunicaciones Inalámbricas"* 11
- Zazo Bello, Santiago; Pérez Álvarez, Iván A. y Montesdeoca Hernández, Miguel, *"Diversidad de Recepción. La Piedra Angular de las Comunicaciones HF"* 19
- Sánchez Azqueta, Carlos; Aznar Tabuenca, Francisco; García Bosque, Miguel; Gimeno Gasca, Cecilia y Celma Pueyo, Santiago, *"Sistema Hardware de Cifrado Caótico de Señales de Voz para Comunicaciones Seguras"* 27
- Lozano Albalate, Mayte y Trillo-Lado, Raquel, *"Monitorización de la Temperatura en Camiones Frigoríficos"* 35
- Serrano Pitti, Juventino Encarnación; Calderón Godoy, Antonio José y Carmona Fernández, Diego, *"Avances de la Mecatrónica en un Escenario de Operaciones Militares en Ambiente de Selva Húmeda Tropical"* 43

Sesión I-B. *Adquisición de Información y Procesado.*

Jueves 19 de noviembre de 16:00 a 17:30h.

Modera: Fernando Gimeno Bellver – *Centro Universitario de la Defensa de San Javier*

- De Meer Méndez, Alejandro; Núñez Ortuño, José María y González-Cela Echevarría, Gerardo, *"Sistema de Toma de Demoras para Buques Basado en Sensores Inerciales"* 53
- Hernán Vega, Olga; López Rodríguez, Patricia; Escot Bocanegra, David; Poyatos Martínez, David; Fernández Recio, Raúl y Bravo, Ignacio, *"Evaluación de Algoritmos de Identificación No Cooperativa de Blancos Aéreos Mediante Perfiles de Alta Resolución"* 63
- Valles Castro, Antonio y Valles Cancela, José Ignacio, *"Estudio del Impacto Producido por la Variación de Parámetros en las Prestaciones de un Radar LPI"* 71
- Sánchez Álvarez, Luis Francisco, *"Estudio y Medidas de Radiaciones No Ionizantes en un Radar Naval en Banda-D (1 - 2 GHz)"* 91
- Gómez Pérez, Paula; Cuiñas, Íñigo y Crego García, Marcos, *"Reducción de la Efectividad RADAR en la Detección de Blancos en Bosques"* 99
- Gómez Pérez, Paula y Cuiñas, Íñigo, *"Invisibilidad de Blancos Radar Mediante Pantallas Vegetales"* 109

Sesión I-C. *Guiado, Energía y Materiales.*

Jueves 19 de noviembre de 16:00 a 17:30h.

Modera: Marco Antonio Campo Cabana – *Centro Universitario de la Defensa de Marín*

- Gago, Israel; Miguel, Beatriz; León, Gerardo; Ibarra, Isidro J. y López-Maestre, Tomás, *"Nanotecnología en Materiales Compuestos. Posibilidades de Aplicación del Grafeno en Materiales para Defensa"* 123
- Cajal Hernando, Carlos; Jiménez Pacheco, Roberto; Santolaria Mazo, Jorge; Pueo Arteta, Marcos y García García, Miguel Ángel, *"Rapid Tooling Aplicado a Defensa, Potenciales Usos"* 131
- Javierre, Etelvina y García-Aznar, José Manuel, *"Crecimiento y Pérdida de Adhesión en Recubrimientos Autorreparables Basados en Fases Expansivas"* 139
- Patiño Cambeiro, Faustino; Rodríguez Rodríguez, Javier; Patiño Barbeito, Faustino; Goicoechea Castaño, Itziar y Fenollera Bolívar, María, *"El Grafeno ¿También en la Industria Militar?"* 147
- Rodríguez Soria, Beatriz; Gracia Ramos, Ángel; Guillén Lambea, Silvia; Navarro Gutiérrez, Carlos y Sierra Pérez, Jorge, *"Caracterización y Simulación Energética de Tipologías Edificatorias Prefabricadas de los Años 70 en el Ministerio de Defensa"* 155
- Maceiras, Rocío; Alfonsín, Víctor y Puga, Sergio, *"Estudio de Limpieza Ultrasónica Aplicada a Armamento"* 163

Sesión I-D. *Entorno, Sistemas y Modelado.*

Jueves 19 de noviembre de 16:00 a 17:30h.

Modera: Roberto Bellas Rivera – *Centro Universitario de la Defensa de Marín*

- Bardera Mora, Rafael, *"Aerodinámica de Buques con Operación de Aeronaves a Bordo"* 173
- Villa Caro, Raúl, *"Automatización de los Sistemas de Amarre de los Buques. Evolución Futura"* 181
- Espinal Durán, Francisco José, *"Centro de Integración de Sistemas en Tierra para las F-110 (CIST). El Mayor Reto en la Integración de Sistemas Navales en España"* 189
- García Gómez, Amadeo; Prieto Estévez, María Eugenia; Gutiérrez Revilla, César y Ponce Gómez, Juan Manuel, *"Ensayos Hidrodinámicos con Propulsión POD: Ejecución y Extrapolación para Predecir la Velocidad del Buque"* 197
- Alonso Pardo, Bienvenido, *"Proyecto I+D PHANTER: Propulsor de Hélice Anular en Túnel de Elevado Rendimiento"* 205
- Carrascal Villar, Francisco Manuel; Arce Fariña, María Elena; Ulloa Sande, Carlos y Cacabelos Reyes, Antón, *"Influencia de Condiciones Exteriores en la Demanda Energética del Buque de Vela Juan Sebastián de Elcano"* 211

Sesión I-E. *Sociedad, Economía y Humanidades.*

Jueves 19 de noviembre de 16:00 a 17:30h.

Modera: José María Riola Rodríguez – *SDGPLATIN/ DGAM/ MINISDEF*

- Fernández González, Raquel, *"Análisis Institucional de los Regímenes de Responsabilidad Civil por Daños Debidos a la Contaminación por Hidrocarburos: Aplicaciones al Caso Prestige"* 221
- Martínez-Caraballo, Noemí; Muñoz-Sánchez, Fernando y Rosell-Martínez, Jorge, *"La Colaboración Público-Privada como Mecanismo de Asignación Eficiente de Riesgos"* 229
- Fernández Hermida, Xulio, *"Buscando las Claves para una Nueva Organización Social en la Era Post-Información"* 239
- Medrano Adán, Luis Ángel; Muñoz Sánchez, Fernando y Sáenz Royo, Carlos, *"¿Existen Pautas Comunes en el Comportamiento del Gasto en Defensa para Diferentes Países?"* 249
- Vicente Oliva, Silvia; Martínez Sánchez, Ángel; Escribano Bernal, Francisco y Delgado Gómez, José Manuel, *"Definición de la Estrategia Tecnológica en Empresas que Suministran Tecnología a Defensa"* 257

Sesión I-F. *Entorno, Sistemas y Modelado.*

Jueves 19 de noviembre de 16:00 a 17:30h.

Modera: Manuel Caravaca Garratón – *Centro Universitario de la Defensa de San Javier*

- Ruiz López, Carlos y Balmori Abella, José María, *"La Toma de Decisiones Militares. Una Propuesta del Método de Planeamiento de las Operaciones a Nivel Táctico y Logístico para el Ejército de Tierra Empleando la Metodología AHP"* 267

- Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier; Núñez Nieto, Xavier; Espada Recarey, Luis; Patiño Cambeiro, Faustino; Barragáns Martínez, Belén y Bellas Rivera, Roberto, *"Factores Condicionantes para la Redacción de una Normativa Tipo para la Gestión Acústica en Buques de la Armada"* 275

- Carreño Morales, Rafael M.; Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier y Fernández de la Puente de Santiago, Arturo, *"Seguridad y Garantía para las Unidades de la Armada: La Logística Basada en Prestaciones Aplicada al Mantenimiento"* 283

- Martínez-Jurado, Pedro José; Moyano-Fuentes, José y Ruiz-López, Carlos Luis, *"Desarrollo de un Sistema de Evaluación de Proveedores en la Gestión Lean de la Cadena de Suministro Aeronáutica de Defensa"* 295

- Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier; Gálvez Valero, María Coral; Arce Fariña, Elena; Núñez-Nieto, Xavier; Rey González, Guillermo y Espada Recarey, Luis, *"Importancia Adquirida por la Certificación Sostenible LEED en las Actuaciones Constructivas de la US Navy y Posible Adaptación a Defensa"* 303

- Vega Hernando, Guillermo; Ulloa Sande, Carlos; Arce Fariña, Elena y Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier, *"Plan de Marketing ENM"* 311

Sesión II-A. *Adquisición de Información y Procesado.*

Jueves 19 de noviembre de 18:00 a 19:30h.

Modera: Miguel Rodelgo Lacruz – *Centro Universitario de la Defensa de Marín*

- Suárez Varela, Joaquín; Burguillo, Juan Carlos; Sotelo Seguín, Gonzalo; Torres Meira, José y Costa Montenegro, Enrique, *"Twicus: Herramienta para el Análisis y Detección de Ciberbullying en Twitter"* 323
- Sánchez Fernández, Luis; Miñana Rontomé, Tello; Fernández García, Norberto; Basanta Val, Pablo; Arias Fisteus, Jesús; Congosto, Mariluz y Fuentes-Lorenzo, Damaris, *"Primeros Experimentos para Evaluar la Calidad de Fuentes de Información en Twitter"* 331
- Marín López, Manuel y Asorey Cacheda, Rafael, *"Despliegue de una Red MANET entre Lanchas de Instrucción"* 339
- González-Aller Rodríguez, Gerardo; González-Aller Rodríguez, Santiago; Fernández García, Norberto y Barragáns Martínez, Belén, *"SAGA: Sistema Automático de Geolocalización Basado en los Astros"* 349
- Barreras Peral, Álvaro; Bernardi, Simona; Dranca, Lacramioara; López Castelló, Pedro A.; Oller Marcén, Antonio M.; Umpiérrez Rodríguez, Francisco J.; Velasco Cebrián, M. Pilar y Vigara Benito, Rubén, *"Aplicación de un Enfoque Sistemático para el Estudio y Categorización de Comandos de Bandas Terroristas"* 357
- Carreño Felices, Rafael Francisco y Asorey Cacheda, Rafael, *"Automatización del Sistema de Comunicación Visual por Morse de la Armada"* 365

Sesión II-B. *Adquisición de Información y Procesado.*

Jueves 19 de noviembre de 18:00 a 19:30h.

Modera: Iván Puente Luna – *Centro Universitario de la Defensa de Marín*

- Álvarez López, Yuri; González Valdés, Borja; Rodríguez Vaqueiro, Yolanda; Las-Heras Andrés, Fernando y García Pino, Antonio, *"Escáner en Banda Milimétrica para Monitorización de Flujos de Personas"* 375
- Sánchez Álvarez, Luis Francisco, *"Procedimiento de Medida RADHAZ-HERP en Sistemas HF de Banda Ancha Embarcados"* 383
- Solla Carracelas, Mercedes; Rodríguez Moreno, Jorge; Núñez Nieto, Xavier y Novo Lamoso, Alexandre, *"Estrategias de Visualización GPR-3D para la Detección de IED y su Reconstrucción Volumétrica"* 391
- Lagüela López, Susana; Solla Carracelas, Mercedes; Núñez Nieto, Xavier y Lorenzo Cimadevila, Henrique, *"Evaluación de la Termografía Infrarroja como Técnica para la Detección de UXOs"* 399
- Solla Carracelas, Mercedes; Nodar Nodar, Juan Manuel; Nodar Nodar, Cristóbal y Devesa Rey, Rosa, *"Aplicación del Georradar para Levantamientos Batimétrico-Fisiográficos en Entornos de Agua Dulce"* 409
- González-Jorge, Higinio; Díaz-Vilariño, Lucía; Bueno, Martín y Arias, Pedro, *"Monitorización Costera Empleando Sistemas LiDAR en Embarcaciones"* 417

Sesión II-C. *Guiado, Energía y Materiales.*

Jueves 19 de noviembre de 18:00 a 19:30h.

Modera: Rocío Maceiras Castro – *Centro Universitario de la Defensa de Marín*

- Cerecedo Fernández, Carmen; Valcárcel Juárez, Víctor; Torrecillas San Millán, Ramón; Fernández Valdés, Adolfo; Rivera Monte, Sergio y Ferrer Hernando, Rafael, *"Incorporación de Fibras Monocristalinas de Alúmina en Cerámicas Balísticas"* 427

- Díaz García, Jacobo; Romera Rodríguez, Luis E.; Hernández Ibáñez, Santiago; Costas Piñó, Miguel y Paz Méndez, Javier, *"Optimización Aplicada al Diseño de Estructuras de Vehículos"* 435

- Devesa-Rey, R.; Vecino, X.; Moldes, A.B.; Cruz, J.M.; Senent, G. y Urréjola, S., *"Desarrollo de Nuevos Materiales Adsorbentes a Partir de Hidrogeles de Alginato"* 443

- Valles González, María Pilar; González Meije, Alejandro; García Martínez, María y Pastor Muro, Ana, *"Determinación de la Causa de Rotura de un Cilindro Perteneciente al Motor de una Aeronave"* 451

- Pastor Núñez de Castro, Ángel Santos y Laguna Iglesias, Manuel, *"Estudio Preliminar de la Problemática de Aleaciones de Al-Mg en la Armada y Posibilidades de Solución"* ... 459

Sesión II-D. *Entorno, Sistemas y Modelado.*

Jueves 19 de noviembre de 18:00 a 19:30h.

Modera: José Serna Serrano – *Centro Universitario de la Defensa de San Javier*

- Arce Fariña, María Elena; Cacabelos Reyes, Antón; Ulloa Sande, Carlos; González Gil, Arturo y Rodríguez Rodríguez, Javier, *"Análisis del Consumo Energético en Buques con Estancias Prolongadas en Puerto"* 469
- Alonso González, Ángel, *"La Obra Civil y la Segregación, los Retos de Navantia"* 477
- Sanchez-Ricart, L. y García-Peláez, J., *"Reducción del Ruido de Origen Estructural en las Cabinas de las Aeronaves: Diseño de Espumas Metálicas para Depósitos de Queroseno"* 485
- Esteban Viñado, Álvaro y Cuerno Rejado, Cristina, *"Seguridad Operacional en los UAS & RPAS"* 503
- Díaz Bande, Raúl y Porta Rodríguez, Manuel, *"D.M.S. "Device Management System" – Sistema para el Control de Maquinaria, Costes y Recursos"* 511
- Díaz Bande, Raúl y Porta Rodríguez, Manuel, *"L.V.D. – Light Versatile Drone. Sistema de Reconocimiento Aéreo Portátil Mediante UAVs"* 519

Sesión II-E. *Sociedad, Economía y Humanidades.*

Jueves 19 de noviembre de 18:00 a 19:30h.

Modera: Arturo González Gil – *Centro Universitario de la Defensa de Marín*

- Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier; Carreño Morales, Rafael María; Fernández Martín, Álvaro; Bellas Rivera, Roberto y Barragáns Martínez, Belén, *"Técnicas de Ingeniería Sostenible para la Gestión Responsable de la Cadena de Suministro de los Centros de la Defensa"* 529
- Callado-Muñoz, Francisco José y Utrero-González, Natalia, *"Impacto Económico y Social del Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza"* 537
- Hromcova, Jana; Callado-Muñoz, Francisco José y Utrero-González, Natalia, *"Gasto en Defensa y Crecimiento Económico: Nueva Evidencia"* 545
- Ulloa Sande, Carlos; Rey González, Guillermo David; Lareo Calviño, Guillermo y Suárez García, Andrés, *"Nuevos Métodos de Enseñanza Aplicados a Ingeniería Térmica I"* . . . 553
- Arce Fariña, Elena; Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier; Rey González, Guillermo y Álvarez Feijoo, Miguel Ángel, *"Aplicación de Herramientas LEAN y el CUD de la ENM: Generación de Valor y Reflexiones de Benchmarking"* 563

Sesión II-F. *Entorno, Sistemas y Modelado.*

Jueves 19 de noviembre de 18:00 a 19:30h.

Modera: Ángeles Dena Arto – *Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza*

- Bellas Rivera, Roberto y Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier, *"Mejora Continua de los Procesos en Organizaciones de Defensa"* 575
- Aguiar Fernández, Pablo; Casarejos Ruiz, Enrique; Iglesias Lago, Alfredo y Vilán Vilán, José Antonio, *"Desarrollo de un Sistema de Tomografía de Muones para la Detección de Tráfico Ilícito de Material Radiactivo Oculto en Contenedores"* 585
- Fernández Fernández, Francisco Javier, *"Simulación y Caracterización de un Incidente NBQ de Tipo Químico en un Escenario Urbano"* 595
- Sánchez Ramos, Juan José, *"Autoinyectables DEF para Protección NBQ: I+D en Nuevas Presentaciones"* 605
- Sebastián Guerrero, María Victoria; Navascués Sanagustín, María Antonia; Ruiz López, Carlos; Iso Pérez, José María; Arcos Sánchez, Carolina; Arana Aritmediz, Victoria y Orna Montesinos, Concepción, *"Medidas Espectrales de la Actividad Electroencefalográfica Durante Tareas de Simulación Militar"* 613

Sesión III-A. *Adquisición de Información y Procesado.*

Viernes 20 de noviembre de 9:00 a 10:30h.

Modera: Alberto García Martín – *Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza*

- Barreras Peral, Álvaro; Dranca, Lacramioara; López Castelló, Pedro A.; Oller Marcén, Antonio M.; Umpiérrez Rodríguez, Francisco J.; Velasco Cebrián, M. Pilar y Vigara Benito, Rubén, *"Modelos Ocultos de Markov como Herramienta de Perfiles Conductuales. Aplicación al Estudio de Grupos Terroristas"* 623

- Fernández Alonso, Diego; Vázquez Alejos, Ana y García Sánchez, Manuel, *"Debilidades y Amenazas del Sistema 3G y Análisis de Detección de BTS Atacante"* 631

- Antoranz Álvaro, Javier, *"Estudio Teórico-Práctico del Fenómeno de Contribución por Onda Reflejada Aplicado a un Buque de la Armada Española"* 639

- Santos de la Cámara, Raul; Del Peso Quiroga, Jesús; Rábade Roca, José M.; Luengo López, Inmaculada; Fuentes Moro, Diego; Jimeno Sánchez-Patón, Paloma; Muelas Cano, Elena y Uría Vidal, Federico, *"Sistema Avanzado de Fusión de Información Procedente Tanto de Sensores Físicos Como de Redes Sociales en Internet"* 647

- Juncal Martínez, Jonathan; Costa Montenegro, Enrique; Sotelo Seguín, Gonzalo; Torres Meira, José; Barragáns Martínez, A. Belén y Burguillo Rial, Juan Carlos, *"Prueba de Concepto de Software Espía para el Acceso a Interacciones Vía Teclado en Dispositivos Móviles"* 655

- Mosteo, Alejandro R.; Tardioli, Danilo y Montijano, Eduardo, *"Sobre el Impacto de la Limitación Sensorial y de Comunicaciones en dos Algoritmos de Consenso para Asignación de Tareas"* 663

Sesión III-B. *Adquisición de Información y Procesado.*

Viernes 20 de noviembre de 9:00 a 10:30h.

Modera: Carlos Calderón Carnero – *SDGPLATIN/ DGAM/ MINISDEF*

- Vaughan Martín-Mateo, Patrick; López González, Francisco; Jurado Lucena, Antonio; Lucas Verdoy, Berta; Fuertes Suárez, María José; Molero Armenta, Miguel Ángel y Avolio, Corrado, *"ATRAC: Herramienta Automática para la Detección y Reconocimiento de Objetivos en Imágenes de Satélite SAR"* 673

- Izquierdo, David; Gil, Eduardo; Aiger, Montserrat; Lozano, María Teresa; López-Jurado, María Isabel; Lázaro, Jesús; Gracia, Ángel; Garcés, Ignacio; Bailón, Raquel; Peláez-Coca, María Dolores y Bea, José Antonio, *"Monitorización On-Line de Señales Biomédicas para Prevención de Accidentes Hiperbáricos en Actividades Subacuáticas"* 681

- Moreno-Roldán, José M.; Luque-Nieto, Miguel A.; Poncela, Javier; Otero, Pablo y Díaz-del-Río, Víctor, *"Calidad de Transmisión de Vídeo en Redes de Comunicaciones Submarinas"* 689

- Valderas Mayorga, Manuel, *"La Detección de Matrículas en Android"* 697

- González Marcos, Ana Pilar; Campoy Fernández, Jesús; Alaíz Gudín, Antonio María; Pacheco Ordóñez, Fernando y de Pedro Carracedo, Javier, *"Fotónica y Defensa en el Año de la luz"* 705

Sesión III-C. *Guiado, Energía y Materiales.*

Viernes 20 de noviembre de 9:00 a 10:30h.

Modera: Guillermo Lareo Calviño – *Centro Universitario de la Defensa de Marín*

- Mur Amada, Joaquín; García García, Miguel Ángel y Cristóbal Monreal, Iván, *"Mejora de la Eficiencia Energética en un Acuartelamiento Descentralizando la Generación de Calor"* 717
- Mur Amada, Joaquín; García García, Miguel Ángel y Dranca, Lacramioara, *"Estudio de las Variaciones de la Generación Renovable en España"* 727
- Gómez Rodríguez, Miguel Ángel; González Gil, Arturo; Lareo Calviño, Guillermo; Álvarez Feijoo, Miguel Ángel y Piñeiro Paredes, José Javier, *"Estudio de la Eficiencia Energética en los Cuarteles de la Escuela Naval Militar"* 735
- Álvarez Feijoo, Miguel Ángel; Gómez Rodríguez, Miguel Ángel; Suárez García, Andrés y Cacabelos Reyes, Antón, *"Los Materiales de Cambio de Fase en la Armada como Alternativa para una Mayor Eficiencia Energética"* 743
- Álvarez Feijoo, Miguel Ángel; Suárez García, Andrés; Lareo Calviño, Guillermo; Rey González, Guillermo y Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier, *"Alternativas para la Reducción del Consumo y las Emisiones en Motores de Combustión"* 751
- Gutiérrez Bravo, Javier; González González, Juan Félix; Galán González, Carlos Alberto; García Pérez, Ana Isabel; Gonzalo de Grado, Jesús y Suárez Mejías, Rocío, *"Extracción y Análisis de Bioaceite Pirolítico a Partir de Biomasa: una Fuente de Energía Alternativa para Motores a Reacción, Diésel y Quemadores"* 759

Sesión III-D. *Entorno, Sistemas y Modelado.*

Viernes 20 de noviembre de 9:00 a 10:30h.

Modera: Germán Rodríguez Bermúdez – *Centro Universitario de la Defensa de San Javier*

- Casanova Ortega, Daniel; Dena Arto, Ángeles; Elipe Sánchez, Antonio y Tresaco Vidaller, Eva, *"Satélites Artificiales Terrestres Propulsados con Velas Solares. Análisis de su Evolución Temporal y Corrección Orbital"* 769

- López García, Francisco y Columé Columé, Aurelio, *"CITIUS - Command and Control for Interoperability of Unmanned Systems"* 777

- Vidal Fernández, Iván; Garcia-Reinoso, Jaime; Valera Pintor, Francisco; Fernández García, Norberto; Barragáns Martínez, Belén; Oliva Ballega, Lucía y Azcorra Saloña, Arturo, *"Plataforma de Comunicaciones Multi-UAV Multi-Servicio para Aplicaciones de Protección, Seguridad y Defensa"* 785

- Gimeno Bellver, Fernando; Caravaca Garratón, Manuel; Soto Meca, Antonio; Vera López, Juan Antonio y Fernández Martínez, Juan Manuel, *"Un Nuevo Método Numérico Basado en el Modelo de Redes para Simular el Problema de Persecución-Evasión de Sistemas Autopropulsados"* 793

- Serna-Serrano, José; López-Belchí, Alejandro y Sánchez-Velasco, Francisco Javier, *"Capacidades del Túnel Aerodinámico del Centro Universitario de la Defensa de San Javier"* . 801

- Pernas Urrutia, Julio Manuel y Riola Rodríguez, José María, *"Modelado DPM Aplicado a Sistemas Supresores de Firma IR por Agua Nebulizada en Exhaustaciones de Turbinas de Gas Marinas"* 809

Sesión III-E. *Sociedad, Economía y Humanidades.*

Viernes 20 de noviembre de 9:00 a 10:30h.

Modera: Juan Jesús Díaz Hernández – *SDGPLATIN/ DGAM/ MINISDEF*

- Mascareñas y Pérez-Íñigo, Carlos; Palma Guerrero, Juan José; Vázquez Mejías, Ana Isabel y Bermúdez Travieso, Tomás, *"Demostrador de Conceptos de Radiofrecuencia en V-U-SHF Mediante Equipos SDR. Diseño y Aplicaciones Didácticas"* 821

- Carreño Morales, Rafael M.; Eirís Barca, Antonio; Barragáns Martínez, Belén y Pousada Carballo, José María, *"Embarque de Profesores Civiles en el Buque "Juan Sebastián de Elcano": Influencia en la Conciencia de Seguridad y Defensa Nacional"* 829

- Rodríguez-Millán, Marcos; Marco Esteban, Miguel; Loya Lorenzo, José Antonio; Moure Colón, Fernando y Miguélez Garrido, María Henar, *"Tecnologías para la Seguridad y su Aplicación en la Formación Superior de los Futuros Oficiales de la Guardia Civil"* 839

- Gómez Cabello, Alba; Matute Llorente, Ángel; Gómez Bruton, Alejandro; Gutiérrez Gutiérrez, Julián; Manzanos Hernáez, Roberto; Vicente Rodríguez, Germán y Casajús Mallén, José Antonio, *"Evolución de la Composición Corporal y Condición Física de los Cadetes del Ejército de Tierra: Estudio Longitudinal"* 847

- Guerrero Izquierdo, Elena; García Torres, Javier y Hernández Regalado, Miguel Ángel, *"Curación de Úlceras Tórpidas en la Cavidad Oral"* 855

- Hernández Corchete, Sira y Farré Basurte, Jorge, *"Hacia una Comunicación Estratégica Integral de la Defensa. El Concepto del "Soldado Narrativo""* 861

Sesión III-F. *Sociedad, Economía y Humanidades.*

Viernes 20 de noviembre de 9:00 a 10:30h.

Modera: Fernando Muñoz Sánchez – *Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza*

- Aliaga Lavrijsen, Jessica, *"Escritoras en la Gran Guerra: Literatura Bélica de Primera"* 875
- Yebra Pertusa, José María, *"La Primera Guerra Mundial como Conflicto Intergeneracional en la Literatura de Pat Barker"* 883
- Aceña Medina, Javier; Allueva Torres, Pedro; Ayora Hirsh, Alberto; Palop Asunción, Jorge y Ruiz López, Carlos, *"Cómo Afecta a la Memoria la Exposición a Altitudes Extremas, Sin Aporte de Oxígeno Suplementario"* 891
- Alonso, Miguel A.; Gómez-Rodríguez, Carlos; Vilares, David; Doval, Yerai y Vilares, Jesús, *"Seguimiento y Análisis Automático de Contenidos en Redes Sociales"* 899
- Ruiz López, Carlos y Mandiá Orosa, José Patricio, *"La Enseñanza Superior Militar y el Estilo de Pensamiento de sus Alumnos. Un Estudio Empírico"* 907

Sesión IV-A. *Adquisición de Información y Procesado.*

Viernes 20 de noviembre de 11:00 a 12:30h.

Modera: Guillermo Carrera López – *SDGPLATIN/ DGAM/ MINISDEF*

- Álvarez López, Tamara; Rodríguez Trejo, Luis; Fernández Gavilanes, Milagros; Juncal Martínez, Jonathan; Costa Montenegro, Enrique y Burguillo Rial, Juan Carlos, *"Prueba de Concepto de un Sistema para Detección de Usuarios Afines a Ideologías Terroristas a Través de Twitter"* 917

- Fraga Lamas, Paula; Castedo Ribas, Luis; Morales Méndez, Antonio y Camas Albar, José M., *"Sistemas de Comunicaciones Militares de Banda Ancha Basados en Tecnologías Inalámbricas 4G"* 925

- Pinazo-Sánchez, José Miguel y Martínez-Simarro, David, *"Sistemas de Información para la Anticipación y Prevención en Materia de Bioseguridad en la Industria Alimentaria"* .. 933

- Pérez Rodríguez, Belén; Cerqueiro Pequeño, Jorge y Valiente Pérez, José, *"Factores de Riesgo en el Uso de Redes de Comunicación Inalámbricas: Amenazas y Aseguramiento"* 941

- Troncoso, Carmela; Fernández Castro, Bruno; Vázquez Fernández, Esteban; Adkinson Orellana, Lilian; Jiménez Balsa, Gonzalo; Rodríguez Artolazábal, José Antonio; Dosil Lago, Raquel; Argones Rúa, Enrique; Rodríguez Negro, José Antonio y Gómez Alonso, Iago, *"Nuevas Tecnologías Aplicadas a Defensa y Seguridad"* 951

- Camacho Lorenzo, Ione; Barragáns Martínez, Belén y Fernández García, Norberto, *"Implementación de un Sistema de Control de Personal a Bordo Basado en iBeacon-BLE y Raspberry Pi"* 959

Sesión IV-B. *Guiado, Energía y Materiales.*

Viernes 20 de noviembre de 11:00 a 12:30h.

Modera: Carlos Casqueiro Placer – *Centro Universitario de la Defensa de Marín*

- Martínez Ibáñez, Pedro; Aguirre Martínez, José L.; Saura Sánchez, Mariano; Segado Cabezos, Pablo y Luaces Fernández, Alberto, *"Planificación y Control de la Trayectoria de un Vehículo Autónomo Submarino para su Recogida desde una Plataforma Submarina Móvil"* 969

- Velasco, Francisco J.; Trujillo, Jesús; Lastra, Francisco J.; Revestido Herrero, Elías y Vega, Luis M., *"Arquitectura de Control modular y Escalable para Vehículos Autónomos No Tripulados"* 977

- García Rivero, Manuel; Alarcón Romero, Francisco; Viguria Jiménez, Antidio y Ollero Baturone, Aníbal, *"Sistema de Guiado, Navegación y Control para Aterrizaje Asistido en Buque de RPA de Ala Rotatoria sin GPS"* 985

- Sánchez Monreal, Juan y Vera Coello, Marcos, *"SIMEX: SIMulador de EXplosiones Mediante Sistemas SDOF"* 993

- Martín-Gómez, César; Bermejo-Busto, Javier y Zuazua-Ros, Amaia, *"Del Biomorfismo a las Células Peltier: Experiencias en la Investigación Arquitectónica Extrapolables al Ámbito de la Defensa"* 1001

Sesión IV-C. *Guiado, Energía y Materiales.*

Viernes 20 de noviembre de 11:00 a 12:30h.

Modera: Miguel Ángel Gómez Rodríguez – *Centro Universitario de la Defensa de Marín*

- Fonts Amador, Isabel; Ábrego Garrués, Javier; Atienza-Martínez, María; Azuara Medel, Manuel; Gea Galindo, Gloria y Gil-Lalaguna, Noemí, *"Pirólisis de Materia Orgánica Residual para la Obtención de Combustibles Líquidos"* 1011

- Pacheco Ordóñez, Fernando; Briales Rute, Eduardo; Blázquez Hernández, José Enrique; Romero Bernal, Pablo y Campoy Fernández, Jesús, *"Ensayo de Solución de la Problemática del Conjunto de Adaptación y Afuste de la Plataforma Vehicular Mistral"* 1021

- Martínez Jiménez, Amador; González Atance, Luis Carlos; García-Guiu López, Carlos María y Ruiz Padillo, Diego Pablo, *"Planes de Gestión Energética en Campamentos Militares – PGEMi"* 1029

- Lareo, Guillermo; Díaz, Eduardo; Rey, Guillermo y Álvarez, Miguel A. *"Estudio de la Instalación de una Bomba de Calor Hidrotérmica en el Cuartel Francisco Moreno (ENM)"* 1035

- Rey, Guillermo; Ulloa, Carlos; Cacabelos, Antón y González, Arturo, *"Utilización de Sistemas de Trigeneración en BUI"* 1045

Sesión IV-D. *Entorno, Sistemas y Modelado.*

Viernes 20 de noviembre de 11:00 a 12:30h.

Modera: Elena Arce Fariña – *Centro Universitario de la Defensa de Marín*

- Nebot Pitarch, Luis; Núñez Nieto, Xavier y López Arana, Alba, *"Optimización del Sistema de Alumbrado Exterior de la Escuela Naval Militar Mediante Técnicas 3D de Simulación Fotorrealista Basadas en Modelado CAD"* 1057

- Rodríguez-Millán, Marcos; López-Gálvez Muñoz, Héctor; Loya Lorenzo, José Antonio; Lee, Heow Pueh y Miguélez Garrido, María Henar, *"Análisis Numérico del Efecto de la Protección de Mandíbula y Visor del Casco de Combate Bajo Cargas Explosivas"* 1065

- Rodríguez Hernández, Pedro S.; Sicilia Urbán, Miguel Á.; Salazar Riaño, J. Luis; Malgosa Sanahuja, Josemaría; Martínez Torres, Javier y Barragáns Martínez, A. Belén, *"Retos de Investigación para la Ciber Conciencia Situacional en el Contexto de las Operaciones Europeas de Defensa"* 1073

- García-Laencina, Pedro J. y Rodríguez-Bermúdez, Germán, *"Sistemas de Computación Neuronal: Contextualización, Tendencias y Aplicaciones en Seguridad y Defensa"* 1083

- Di Stasi, Leandro L.; Díaz-Piedra, Carolina; Cárdenas, David; Fuentes, Luis J.; Ríos, Francisco; Cherino, Alberto; Suárez, Juan y Catena, Andrés, *"Proyecto EYES. Mejorar la Seguridad en Vuelo Desarrollando Nuevos Métodos de Evaluación Basados en Medidas Neuroergonómicas"* 1091

- Escudero Tellechea, Miguel; Tapia Júdez, Óscar; Lozano Rojo, Álvaro; Hierro Álvarez, Juan Pablo; del Valle Melendo, Javier y Mantilla Iglesias, Enrique, *"Ozono Troposférico en el Centro Nacional de Adiestramiento de San Gregorio y su Entorno"* 1099

Sesión IV-E. *Sociedad, Economía y Humanidades.*

Viernes 20 de noviembre de 11:00 a 12:30h.

Modera: Cristina Mateos Fernández de Betoño – *SDGPLATIN/ DGAM/ MINISDEF*

- Ruiz Rodríguez, Luis Ramón y Solari Merlo, Mariana, *"Análisis de las Técnicas y Materiales de Intervención Policial: Resultados de Investigación Técnico-Jurídicos para la Formación de la Policía de los Ejércitos"* 1109
- Muntané Rodríguez, Joan, *"Dispositivos de Monitorización y Registro en los Planes de Instrucción EOD/CBRN"* 1117
- Rodríguez Bermúdez, Germán; García Laencina, Pedro J. y Roca Dorda, Joaquín, *"Nueva Metodología de Enseñanza/Aprendizaje de la Automatización e Instrumentación Electrónica Basada en la Motivación Vocacional de los Alumnos del Centro Universitario de la Defensa en la Academia General del Aire"* 1127
- Suárez García, Andrés; Arce Fariña, María Elena; Rey González, Guillermo David; Álvarez Feijoo, Miguel Ángel y Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier, *"Uso de Cuadernos iPython en la Creación de Píldoras Educativas sobre Asignaturas STEM"* 1135
- Cerqueiro Pequeño, Jorge; Pérez Rodríguez, Belén y Valiente Pérez, José, *"El Factor Humano como Eslabón Débil de la Ciberseguridad: Riesgos y Formas de Afrontarlos"* ... 1143

Sesión IV-F. *Sociedad, Economía y Humanidades.*

Viernes 20 de noviembre de 11:00 a 12:30h.

Modera: Teresa Lamelas Gracia – *Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza*

- Del Valle Melendo, Javier, *"Aspectos del Agua como Recurso Estratégico: Fuente de Tensiones y Oportunidad de Colaboración en Cuencas Compartidas"* 1155
- Flores Lecha, Óscar Manuel, *"El Inmigrante en el Mediterráneo, ¿Víctima o Delincuente?"* 1163
- Real, Bénédicte, *"Mali Como Ejemplo de Desafío en Materia de Seguridad para España y sus Aliados"* 1175
- Montealegre Gracia, Antonio Luis; Lamelas Gracia, María Teresa; García-Martín, Alberto; de la Riva Fernández, Juan y Escribano Bernal, Francisco, *"Cartografía de Modelos de Combustible Mediante Combinación de Imágenes LiDAR, SAR y Ópticas en el Centro de Adiestramiento "San Gregorio""* 1185
- Sánchez-Lozano, Juan Miguel; Bernal Conesa, Juan Andrés; De Nieves Nieto, Carmen y Roca-González, José Luis, *"Evaluación de la Prioridad de Actuación en Espacios de la Red Natura 2000 Gestionados por el Ministerio de Defensa Mediante la Combinación GIS-MCDM. Caso de Estudio en la Comarca Cartagena-Mar Menor"* 1193
- Álvarez Rodríguez, Ignacio, *"Apuntes sobre la Acción Exterior de las Fuerzas Armadas desde la Perspectiva Jurídica Nacional"* 1201

Sesión I-A

Adquisición de Información y Procesado

Autentificación Segura de Documentos Escaneados mediante Marcado al Agua

Martín-Rodríguez, Fernando[1,*]

[1] Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad de Vigo. Escuela de Ingeniería de Telecomunicación. C/ Maxwell S/N. 36310 Vigo (Pontevedra). Email: fmartin@tsc.uvigo.es (F.M.R.).

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: fmartin@tsc.uvigo.es (F.M.R.);

Abstract: Esta comunicación describe un sistema que intenta ayudar a la ciudadanía en su relación con las administraciones. En muchos procesos burocráticos, se requiere el envío de documentación como diplomas, certificados de nacimiento... Hasta ahora, este tipo de documentación no se puede entregar online (al menos, no de forma segura). Utilizando esta aplicación los usuarios podrán enviar los documentos solicitados utilizando Internet y las administraciones podrán comprobar la veracidad del documento con un nivel de seguridad similar a la que se tiene con la entrega "en persona". En el artículo se describe cómo nuestra aplicación crea una firma digital que será integrada con la imagen utilizando técnicas de marcado al agua (watermarking).

Keywords: E-government, **s**eguridad en la información, autentificación de documentos, encriptado, marcado al agua (watermarking).

---

1. Introducción

Como explicamos en el abstract, este sistema permite enviar documentos seguros a una organización (pública o privada) que puede comprobar su autenticidad. La autentificación se realiza a través de una aplicación que escanea los documentos y firma digitalmente las imágenes. El usuario no puede evitar el proceso de firma porque no tiene acceso a la imagen hasta el final. La firma no puede ser eliminada o alterada sin que sea detectado. Un usuario bien intencionado no necesita saber que los documentos pasan por un proceso de firma y comprobación.

El sistema consiste en tres aplicaciones Java [1] (utilizamos java porque queremos ofrecer un servicio multi-plataforma) que se describen a continuación:

- El cliente: escanea y autentifica documentos. Se trata de la parte principal y más visible. Se debe hacer pública para todos los que quieran enviar documentos (disponible en la Web en el caso de organismo público). El usuario necesitará una máquina virtual Java (la aplicación y su instalador son ficheros .jar). A los usuarios no se les pide que se registren de ninguna manera pero deben poseer un certificado digital válido (proporcionado por una autoridad de certificación reconocida).
- El verificador: esta aplicación sólo está disponible para la organización que recibe los documentos. Su trabajo es comprobar la autenticidad de los mismos.
- El servidor: esta aplicación es necesaria para generar algunas claves que se utilizarán para una correcta autentificación. Toda la actividad será registrada con lo que tendremos anotadas todas las autentificaciones y los usuarios que las realizaron. El servidor debe ser gestionado por la propia organización receptora o por una empresa subcontratada.

En el resto del artículo se describirán los fundamentos técnicos de nuestro sistema así como las conclusiones obtenidas.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

La idea original de este proyecto era generar un hash seguro a partir de una imagen y esconderlo dentro de ella a través de watermarking. Esta idea se reforzó añadiendo un certificado digital del usuario y combinándolo adecuadamente con la función hash. Así se consigue identificar también a los usuarios que autentifican documentos.

Para lograr estos objetivos se utilizan varias técnicas de encriptación y firma digital que conforman un sistema muy seguro.

La decisión de utilizar el lenguaje Java [1] se debe a su naturaleza multiplataforma. Esta es una característica importante porque no sabemos qué plataforma utilizará el usuario y un sistema público debe ser compatible con todas o, al menos, con la mayoría.

Para el control del escáner se utiliza el estándar TWAIN [2] debido a que con él podemos acceder a prácticamente cualquier escáner del mercado.

2.1. Proceso de Autentificación

El proceso de autentificación en la máquina del usuario (figura 1) consiste en los siguientes pasos:

1. El usuario (cualquier persona que quiera enviar un documento) descarga la aplicación cliente y la instala (es un proceso fácil y multi-plataforma gracias al instalador Java: **.jar**). No es necesario registrarse de ninguna forma. Es importante albergar la aplicación en una página institucional para dar confianza a los usuarios.
2. La aplicación escanea el documento (utilizando TWAIN para acceder al escáner [2]) y no permite el acceso directo a la imagen hasta que está autentificada.
3. Calculamos una firma hash a partir de la imagen, utilizamos el algoritmo SHA-1 [3]. Este método produce un hash de 160 bits para cualquier fichero (firma SHA). La probabilidad de que ficheros diferentes produzcan firmas iguales es despreciable. Cualquier modificación de la imagen causará que la firma sea diferente cuando se compruebe. El bit menos significativo

(LSB) no se usa para el cálculo porque se utilizará para el marcado al agua. Nótese que las modificaciones en el LSB de una imagen no son perceptibles al ojo humano, con lo que estrictamente: cualquier modificación PERCEPTUALMENTE SIGNIFICATIVA de la imagen causará que la firma sea diferente.

4. Pedimos al usuario que nos proporcione un certificado digital válido en formato **.p12** [4]. Utilizaremos la clave privada que contiene para cifrar la firma hash recién obtenida (cifrado asimétrico RSA [3], [5][1]). Este paso autentifica al usuario y a la imagen (el hash es "firmado digitalmente" por el usuario).
5. En este momento la aplicación cliente se comunica con el servidor y pide una nueva clave RSA. El servidor registra esta operación (se almacena quién autentifica documentos, cuándo y desde qué IP[2]) y genera un par de claves pública y privada junto a un código que las identificará. A la aplicación cliente solo se le envía el código y la clave pública. El par de claves se usará para proteger la información de firma. La aplicación cliente obtiene la clave pública pero la privada sólo se proporciona a usuarios autorizados (a la aplicación de verificación). El servidor es también una aplicación Java que se puede ejecutar en cualquier máquina de Internet. La comunicación con el servidor se protege utilizando cifrado simétrico: RC4 [7].
6. La firma del paso 4 (hash encriptado) y el certificado de usuario se cifran ahora mediante RSA y la clave pública del paso 5. Este paso completa la protección de la firma ocultándola de usuarios no autorizados. Un usuario no autorizado no podrá verificar el documento ni extraer información de usuario.
7. El mensaje final codificado (paso 6) y el código que generó el servidor (que es necesario para localizar de nuevo el par de claves RSA) forman una trama de datos (figura 2) que se introduce en la imagen utilizando watermarking simple (figuras 3 y 4). Esto es: introducir la información en el bit menos significativo (LSB: Least Significant Bit). Esta técnica consiste simplemente en escribir información en el LSB. Las características perceptuales del ojo humano (incapaz de distinguir más de 60 niveles de gris) hacen que la información del LSB sea ruido invisible.

El usuario obtiene, como resultado, un fichero de imagen (en formato **.png**) que se puede enviar a quien lo requiera[3].

[1] RSA es un cifrado asimétrico. Esto es: se usan diferentes claves para cifrar y descifrar. En este caso, la clave privada (que pertenece al certificado de usuario y sólo se utiliza en el cliente) se usa para cifrar. El descifrado se realizará utilizando la clave pública del certificado (que conoce cualquiera que reciba el certificado). Descifrar sólo será posible si el par de claves pública y privada es consistente (RSA se diseña de forma que es imposible calcular una de ellas aunque se disponga de la otra). Este cifrado es, de hecho, firmar la información SHA de tal forma que sabemos que fue creada por el propietario del certificado.

[2] Con este mecanismo se consigue un registro de usuarios que autentifican documentos aunque no les hemos obligado a registrarse.

[3] Nuestro software siempre genera ficheros **.png** pero podrían convertirse a cualquier otro formato sin pérdidas. No se puede usar un formato con pérdidas porque afectaría a la marca agua (por ejemplo, **.jpg** no es válido). Un formato muy interesante (que no está aún soportado) es **.pdf** que también permite autentificación y firma digital.

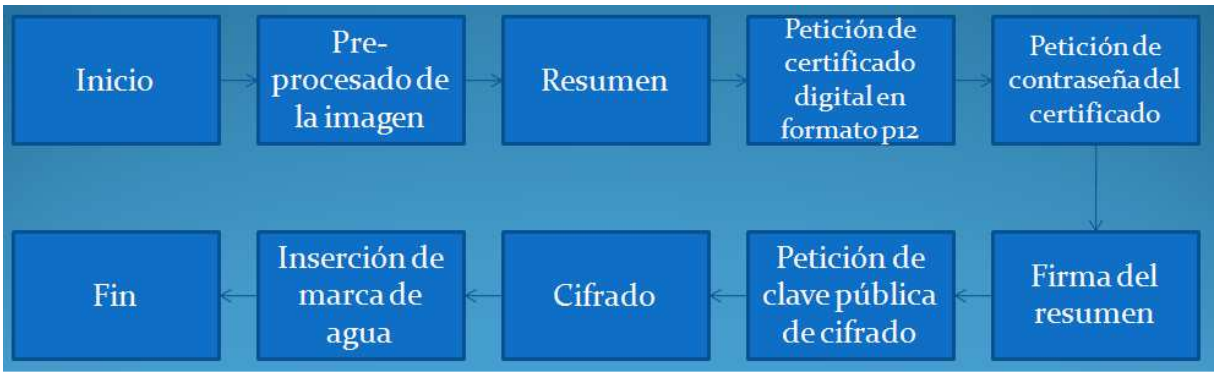


Figura 1. Proceso de autentificación (el LSB de la imagen se fuerza a cero antes de calcular el hash SHA-1).

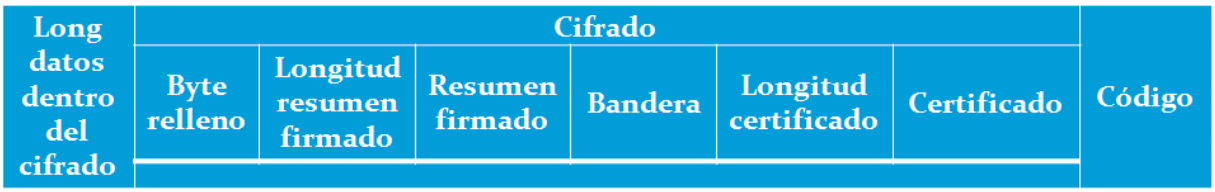


Figura 2. Trama de datos final que se inserta en la imagen (mediante watermarking). El flag, o "Bandera", indica si la imagen se obtuvo desde el escáner o si fue cargado por el usuario, se permite esta opción pero se activa este bit para indicar que es una imagen cargada (el usuario no tiene control sobre ese bit).

2.2. Proceso de Verificación

Los usuarios autorizados (receptores de documentos) utilizarán otra aplicación Java para comprobar las autentificaciones, esto es: verificar que el documento escaneado es idéntico al que se introdujo en el escáner. La verificación se implementa invirtiendo el proceso de autentificación (figura 5), a saber:

1. **Leer la marca al agua:** se lee el bit menos significativo para extraer la información. En este paso ya tenemos el código (procedente del servidor de autentificación) y también tenemos un mensaje encriptado.
2. **Comunicación con el servidor:** la aplicación tiene que proporcionar el código al servidor para obtener la clave (la clave privada que se necesita para descifrar el mensaje). El servidor consulta su base de datos para recuperar la clave. Además, solo la devolverá a clientes autorizados (la comunicación de nuevo se protege utilizando el cifrado RC4).
3. **Descifrar el mensaje:** utilizando la clave privada y el método RSA. Ahora tenemos acceso al certificado de usuario (de manera que sabemos fehacientemente quien autentificó el mensaje). Además tenemos acceso a la clave pública del certificado.
4. **Comprobar la firma digital del usuario:** este paso consiste en descifrar utilizando la clave pública del certificado de usuario (nótese que no tenemos la clave privada, ni la necesitamos). Por fin tenemos acceso al hash de la imagen generado por SHA-1.
5. **Comprobar la firma de la imagen:** se recalcula la firma SHA y se compara con la que hemos obtenido en el paso 4. Si son iguales sabemos que la imagen no fue modificada después de ser escaneada (y sabemos quién la escaneó). Nótese que es fundamental calcular siempre la firma hash eliminando el bit de menor peso.

Obviamente, si la imagen fuese alterada en cualquier momento y de cualquier forma tras el escaneo, el proceso no tendrá éxito. Nótese que el usuario verá el fichero de imagen como una imagen **.png** "normal", esto es: no notará que está firmada y autentificada.



Figura 3. Imagen de ejemplo y sus 8 planos de bit, representados desde el 7 (más significativo, MSB) hasta el 0 (LSB). Nótese que el bit 0 es prácticamente ruido y se puede modificar sin efectos perceptuales.

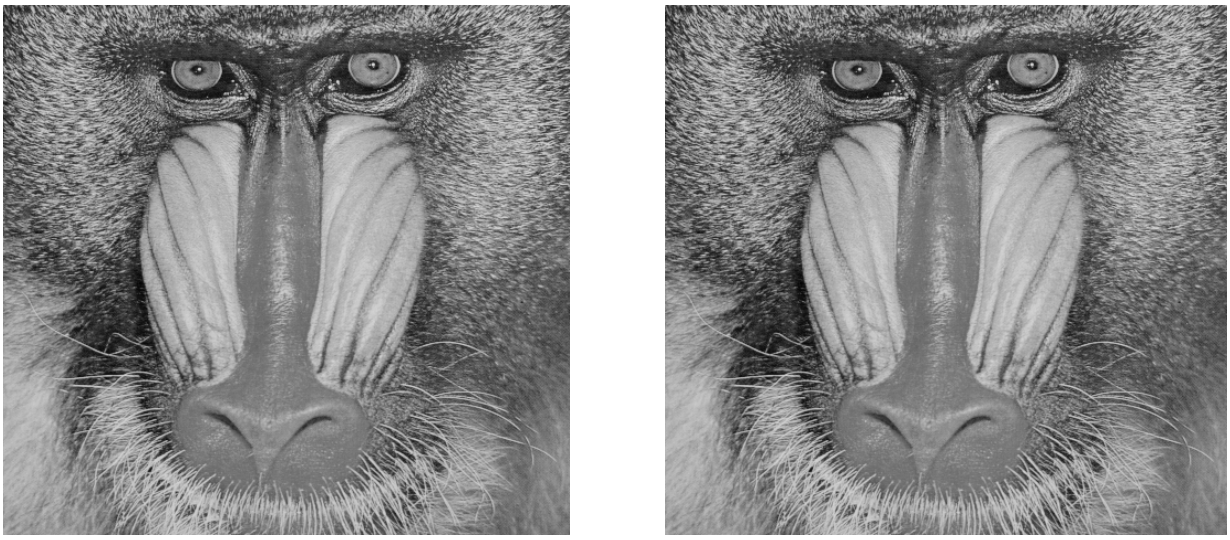


Figura 4. Imagen original (izquierda) e imagen con un mensaje en el LSB (derecha). Es imposible para el ojo distinguir entre ambas, es más: visualmente es imposible saber cuándo hay un mensaje (el mensaje es la palabra inglesa "MESSAGE" repetida 8 veces). En una imagen 512x480 (como ésta) podemos almacenar 512x480=245760 bits (245760/8=30720 caracteres ASCII... ¡¡¡Más de los que hay en este artículo!!!).

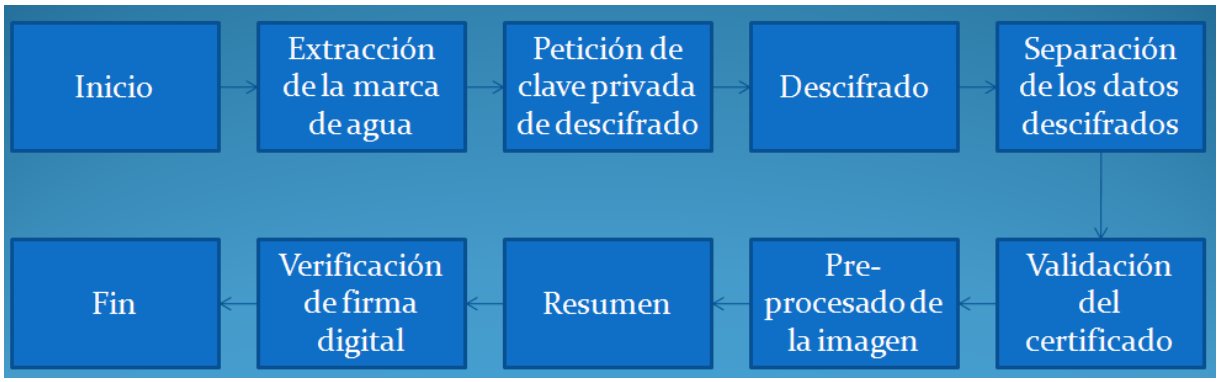


Figura 5. Proceso de verificación.

3. Resultados y Discusión

En esta sección queremos analizar la seguridad del sistema, esto es: pensar en posibles ataques y estudiar la robustez del sistema frente a ellos.

Para empezar debemos hacer claro que este sistema solo garantiza que un documento escaneado es igual al que se presentó al escáner. Si se escanea una buena (o mala) falsificación, la detectaremos como válida. El sistema pretende ser una versión digital del "sello del registro" que las administraciones públicas utilizan para autentificar los documentos físicos recibidos.

Debido al uso de una técnica de watermarking muy simple (débil), es fácil destruir la información de la marca (sin afectar a la información perceptual). Quizás ese no es el peor problema porque no

habrá muchos usuarios interesados en borrar el sello de autenticidad de sus documentos. La solución para esto sería el uso de marcado fuerte [7].

El sistema es muy robusto en la detección de manipulaciones porque cualquier cambio por pequeño que sea resultará en un cambio de la firma hash. Con algunas manipulaciones se podría borrar o corromper la marca al agua de forma que no podríamos leer el certificado de usuario y no podríamos identificar al autor. Si el código del servidor se puede recuperar, sí que podríamos encontrar al usuario en el registro del servidor.

Hemos elegido un esquema donde solo los usuarios autorizados pueden comprobar un documento. Con otros formatos (como el **.pdf**), cualquier usuario puede realizar el test de autenticidad. Si se deseara, se podría hacer la aplicación de comprobación pública sin mayor problema.

Con respecto a los algoritmos de encriptación utilizados, sabemos que son muy seguros ya que utilizan claves largas y, hasta la fecha, no hay publicados ataques efectivos.

4. Conclusiones

Hemos implementado un sistema capaz de autentificar documentos escaneados donde garantizamos no solo la autenticidad sino también la identidad de quien los escaneó. Un servidor crea, además, un registro de los documentos autentificados. Este sistema puede ser muy útil para facilitar los trámites burocráticos ya que permite la presentación de documentos físicos en Internet.

4.1. Líneas Futuras

Aunque nuestro sistema ya es totalmente funcional (figura 6), hemos detectado algunas mejoras interesantes. A saber:

- Generar otros formatos de salida, especialmente ficheros **.pdf** firmados ya que este formato se está imponiendo como estándar.
- Leer documentos de varias páginas utilizando un escáner con alimentador automático. En este caso elegiríamos cómo queremos la salida: ficheros de imagen individuales, formato multi-imagen (**.tif**) o un **.pdf** con varias páginas (de nuevo el PDF parece el más interesante).
- Utilizar un algoritmo más fuerte para el marcado al agua [7]. El watermarking débil funciona bien pero con métodos más avanzados podríamos crear marcas que no se borran aunque se procese la imagen (procesados como escalado, rotación, compresión JPEG…). Con esta mejora podríamos identificar a los usuarios que autentificaron imágenes manipuladas.
- Cambiar el algoritmo de hash. SHA-1 es un poco antiguo y se puede sustituir por SHA-2 o por el nuevo SHA-3. Pero la mejora definitiva sería emplear un hash que dependa de la información en la imagen, no de los bits individuales. Con un hash binario, cualquier cambio provocará un cambio en el hash: re-escanear la imagen produciría un hash diferente. Con hash basado en la imagen [8], el hash cambiará solamente cuando los cambios de la imagen son “significativos perceptualmente”.

Una funcionalidad que ya se ha implementado [9] es la posibilidad de utilizar el sistema para crear “documentación digital segura”, esto es: podemos crear un diploma universitario o un documento de identidad digital que tenga la forma de una imagen y que esté autentificado. Al abrir la imagen vemos visualmente la información (como cuando alguien nos enseña un diploma físico) y además ese documento puede comprobarse (puede comprobarse que fue nuestra Universidad quien generó esa imagen y tenemos seguro que no se cambiaron datos).



Figura 6. Volcado de pantalla de la aplicación verificadora comprobando un documento.

Agradecimientos

El autor desea expresar su agradecimiento a los ingenieros Javier Biurrum y Fernando Gil que nos ayudaron a definir este sistema en las primeras etapas de desarrollo. Así como también a los alumnos de último curso (ahora ingenieros): Juan M. Fernández Montenegro y Ana Rodríguez Paseiro que desarrollaron el código del sistema y, además, aportaron ideas al proceso de diseño.

Referencias

1. Bruce Eckel, *Thinking in Java*, Prentice Hall, 2006.
2. www.twain.org
3. William Stallings, *Cryptography and network security: principles and practice*, Prentice Hall, 2006.
4. IETF, *RFC 2459: Internet X.509 Public Key Infrastructure, Certificate and CRL Profile*. www.ietf.org.
5. Andrew S. Tanenbaum, *Computer networks*, Prentice Education, 2003.
6. Sitio official de RC4 (stream encrypting), comprobado a 12/04/2012: http://www.wisdom.weizmann.ac.il/~itsik/RC4/rc4.html
7. F. Pérez-González, S. Voloshynovskiy, *Fundamentals of Digital Image Watermarking*, John Wiley & Sons Inc. 2011.
8. M. Johnson, K. Ramchandran, "Dither-Based Secure Image Hashing Using Distributed Coding", *Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing* (Barcelona, España), Septiembre, 2003.
9. A. Rodríguez Paseiro, F. Martín Rodríguez, *Sistema Xenerador de Documentación Dixital Segura*, Proyecto Fin de Carrera, Escuela de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad de Vigo, 2011.

Planificación S-TDMA en redes submarinas de comunicaciones inalámbricas

Luque-Nieto, Miguel A. [1,*], Moreno-Roldán, José M. [1], Poncela, Javier. [1], Otero, Pablo [1], Fernández-Salas, Luis M. [2] y Díaz-del-Río, Víctor [3]

[1] Universidad de Málaga, E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación. Direcciones electrónicas: luquen@uma.es, jmmroldan@uma,es, jponcela@uma.es, pablo.otero@uma.es.

[2] Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Cádiz. Dirección electrónica: luismi.fernandez@cd.ieo.es

[2] Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Málaga. Dirección electrónica: diazdelrio@ma.ieo.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo; Dirección electrónica: luquen@uma.es.

Abstract: Las redes submarinas de sensores son de importancia en la vigilancia y monitorización del medio submarino. Si se desea que las redes sean inalámbricas y con un alcance superior a unos pocos metros, las comunicaciones han de ser acústicas. El canal acústico submarino es de poca capacidad de transmisión y muy hostil en términos de ruido y desvanecimiento, ya que es selectivo en frecuencia. Además, estas redes inalámbricas plantean el problema añadido de la alimentación eléctrica. En redes de tráfico saturado, el procedimiento más eficiente de acceso al medio es TDMA espacial, por los menores "overheads" y la práctica ausencia de "handshaking". En esta comunicación se presenta un procedimiento para la obtención de una planificación eficiente en redes submarinas de comunicaciones que utilicen TDMA espacial. El procedimiento está basado en dos algoritmos heurísticos encadenados y encuentra una planificación temporal eficiente para conseguir la misma cantidad de información de los sensores de cada nodo de la red.

Keywords: USN; S-TDMA; Comunicaciones submarinas; Protocolos de comunicaciones.

---

1. Introducción

Las redes submarinas de sensores, como medio de monitorización del medio acuático, tienen múltiples ámbitos de aplicación, entre los que pueden citarse las geociencias marinas, la explotación de caladeros de pesca, la vigilancia de la calidad de las aguas y, por supuesto, la seguridad y la defensa,

porque pueden usarse para la vigilancia de puertos, de cercanías de buques y, en sentido más amplio, para telemando, telecontrol y telemedida con vehículos autónomos submarinos [1]. En el medio marino está aceptado que las mejores comunicaciones son las realizadas mediante ondas acústicas. El canal acústico submarino de comunicaciones es muy distinto de los canales electromagnéticos habituales, con velocidad de propagación y con capacidad de transmisión mucho menores que en los canales electromagnéticos. En aguas someras el canal puede llegar a ser muy hostil, en el sentido de comunicaciones, sobre todo porque el desvanecimiento es selectivo en frecuencia, con distribuciones estadísticas de tipo Ricean-shadowed [2]. Por todo ello exige un especial cuidado en la elección de la topología de la red y en el diseño de las técnicas de comunicación, entre las que tienen un papel muy principal los protocolos de acceso al medio y de enlace.

En este artículo se presenta un protocolo de comunicaciones para una red submarina de sensores dispuesta en una topología en cadena, de forma que se disponen los nodos en hileras paralelas entre sí. Esta topología es muy poco común entre las redes de comunicaciones terrestres, pero es muy adecuada para monitorizar regiones con formas estrechas y largas, como por ejemplo, bocanas o perímetros. En el tipo de red submarina de comunicaciones que proponemos y del que pueden verse dos ejemplos en la figura 1 hay dos tipos de nodos, los que incorporan sensores y un nodo de comunicaciones cuya misión es actuar de concentrador de las transmisiones de los nodos sensores y de relevador para la comunicación con el mundo exterior. En lo sucesivo nos referiremos a este nodo como concentrador (“gateway”). A la vista de la topología, pueden usarse dos técnicas de transmisión entre los nodos sensores y el concentrador: difusión o multi-salto. En redes submarinas, donde la energía es un recurso muy escaso y la capacidad de transmisión pequeña, se elige la segunda técnica por ser más eficiente en ambos casos. En lo que respecta a la técnica de control de acceso al medio (MAC), pueden considerarse las de acceso múltiple por división de frecuencia o tiempo (FDMA/TDMA) y las de acceso aleatorio con evitación de colisión (MACA) ([3], [4], [5], [6]). Debido a la limitación de energía y a la también escasa anchura de banda disponible para la transmisión acústica, se ha optado por la técnica TDMA espacial (STDMA) [7]. El objetivo de este trabajo entonces es realizar la planificación de una red multisalto STDMA, que no está resuelto aún en la literatura técnica para el tipo de redes propuestas, para lo que se proponen dos algoritmos que, combinados, encuentran una planificación temporal muy eficiente.

En este trabajo se considera que las ubicaciones de todos los nodos son igualmente importantes a efectos de monitorización, por lo que el objetivo de la planificación es conseguir que todos los nodos consigan hacer llegar la misma cantidad de información al concentrador. A la planificación que consiga ese objetivo la llamaremos planificación ecuánime (“fair planning” o “fairness”) [8]. Otros autores han tratado recientemente el asunto del “fairness” en la planificación de redes STDMA ([9], [10], [11]), aunque ninguno de ellos la ha estudiado en términos de rendimiento de transmisión (“throughput”) en función de la posición del concentrador o del tamaño de la red, es decir, del número de nodos.

2. Diseño de la red

La topología de la red es la adecuada a la vigilancia de un perímetro, y tiene aspecto de cadena. El concentrador puede estar en el centro de la red, lo que mejorará el rendimiento (throughput) de la red, o en un extremo, lo que simplificará la comunicación con el mundo exterior. Ambas posibilidades se muestran en el ejemplo de trece nodos (doce nodos sensores y un concentrador) de la figura 1. Aunque se tiene una cadena de tres ramas, los nodos se encuentran situados en los vértices de una malla triangular equilátera de distancia constante. Los nodos adyacentes, o vecinos, están dentro de sus respectivos alcances de transmisión, mientras que los no adyacentes no lo están. Esta simplificación parece razonable ya que el control de potencia es una prestación común en transceptores. Mientras un nodo transmite, los seis de los vértices del hexágono que lo rodea reciben su señal. Por lo tanto, vecinos entre sí o incluso algunos vecinos de vecinos no pueden transmitir simultáneamente, ya que no consideramos el uso de transductores directivos, que no es una hipótesis realista. Llamamos nodos compatibles a los nodos que pueden transmitir simultáneamente. La explotación, por tanto, es en modo *simplex*. En lo que respecta a la naturaleza del tráfico de datos, suponemos tráfico saturado, ya que consideramos de gran interés la transmisión de imágenes. En la técnica multi-salto que se propone en esta comunicación, el encaminamiento está prefijado, un nodo sólo acepta paquetes de otro nodo más arriba en la cadena y envía paquetes sólo a otro nodo más abajo en la cadena. Considerado todo lo anterior, el acceso múltiple al medio se realiza por división de tiempo y espacio (STDMA). El tiempo se divide en intervalos ("slots") o ranuras de tiempo (simplemente ranuras en lo que sigue, por agilidad) de duración fija. El régimen binario es idéntico para todos los nodos. Llamamos trama al conjunto de ranuras necesarias para que cada uno de los nodos haga llegar con éxito al concentrador un paquete de sus datos propios, y sólo uno. Es decir, la operación de la red es periódica y el período es la trama. Se usan los nodos compatibles para acortar la duración de la trama al mínimo posible. Se supone que todas las transmisiones están libres de errores. Esta hipótesis puede no parecer realista, pero con ayuda de códigos especiales se puede estar lo suficientemente próximo a ella y, además, el objeto del estudio, que es encontrar la planificación temporal que hace la trama más breve y aumenta el throughput, no queda invalidado por su incumplimiento.

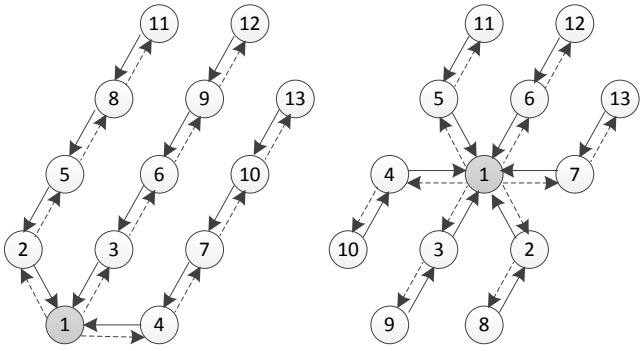


Figura 1. Ejemplo de redes con topología en cadena. El concentrador es el nodo 1.

3. Algoritmos de planificación STDMA

En este apartado se encontrará la secuencia de ranuras que hacen una trama "fair". Para ello hay que empezar por encontrar los que llamamos nodos compatibles, que son los nodos que pueden transmitir simultáneamente. Como sólo nodos vecinos están dentro del alcance, sólo hay que evitar que tenga que recibir un nodo mientras está transmitiendo. A continuación se encuentran un conjunto completo de ranuras en las que sólo transmiten nodos compatibles. Dos protocolos son posibles: asignación orientada a nodo [9] o asignación orientada a enlace [12]. En comunicaciones submarinas, donde no cabe contar con transductores directivos, la asignación orientada a nodo es la recomendada. El tercer paso en el establecimiento de la planificación es crítico: encontrar, entre los conjuntos mencionados en el primer paso, el que da lugar a la trama "fair" más corta. Hemos desarrollado una técnica basada en la llamada matriz de compatibilidad [6].

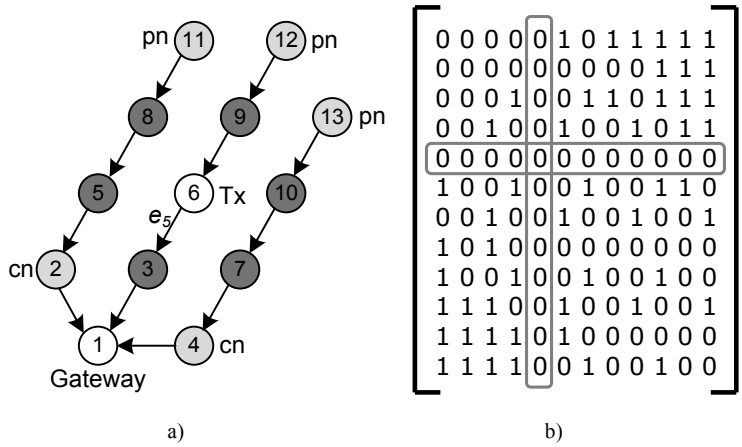


Figura 2. a) Ejemplo de red con 13 nodos en la que transmite el nodo 6. En gris oscuro, los nodos vecinos y en gris claro los vecinos de vecinos. b) Matriz de compatibilidad.

Definido el grafo, llamamos arista e_{i-1} a la arista de transmisión del nodo *i*. Llamemos M a la matriz de compatibilidad; sus elementos M_{ij} serán 1 ó 0, según que e_i y e_j puedan estar activas simultáneamente o no. En el ejemplo de la figura 2 se observa que el nodo 6 es incompatible con cualquier otro nodo por lo que todos los elementos de la fila y de la columna 5 de la matriz M son ceros. Consideremos el conjunto de vértices de nuestra red. Un clique es un subconjunto de vértices entre los que existe una arista que los conecta. En nuestra red consideramos cliques los conjuntos de nodos compatibles. Se llama cubierta de cliques de un grafo al conjunto de cliques posibles. Nuestra técnica está basada en identificar todos los cliques máximos con ayuda de un algoritmo descrito en [13]. Sea $C = \{C_1, C_2, \ldots, C_k\}$ la cubierta de cliques, donde k es un número natural todavía indeterminado [6]. Cada arista del grafo debe estar en al menos un clique de la cubierta. Hecho esto, cada ranura de la trama contendrá un clique de la cubierta o nodos sueltos, lo que asegura la transmisión compatible en esa ranura. Para obtener la trama más corta (p.ej., el conjunto $P = \{P_1, P_2, \ldots, P_L\}$ con L mínimo y $P_j \in C$) hemos desarrollado un procedimiento heurístico compuesto por dos

algoritmos, que llamamos de Asignación y de Acortamiento, respectivamente. Esos dos algoritmos quedan definidos con sus diagramas de flujo, que se muestran en las figuras 3 y 4. La aplicación secuencial de los dos algoritmos conduce a la construcción de la trama más corta posible.

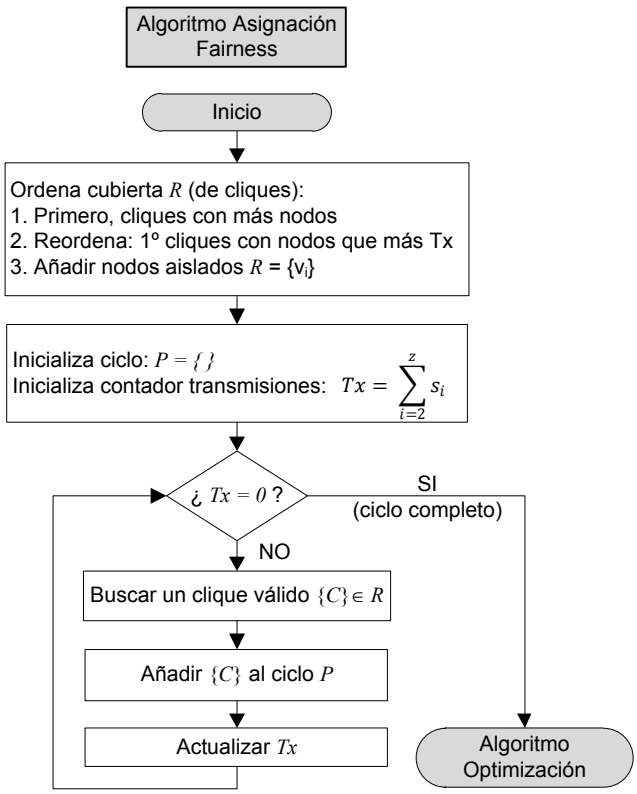


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo de Asignación.

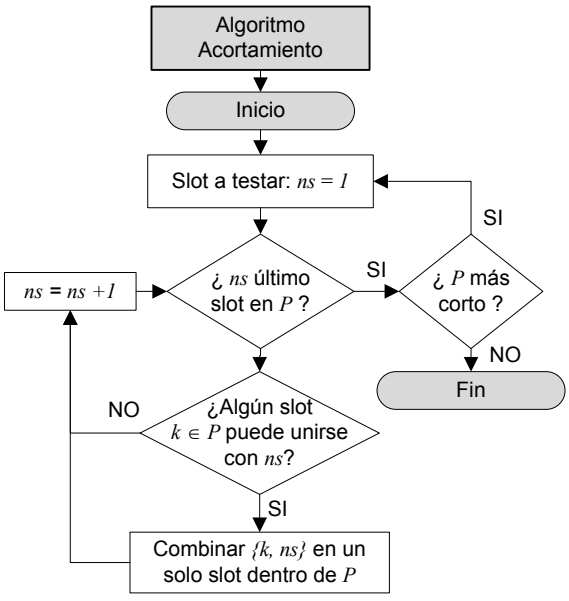


Figura 4. Diagrama de flujo del algoritmo de Acortamiento.

4. Resultados

Al objeto de conocer y proporcionar al lector una idea del "throughput" de una red de estas características se ha realizado un caso práctico. Hemos elegido una red de 13 nodos (un concentrador y 12 nodos sensores). El tráfico será saturado si los nodos incorporan sensores como una cámara de fotografía o de vídeo, es decir, que se pretenda transmitir imágenes. Para el régimen binario se ha usado la cifra de 31200 bit/s, pues ya existen módems comerciales que aseguran alcances de 1 km con ese régimen. Aceptamos que las imágenes se codifican con 24 bit/pixel. Algunas posibles relaciones de aspecto y tasas de compresión se muestran en la tabla 1.

La figura 5 muestra, por ejemplo, que para conseguir una imagen de calidad C-1 (640x360 pixel, 24 bit, 16:9, sin compresión) de cada uno de los 21 nodos hacen falta 250 minutos si el concentrador está en un extremo de la red. La figura 5 proporciona una idea cuantitativa de cuántas imágenes podrían transmitirse en función de su calidad, del número de nodos y de la posición del concentrador. Para la obtención de estas cifras se ha supuesto que la transmisión está libre de errores. Obviamente este punto no es cierto y las cifras deben modificarse para tener en cuenta la pérdida de rendimiento de transmisión debida a los procedimientos de corrección de errores que usen los protocolos competentes de la red. Este asunto está siendo analizado y estudiado en la actualidad por los autores de esta comunicación.

Resolución	AR	1 Sin compresión	2 JPEG, Q=50%	3 JPEG, Q=25%
A: 320x180	16:9	1,382,400	92,160	60,104
B: 320x240	4:3	1,843,200	122,880	80,139
C: 640x360	16:9	5,529,600	368,640	240,417
D: 640x480	4:3	7,372,800	491,520	320,556
E: 1280x720	16:9	22,118,400	1,474,560	961,669
F: 1280x960	4:3	29,491,200	1,966,080	1,282,226
G: 1600x1200	4:3	46,080,000	3,072,000	2,003,478
H: 1920x1080	16:9	49,766,400	3,317,760	2,163,756

Tabla 1. Ejemplos de transmisión de imágenes digitales. AR: relación de aspecto; Q: factor de compresión.

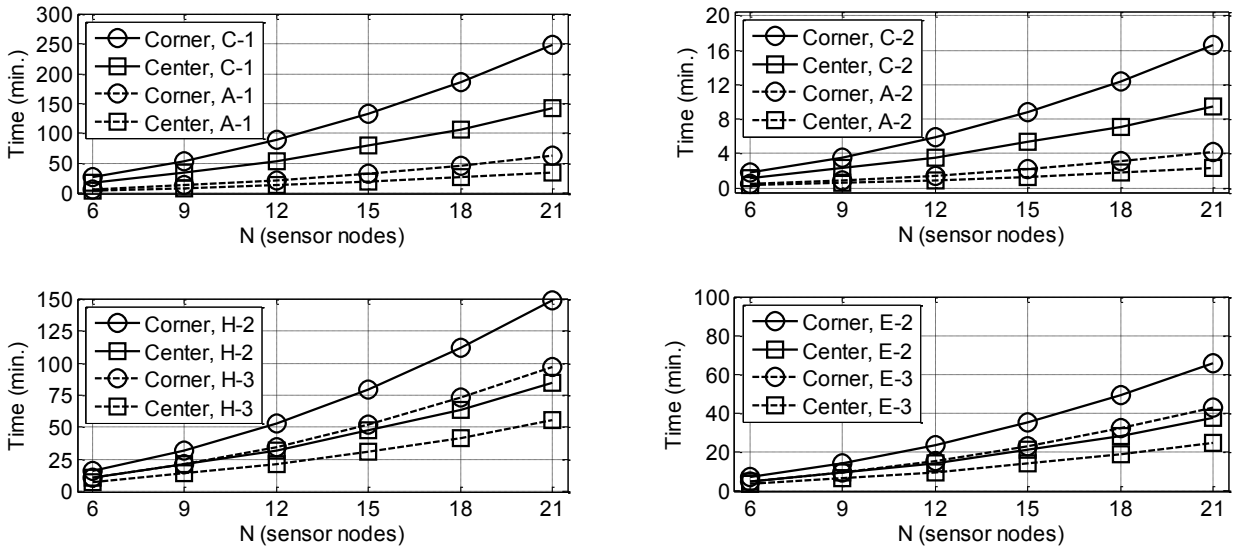


Figura 5. Tiempo necesario para conseguir una imagen de cada nodo, en redes de hasta 21 nodos. La calidad de la imagen se describe con las letras y los números de la tabla 1.

5. Conclusiones

En esta comunicación se ha presentado un nuevo procedimiento para obtener la planificación temporal óptima en redes submarinas de comunicaciones inalámbricas que utilizan S-TDMA como protocolo de acceso al medio. La topología de las redes es en cadena, con tabla de encaminamiento pre-establecida. El modelo de tráfico es de saturación, es decir, todos los nodos tienen datos dispuestos para su transmisión. Un importante criterio previo a la planificación es que todos los nodos de la red consigan hacer llegar al nodo concentrador el mismo volumen de información, lo que en inglés se conoce como "fairness". El procedimiento propuesto está basado en dos algoritmos heurísticos encadenados, el primero llamado de Asignación, que busca qué nodos pueden transmitir simultáneamente y elabora las posibles planificaciones con este solo criterio. El segundo, llamado de Acortamiento, encuentra la asignación que da lugar a la trama más breve, es decir, que aumenta el "throughput". La comunicación se completa con un ejemplo práctico donde se proporcionan órdenes de magnitud de tiempos de trama y del tiempo necesario para que todos y cada uno de los nodos hagan llegar al concentrador una imagen.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con ayuda de la Universidad de Málaga (Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech).

Referencias

1. Pompili, D.; Melodia, T. Research Challenges in Communication protocol design for underwater Sensor networks; in *Underwater Acoustic Sensor Networks*. CRC Press,Boca: Raton, FL, 2010.

2. Ruiz-Vega, F.; Clemente, M.C.; Otero, P.; Paris, J.F. "Ricean shadowed statistical characterization of shallow water acoustic channels for wireless communications," in *Proc. IEEE Conf. Underwater Communications: Channel Modelling & Validation*, UComms, Sestri Levante, Italy, Sep. 2012.
3. Kurose, J.F.; Ross, K.W. *Computer Networking. A Top-Down Approach*; 6ª ed. Pearson: Harlow, Reino Unido, 2013.
4. Shahabudeen, S.; Motani, M.; Chitre, M. "Analysis of a high-performance MAC protocol for underwater acoustic networks," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, Vol. 39, No. 1, pp. 74-89, (Errata corrections in: p. 203).
5. Otnes, R.; et al. Underwater Acoustic Networking Techniques. Springer: Heidelberg, Alemania, 2012.
6. Shahabudeen, S.; Chitre, M.; Motani, M. "Adaptive multimode medium access control for underwater acoustic networks," IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, Vol. 39, No. 3, pp. 500-514.
7. Nelson, R; Kleinrock, L, "Spatial TDMA: A collision-free multihop channel access protocol", IEEE Trans. Communications, 1985, Vol. Com-33, No.9, pp. 934-944.
8. Mo, J.; Walrand, J. "Fair end-to-end window-based congestion control", IEEE/ACM Trans. Networking, 2000, Vol. 8, No. 5, pp. 556-567.
9. Bjorklund, P.; Värbrand, P.; Yuan, D. "A column generation method for spatial TDMA scheduling in ad hoc networks," Ad Hoc Networks (Elsevier), 2004, Vol. 2, No. 4, pp. 405–418.
10. Djukic, P.; Valaee, S. "Link scheduling for minimum delay in spatial re-use TDMA", 26th IEEE Int. Conf. Computer Communications, INFOCOM 2007, Anchorage, Alaska, 6-12 May 2007, pp. 28–36.
11. Wang, Z.; Yu, F.; Tian, J.; Zhang, Z. "A fairness adaptive TDMA scheduling algorithm for wireless sensor networks with unreliable links," Int. Journal Communication Systems, 2014, Vol. 27, No. 10, pp. 1535-1552.
12. Chou, A.-M., Li, V.O.K. "Slot allocation strategies for TDMA protocols in multihop packet radio networks", Proc. Eleventh Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, IEEE INFOCOM '92, Florence, Italy, 4-8 May 1992, Vol. 2, pp. 710–716.
13. Bron, C., Kerbosch, J. "Algorithm 457: finding all cliques of an undirected graph", *Communications of the ACM Mag*. (CACM), Vol. 16, No. 9, pp. 575-577, Sep. 1973.

Diversidad de Recepción. La Piedra Angular de las Comunicaciones HF.

Zazo Bello, Santiago [1,*], Pérez Álvarez, Iván A. [2] y Montesdeoca Hernández, Miguel [3]

[1] Universidad Politécnica de Madrid. Email: santiago@gaps.ssr.upm.es (SZB)

[2] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC); Email: iperez@idetic.eu (IAPA).

[3] MM CICOM Telecomunicaciones S.L; Email: mmcicom@mmcicom.com (MMH).

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: santiago@gaps.ssr.upm.es (SZB)

Abstract: Las comunicaciones ionosféricas en la banda de HF juegan un papel esencial en los enlaces de larga distancia en entornos civiles y fundamentalmente militares como alternativa al enlace vía satélite cuando éste no existe o su coste es excesivo. Por otro lado, es bien sabido que este enlace es muy desfavorable con elevada distorsión y ruido que provocan transmisiones de voz habitualmente analógicas casi ininteligibles e inmersas en un ruido muy molesto. Por otro lado, las transmisiones de datos son habitualmente de baja velocidad y frecuentes retransmisiones. El sistema HFDVL (HF Data+Voice Link) ha sido descrito en numerosas publicaciones y probado exhaustivamente en colaboración con nuestras Fuerzas Armadas con resultados muy prometedores tanto en datos como voz digital interactiva. Estas prestaciones son debidas al cuidadoso diseño del esquema de modulación y codificación y a un elemento muy novedoso en este tipo de aplicaciones: la recepción multiantena. Este aspecto será descrito con detalle en esta publicación justificando por qué la diversidad espacial / polarización proporciona tanta ganancia mediante la implementación de un combinador óptimo. Finalmente se ilustrarán resultados de enlaces reales en colaboración con el Ministerio de Defensa que permiten cuantificar de forma objetiva las mejoras frente a otros módems habitualmente usados por nuestros ejércitos.

Keywords: sistema HFDVL, comunicaciones ionosféricas, banda HF, sistemas multiantena, modulación OFDM, diversidad espacial y de polarización.

---

1. Contexto del sistema HFDVL

En la actualidad, existe una necesidad expresada por las FF.AA de comunicaciones HF (ionosféricas) que permitan enlaces a muy larga distancia, sin necesidad de desplegar infraestructura de repetición

entre extremos, que ofrezca una calidad de voz aceptable, con cierta velocidad de transmisiones de datos y con un enlace estable y permanente.

La ionosfera es una infraestructura de repetición natural que presenta una fiabilidad cuestionable. Por ello, se plantea la necesidad de mejorar la disponibilidad del canal de forma automática y transparente para el usuario con el fin de conseguir una tecnología en HF para comunicaciones con suficientes prestaciones (calidad, velocidad). De esta forma es posible sustituir en ciertas aplicaciones con bajos requerimientos de ancho de banda a las comunicaciones por satélite.

En este sentido, los grupos de investigación de GAPS (Grupo de Aplicaciones de Procesado de Señal) en la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) e IDeTIC (Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones) en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) llevan más de 15 años trabajando en comunicaciones en la banda de HF. Si inicialmente los desarrollos tenían una orientación civil en el ámbito aeronáutico, en un plazo muy breve se puso de manifiesto el interés para nuestras Fuerzas Armadas, siendo este enfoque el que ha dirigido nuestra actividad en los últimos años. La base fundamental de estos desarrollos es el uso de principios de SDR (Software Defined Radio) que mejoran indudablemente las prestaciones de las comunicaciones HF y garantizan la interoperabilidad con el resto de las redes de Defensa. Hemos de indicar que esta transmisión de datos es perfectamente integrable con un sistema de encriptado.

Como primer paso, la transmisión de voz digital interactiva con una supresión total del molestísimo ruido del enlace analógico y con un grado de inteligibilidad equivalente a una conversación telefónica despertó gran interés en los tres ejércitos. Este hecho se puso de manifiesto en la publicación *Romper las barreras del retardo en HF: una idea hecha realidad* en el Boletín de Observación Tecnológica en Defensa, No.18, páginas 43 - 45, 1er trimestre 2008 [1].

Posteriormente, la transmisión de datos de alta velocidad tomó todo el protagonismo introduciendo elementos innovadores como es el uso de modulaciones modernas, diversidad de antena y de canal convirtiendo el enlace habitual percibido como inestable y de baja velocidad de transmisión en un nuevo paradigma con comunicaciones fiables, permanentes y de alta velocidad. En este tiempo, hemos de agradecer a las FF.AA. su colaboración permitiendo que estos sistemas hayan sido probados en sus instalaciones tanto fijas como móviles definiendo de forma coordinada las pruebas de interés así como la propia funcionalidad de los equipos.

Sin embargo, el aspecto más destacado de los últimos años ha sido la colaboración del Ministerio de Defensa mediante el proyecto del Programa Cooperación en Investigación Científica y Desarrollo en Tecnologías Estratégicas DN8644-COINCIDENTE de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) de título ***Desarrollo, implementación y prototipado de una forma de onda español en HF para la transmisión de voz digital y datos en el ámbito de defensa (MDEF-HFDVL)*** (expediente 10032110044). Este proyecto ha posibilitado la construcción de una plataforma hardware específica y el desarrollo de aplicaciones como el correo electrónico, mensajes cortos y transmisión de ficheros cumpliendo con los principios de la STANAG 5066. Ha nacido así el *Sistema HFDVL* (HF Data+Voice Link) basado en el módem HFDVL. Todo ello abre la puerta a un futuro en el que probablemente estos equipos puedan cubrir las necesidades de comunicación a larga distancia de nuestras FF.AA. Los principales resultados se han publicado en ***Un módem español de transmisión de datos de alta velocidad en HF*** en el Boletín de Observación Tecnológica en Defensa, Vol. 9, No.18, páginas 24 - 30, 3er trimestre 2014 [2].

Como último paso fundamental hemos de destacar la reciente firma de un nuevo proyecto del Programa Cooperación en Investigación Científica y Desarrollo en Tecnologías Estratégicas DN8644-COINCIDENTE de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) de título ***Conectividad e Interoperabilidad de Sistemas IP en redes HF mediante el sistema HFDVL-NB/WB (IP-HFDVL)*** (expediente en proceso de firma) cuyos objetivos fundamentales son tres:

- Incrementar el ancho de banda de nuestro módem. Por coherencia con las tendencias actuales marcadas por la norma MIL 188.100C consideraremos 24 kHz pero no se descarta en el futuro expandir esta banda con cierta arbitrariedad.
- Implementación de una gestión automática del enlace (ALMA Automatic Link MAnagement)

que permita coordinar el funcionamiento del módem de datos con un módem adicional 'sonda' que evalúe la calidad de los distintos canales y gestione el cambio de canal automáticamente de forma transparente para el usuario que percibe una comunicación estable y fiable. Este aspecto es una demanda importante de las FF.AA. con objeto de mantener su nivel de operatividad independientemente del grado de experiencia del usuario.

- Nuevas capacidades de conectividad IP basada en la extensión de la actual implementación de la STANAG 5066 v1.2 a la v2 (cliente IP, Ethernet, y otros). Tanto desde el punto de vista de la funcionalidad como del de la carga de trabajo, el cliente IP se considera el desarrollo fundamental de esta propuesta: permitirá integrar de forma transparente redes basadas en IP en la red HF. Si bien este desarrollo es válido y aplicable al caso de banda estrecha, la expansión en banda va a permitir que además sean viables un mayor número de aplicaciones.



Figura 1. Sistema HFDVL de banda estrecha (HFDVL NB)

2. Fundamentos del módem de datos HFDVL

El módem de datos es una extensión del módem de voz compartiendo con éste un cierto número de funcionalidades aunque obviamente incluye importantes novedades para optimizar de forma específica la transmisión de datos. Este aspecto es muy importante porque hemos desarrollado un nuevo módem a partir de los conceptos de la Radio Definida por Software de manera que las formas de onda están compuestas por módulos que pueden ser reaprovechados en una gran medida. Se respeta por tanto la estructura de trama OFDM (Orthogonal Frequency Division Modulation) con 73 portadoras en una canalización estándar de 2,7kHz cumpliendo con la normal MIL-STD-188-141C. De éstas, 60 son de datos con pilotos intercalados de forma uniforme para la estima e interpolación de canal incluyéndose ahora constelaciones 16 y 64-QAM además de la 4-QAM ya existente.

El principal aspecto diferenciador respecto a la voz digital es que la transmisión de datos no requiere interactividad por lo que se puede asumir latencia de varios segundos. Este aspecto es fundamental en el diseño ya que posibilita el uso de códigos de protección de errores muy potentes y también el uso de entrelazados de más memoria que permite la distribución más uniforme de los errores en lugar de su aparición en ráfagas (en los intervalos en los que el canal de transmisión sea adverso). De esta forma se mejoran las prestaciones de los codificadores sustancialmente. Por otro lado, también se requieren tasas de error mucho más bajas que la transmisión de voz para tener una calidad satisfactoria por lo que la selección del codificador de canal es esencial. Hoy en dia, los códigos que ofrecen las mejores prestaciones son los turbo códigos y los códigos LDPC (Low Density Parity Check). Entre estos dos tipos de códigos, los códigos LDPC irregulares son los mejores en términos de BER (Tasa de Error de Bit), por lo que se han elegido para el módem de datos. En cuanto a los turbo códigos, las prestaciones son similares a LDPC tal como se indica en la literatura especializada pero supone una mayor complejidad en cuanto a su implementación por lo que han sido descartados en este escenario. La siguiente tabla muestra los distintos modos de funcionamiento del módem en modo datos, con una velocidad mínima de 1800 bps y la máxima de 8640 bps:

Codificación	Tasa de codificación	Velocidad neta de transmisión [bits/seg]		
		QPSK	16QAM	64QAM
LDPC	**1/2**	**1800**	**3600**	**5400**
	4/5	**2880**	**5760**	**8640**

Tabla 1: Velocidades de transmisión netas del módem de datos HFDVL

3. Diversidad multiantena. Fundamentos y pruebas en el entorno civil

En esta sección vamos a describir el estudio del sistema en recepción con múltiples antenas en el cual se combinan las señales de las distintas antenas en las posibles configuraciones. La figura siguiente muestra el esquema simplificado del proceso de combinación basado en el algoritmo MRC (Maximum Ratio Combining), ponderados por la relación señal a ruido (SNR) de cada rama.

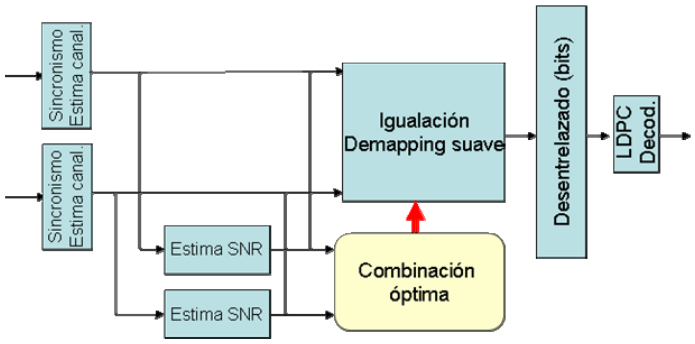


Figura 2. Procesado conjunto para extraer la diversidad espacial

Representado esquemáticamente para dos antenas receptoras, en este proceso es necesario sincronizar y estimar cada uno de los canales incluyendo una estima de la SNR. Posteriormente, se combinan cada portadora de ambos sistemas OFDM según una versión del criterio MRC al que hemos añadido un factor asociado a la SNR para dar más peso a la medida más favorable. Posteriormente se procede a realizar la igualación y el cálculo de las LLR (LogLikelihood Ratios – Cocientes de Verosimilitud en versión Logarítmica) como elemento esencial del decodificador LDPC que evalúa la confianza en la estima de cada uno de los bits, oportunamente desentrelazados para romper las ráfagas de errores y así optimizar las prestaciones del decodificador.

Hemos de destacar que además de nuestras antenas en las respectivas universidades, durante el periodo 2006-2012 contamos con la colaboración del Ministerio de Industria que nos permitió instalar un par de antenas activas en la Estación de Vigilancia Espectral de El Casar (Guadalajara).

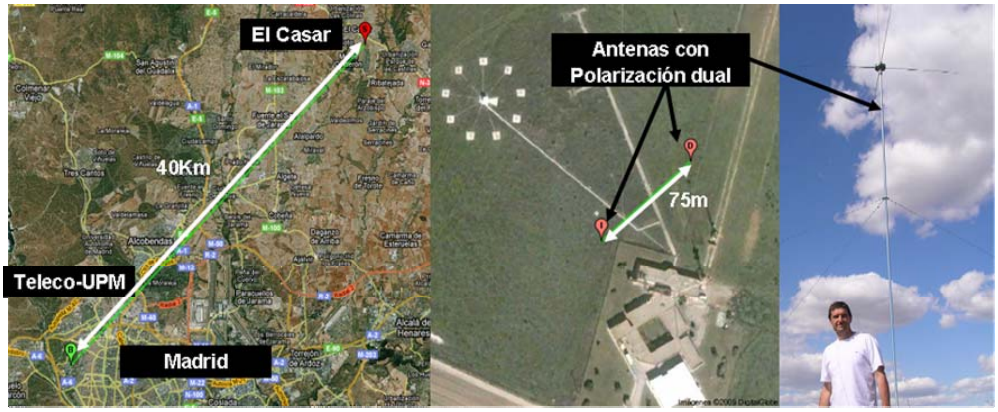


Figura 3. Instalación de antenas en la península

Inicialmente el diseño se realizó en un simulador que nos permitió seleccionar la opción más adecuada dentro de las variantes de combinación y adquirir gran experiencia en cuanto a detalles de implementación. Por otro lado, hemos de destacar la campaña de medidas reales que se ha realizado emitiendo un conjunto diferente de señales desde la estación en la ULPGC y recibiendo en las instalaciones disponibles en la UPM y El Casar, ambas estaciones receptores separadas físicamente unos 40Km. La estación de la UPM tiene como antena receptora una antena Yagi, por tanto pasiva y direccional, mientras que en El Casar existen dos conjuntos de antenas separados 75 m cada uno de ellos con antenas activas omnidireccionales y con polarización horizontal y vertical.

Los resultados que se muestran en la figura siguiente son los referentes a la combinación de las 4 antenas de El Casar (combinación de orden 4) y algoritmo MRC. En esta figura se representa la BER de la señal combinada frente a la de cada una de las antenas. Si el proceso de combinación tiene ganancia, entonces la BER del sistema SIMO (Single Input – Multiple Output) debe ser inferior a la del sistema SISO (Single Input – Multiple Output) de referencia y por tanto debe estar representada en la parte inferior de la diagonal. La distancia entre la diagonal y la curva de BER nos dará el grado de ganancia que estamos obteniendo en cada antena.

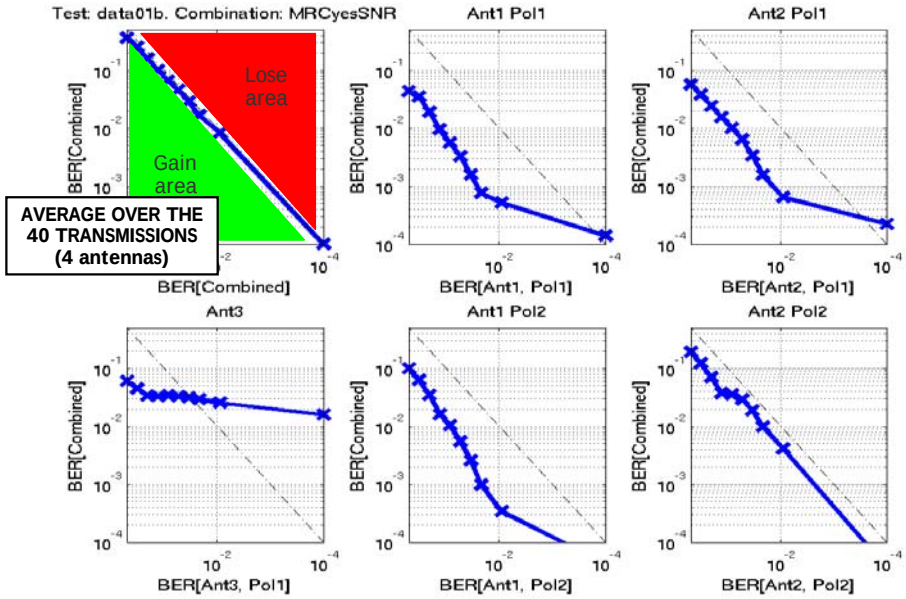


Figura 4. BER SIMO media versus BER SISO media en cada antena para una señal real 4QAM-OFDM y combinación MRC con ponderación de SNR en las 4 antenas de El Casar

En este test se observa cómo el comportamiento del canal muestra aspectos diferenciales entre localizaciones, entre antenas y entre polarizaciones. Se observa igualmente una mayor correlación de comportamientos entre ubicaciones de diferentes antenas (con la misma polarización) que entre polarizaciones tanto de la misma antena como de diferente ubicación. En el caso práctico de estar limitados a sólo dos receptores en los proceso de combinación, **los resultados obtenidos** de correlaciones entre diferente e iguales polarizaciones **nos indican que las estrategias de combinación deben ir enfocadas a realizar combinación en polarización.** Este aspecto es clave porque demuestra que para obtener importantes ganancias no es imprescindible tener grandes campos de antenas sino antenas con distintas polarizaciones.

4. Diversidad multiantena. Pruebas en el entorno de Defensa

El objetivo de este estudio fue validar el modo de transmisión de datos de forma objetiva, realizando las pruebas en instalaciones del Ministerio de Defensa y en términos comparativos con los módems más habituales usados por nuestras F.F.A.A. El escenario escogido contempla una única estación transmisora ubicada en ***Almatriche*** (Gran Canaria) perteneciente a la Armada y varias estaciones receptoras en la península: ***VIGÍA*** (Madrid) y ***JMOVA*** (Zaragoza) del Ejército del Aire y ***Bermeja*** (Madrid) de la Armada. Las pruebas se realizaron a lo largo del mes de julio de 2011.

Con el objeto de establecer una comparativa de funcionamiento en términos objetivos con una forma de onda comercial hemos seleccionado la norma ***STANAG 4285*** por su amplia difusión en nuestros ejércitos así como la ***STANAG 4539*** porque es previsible que también se use de forma habitual en un futuro próximo. La tabla siguiente resume las características de las distintas formas de onda:

MÓDEM	FORMA DE ONDA	VELOCIDAD (bps)
Harris RF-5710/RF-5710A	4285-C, entrelazado largo	1200
Harris RF-5710/RF-5710A	4285-C, entrelazado largo	2400
Harris RF-5710A	4539, entrelazado medio	3200
Harris RF-5710A	4539, entrelazado medio	4800
HFDVL	4QAM, entrelazado largo, LDPC ½	1800
HFDVL	16QAM, entrelazado largo, LDPC ½	3600
HFDVL	64QAM, entrelazado largo, LDPC ½	5400

Tabla 2. Formas de onda usadas en las pruebas

Hemos de mencionar que los resultados aquí mostrados recogen las prestaciones medias en distintos emplazamientos de Defensa y en días distintos.

4.1. Descripción de los escenarios

Los siguientes diagramas de bloques representan de forma esquemática los despliegues realizados: por un lado la configuración que hemos denominado STANAG y por otro, la de nuestro sistema.
STANAG: configuración estándar de transmisión de datos con el módem comercial utilizado en el emplazamiento con las formas de onda STANAG 4285 y STANAG 4539.

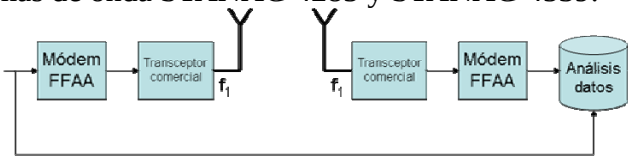


Figura 5. *Esquema de pruebas del módem comercial*

HFDVL: configuración HFDVL con un único canal y dos antenas receptoras (1x2).

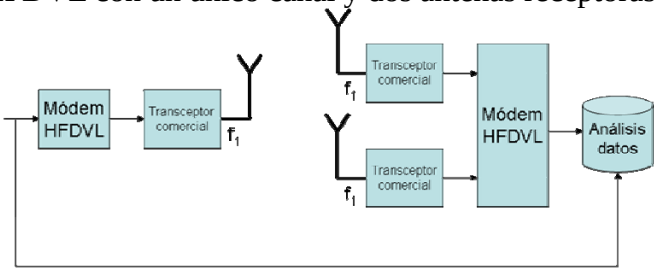


Figura 6. *Esquema de pruebas del sistema HFDVL*

Puede ya observarse que una notable diferencia del sistema HFDVL es la **posibilidad** de procesar simultáneamente la señal recibida por varias antenas y combinarlas de forma óptima. Como fichero de prueba se ha seleccionado una imagen sin ningún tipo de compresión que tiene un tamaño de 27225 bytes lo que equivale a 217800 bits.

La caracterización de las prestaciones de los sistemas se ha realizado teniendo en cuenta que el objetivo de este estudio es aportar criterios prácticos que permitan valorar las prestaciones de la forma más intuitiva posible. Para ello se han considerado dos medidas fundamentales:

- ***Disponibilidad:*** son diagramas que presentan el porcentaje de tiempo que se puede garantizar una cierta probabilidad de error de bit.
- ***Velocidades reales:*** son diagramas que representan las velocidades reales de transmisión frente a las ***velocidades nominales*** seleccionadas por el operador de radio. Esta diferencia entre nominal y real es debida al hecho de que hay una cierta probabilidad de que las tramas de bits sean incorrectas y por tanto sea necesaria su retransmisión.

4.2. Análisis de disponibilidad

Con objeto de sacar algunas conclusiones fundamentales, hemos recogido en una única gráfica en diagrama de barras el porcentaje de tiempo que se puede garantizar una tasa de error de 10^{-3}.

Ordenadas por velocidades de transmisión nominales, puede observarse que las formas de onda comerciales tienen un comportamiento satisfactorio para velocidades bajas (4285C-1200 bps) y que sin embargo pierde más de 20 puntos de disponibilidad si se duplica la velocidad (4285C-2400 bps). La forma de onda 4539 presenta una cierta ganancia de prestaciones puesto que su modo a 3200 bps funciona de manera parecida a la 4285 a 2400 bps. Sin embargo, el modo de alta velocidad a 4800 bps se demuestra muy poco robusto con una disponibilidad en torno al 20% lo que indica que sólo puede ser usado en condiciones de propagación muy benignas.

El sistema HFDVL muestra un comportamiento muy robusto para su modo más lento (1800 bps) con una disponibilidad superior al 90%. Adicionalmente, lo que es especialmente notable es que estas prestaciones se mantienen en el modo a 3600 bps también con una disponibilidad superior al 90%. El modo más rápido a 5400 bps también es bastante robusto pudiendo ser usado en torno al 65 % del tiempo. Véase la Figura 7 (izda).

Por lo tanto, podemos concluir que la ganancia de disponibilidad de cualquiera de los modos del HFDVL es significativamente mayor que en los sistemas comerciales, al menos en las condiciones en las que se han realizado las pruebas. Ello indica que podemos hablar de una siguiente generación de sistemas con velocidades nominales altas (3600) que pueden operar en un porcentaje alto de canales (90%). En este caso hemos dispuesto sólo de dos antenas, por lo que es previsible que estas prestaciones sean mejorables si se utilizara un mayor número de ellas.

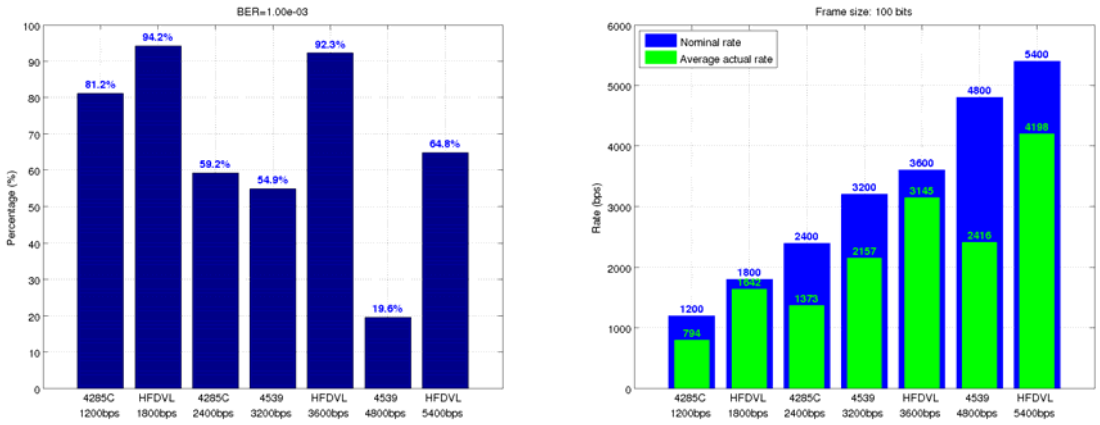


Figura 7. *(Izda). Disponibilidad: HFDVL y formas de onda 4285-C y 4539 en BER=10^{-3} . (Dcha) Velocidades nominal y real de transmisión por tramas (100 bits)*

4.3. Análisis de la velocidad real de transmisión

Ya hemos observado que los diagramas de disponibilidad dan información en cuanto a la tasa de error de bit. Esta información resulta de extraordinaria importancia en modos de transmisión tipo radiodifusión (*broadcasting*) en los cuales hay una transmisión unidireccional y la calidad del sistema se mide en la posibilidad de interpretar el mensaje o no.

Sin embargo, en muchas otras ocasiones, no es admisible la pérdida de datos por lo que se exige un conjunto de retransmisiones hasta que se recibe el fichero completo correctamente. Para ello, la información se encapsula en bloques o tramas de cierto tamaño y se incorpora un mecanismo de verificación de trama correcta y un sistema de retransmisiones recursivo tipo ***ARQ - Automatic Repeat reQuest***. En este caso, la velocidad de transmisión seleccionada por el operario (la denominaremos *velocidad nominal*) queda en un segundo plano puesto que típicamente el mecanismo ARQ selecciona la velocidad más adecuada y adicionalmente, la velocidad real de transmisión viene determinada por la probabilidad de tener que repetir una trama.

En este estudio no se han implementado protocolos tipo ARQ sino que se ha realizado un conjunto de pruebas que nos permitan visualizar en cuánto se reduce la velocidad nominal bajo unas hipótesis de trabajo que simplifican el proceso y son al mismo tiempo próximas a la realidad:

- Se transmite en una velocidad fija. Esta condición es la habitual incluso para ficheros de gran tamaño porque la dinámica de la ionosfera que afecta a esta decisión se mantiene estática durante largos periodos de tiempo. No consideraremos cuál sería la velocidad seleccionada por el protocolo ARQ sino que presentamos resultados para todas ellas.
- No se han incluido cabeceras ni información de control en las tramas por lo que las velocidades reales estarán algo por debajo de lo aquí estipulado.
- No se ha implementado el mecanismo de retransmisiones que indudablemente supone un tiempo adicional tanto para la transmisión como por el posible fallo de recepción de esta confirmación.

Por lo tanto, bajo la premisa de que este estudio constituye un análisis simplificado en condiciones ideales, podemos interpretar los resultados aquí presentados como una cota superior. Expliquemos brevemente el principio de funcionamiento: la señal a transmitir se divide en tramas de tamaño fijo y se considera que una trama se ha recibido de manera correcta solamente si no hay ningún bit erróneo en recepción. La longitud óptima de la trama es un parámetro de diseño que depende la probabilidad de error de bit esperada por lo que en nuestro estudio hemos considerado un rango de valores (100, 500, 1000) que cubre un conjunto de escenarios realistas. Las tramas no correctas deben ser retransmitidas repetidamente hasta su correcta recepción. El tiempo necesario para la recepción correcta de todos los bits, nos permite evaluar la ***velocidad real*** de transmisión.

Para facilitar la comparación entre las distintas formas de onda, en la Figura 7 (dcha) se muestran todas las formas de onda analizadas (ordenadas por orden creciente de velocidad nominal), con la velocidad real media para un tamaño de bloque de 100 bits. Se comprueba cómo las dos velocidades reales medias mayores se obtienen con la forma de onda del HFDVL a 3600 y 5400 bps. A éstas les sigue la forma de onda 4539 a 3200 y 4800 bps, con velocidades medias muy parecidas entre sí, pero bastante alejadas de sus valores nominales. Posteriormente se encuentra la del HFDVL a 1800 bps, con una velocidad real media muy cercana a la nominal, y por último las formas de onda 4285-C a 1200 y 2400 bps.

5. Conclusiones

Los estudios y pruebas reales realizadas nos permiten confirmar que nuestro sistema puede ser de gran utilidad a nuestras FFAA como una ***Forma de Onda Nacional***, de uso restringido y exclusivo y que puede mejorar notablemente la percepción de las comunicaciones HF. Especialmente se demuestra el enorme potencial que tiene la explotación de la diversidad espacial y de polarización.

Agradecimientos

Queremos agradecer a las Fuerzas Armadas Españolas de los tres ejércitos su apoyo incondicional en España que nos ha permitido hacer ensayos muy valiosos desde las propias instalaciones de Defensa. También hemos de destacar su papel en el extranjero durante las pruebas realizadas en el marco del CWID 2009 que incluyó una breve estancia en la base de Manás en Kirguistán durante la cual nos hicieron sentir como si estuviéramos en casa. Finalmente, mencionar de forma expresa a la Dirección General de Armamento y Material y al Instituto Tecnológico ‘La Marañosa’ por su apoyo dentro del marco del ***Programa Coincidente*** que han hecho posible que el sistema ***HFDVL*** sea a día de hoy una realidad.

Referencias

[1] S. Zazo, I. A. Pérez Álvarez. ***Romper las barreras del retardo en HF: una idea hecha realidad*** Subdirección General de Tecnologías y Centros. Boletín de Observación Tecnológica en Defensa, Vol9, No.18, pp 43 - 45, 2008.

[2] I. A. Pérez Álvarez, S. Zazo, Cte. J. Bermejo Higuera. ***Un módem español de transmisión de datos de alta velocidad en HF***. Subdirección General de Tecnologías y Centros. Boletín de Observación Tecnológica en Defensa, Vol9, No.18, páginas 24 - 30, 3er trimestre 2014.

Sistema hardware de cifrado caótico de señales de voz para comunicaciones seguras

Sánchez Azqueta, Carlos [1,*], Aznar Tabuenca, Francisco [1,2], García Bosque, Miguel [1], Gimeno Gasca, Cecilia [1] y Celma Pueyo, Santiago [1]

[1] Grupo de Diseño Electrónico. Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones. Universidad de Zaragoza.

[2] Centro Universitario de la Defensa. Universidad de Zaragoza.

* Autor responsable del trabajo; csanaz@unizar.es

Abstract: La transmisión de mensajes con información sensible a través de redes accesibles plantea enormes retos de privacidad en aplicaciones de Defensa. Por un lado, la interceptación de las señales puede permitir identificar la posición de las unidades o puestos de mando mediante triangulación, lo que en sistemas modernos se resuelve mediante la técnica de salto en frecuencia; por otro lado, existe la posibilidad de que la señal interceptada sea descifrada, lo que se combate, además de mediante la técnica de salto en frecuencia, con técnicas de cifrado específicas suministradas por los fabricantes de los sistemas de radio. Para aumentar la seguridad de las comunicaciones en Defensa se plantea la posibilidad de combinar distintas técnicas de cifrado. Entre ellas, las basadas en señales caóticas atraen gran interés por las propiedades de los sistemas caóticos (alta sensibilidad a las condiciones iniciales, ergodicidad, comportamiento aleatorio o baja periodicidad). Este trabajo desarrolla un sistema digital de cifrado caótico de señales de voz basado en un generador caótico. La señal de voz es digitalizada y mezclada con una señal caótica obtenida a partir del generador caótico, que es transmitida y descifrada en el receptor mediante la sincronización de otro generador caótico idéntico.

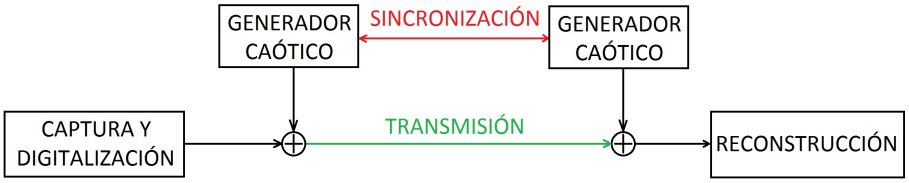
Keywords: Cifrado caótico; comunicaciones seguras; sincronización.

---

1. Introducción

Las aplicaciones de Defensa utilizan sistemas de transmisión de señales de voz a través de redes abiertas de radio ya que por sus características inalámbricas y de largo alcance son idóneos para coordinar

Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones digital basado en caos: la señal que actúa como texto plano es combinada con la señal generada por un generador caótico; para el proceso de recepción es necesario contar con un generador caótico idéntico sincronizado con el del emisor.



unidades móviles. Sin embargo, que dichas comunicaciones sean inalámbricas y de largo alcance se traduce en una elevada vulnerabilidad ya que las señales pueden ser recibidas de forma anónima desde múltiples localizaciones, lo que plantea dos problemas de seguridad principales [1]. Por un lado, la interceptación de la señal permite identificar la posición de las unidades o puestos de mando mediante triangulación, lo que en sistemas actuales se resuelve mediante la técnica de salto en frecuencia (FHSS: *frequency hopping spread spectrum*). Por otro lado, es posible que la señal interceptada sea descifrada y por tanto la información que se transmite quede comprometida; además de mediante FHSS, esto se combate con técnicas de cifrado específicas suministradas por los fabricantes de los sistemas de radio.

De las diversas técnicas de cifrado disponibles, las basadas en señales caóticas se postulan como candidatas idóneas debido a sus propiedades inherentes de alta sensibilidad a las condiciones iniciales, ergodicidad, comportamiento aleatorio o baja periodicidad, que facilitan conseguir las propiedades criptográficas de difusión, confusión y desorden. Ejemplos recientes de sistemas de cifrado basados en caos son [2], [3], [4] o [5]. El uso de técnicas caóticas para la encriptación de señales es compatible con técnicas digitales como la inversión o el *scrambling*, lo que redunda en una mayor seguridad.

Un sistema de comunicaciones basado en un generador caótico tiene una estructura general como la mostrada en la Fig. 1. Esencialmente se basa en un generador caótico en el emisor, cuya señal generada se mezcla con el mensaje que se desea transmitir, y en otro generador caótico idéntico en el receptor, sincronizado con el del emisor para dar la misma señal caótica. Invirtiendo el proceso de mezcla en el receptor es posible reconstruir la señal original.

Existen implementaciones de sistemas de cifrado caótico usando técnicas puramente analógicas; sin embargo, aunque pueden ofrecer un moderado grado de protección, sobre todo frente a ataques por estimación de parámetros, dichos sistemas resultan vulnerables a ataques por aplicaciones de retorno o *non-linear forecasting* debido a que la sincronización entre generadores caóticos analógicos implica una elevada regularidad en el espacio de fases.

Para aumentar la seguridad de las comunicaciones en sistemas con cifrado caótico es necesario recurrir a implementaciones digitales. Como ventaja añadida, su integración en los sistemas actuales de comunicaciones resulta sencilla y es compatible con la presencia de técnicas de *scrambling*, implementadas para limitar el impacto de las secuencias de bits idénticos consecutivos (CID: *consecutive identical bits*) [2]. Una solución popular para la implementación hardware de sistemas digitales de comunicaciones con cifrado caótico se basa en el microprocesador Arduino, ya que cuenta con módulos

específicos de micrófono para digitalizar la señal y permite realizar su procesado con un coste moderado. Realizaciones de dichos sistemas se pueden encontrar en [6] o [7].

En este trabajo se desarrolla un sistema de cifrado caótico de señales de voz mediante un generador caótico basado en la aplicación logística para su implementación hardware en Arduino. Para dotar de mayor seguridad al sistema, la señal caótica es mezclada con una señal pseudoaleatoria obtenida a partir de un registro de desplazamiento con realimentación lineal (LFSR: *linear feedback shift register*). En el receptor, la señal se recupera mediante la sincronización de otro generador caótico idéntico al del emisor. La viabilidad de este sistema de cifrado ha sido comprobada mediante las pruebas estadísticas de aleatoriedad NIST, propuestas por el Instituto Nacional de Estándares y Tencología del Departamento de Comercio de los Estados Unidos. El artículo se estructura de la siguiente manera: la Sección 1 es la introducción; en la Sección 2 se presentan y analizan las aplicaciones logísticas; en la Sección 3 se detalla la implementación del sistema de comunicaciones, cuyos resultados se presentan en la Sección 4. Finalmente, las conclusiones principales del trabajo se exponen en la Sección 5.

2. La aplicación logística

La aplicación logística es una aplicación matemática popularizada por el biólogo Robert May en 1976 en un artículo sobre la dinámica de poblaciones [8]. Matemáticamente es una aplicación iterativa cuya expresión es la siguiente:

$$x_{n+1} = r x_n (1 - x_n) \tag{1}$$

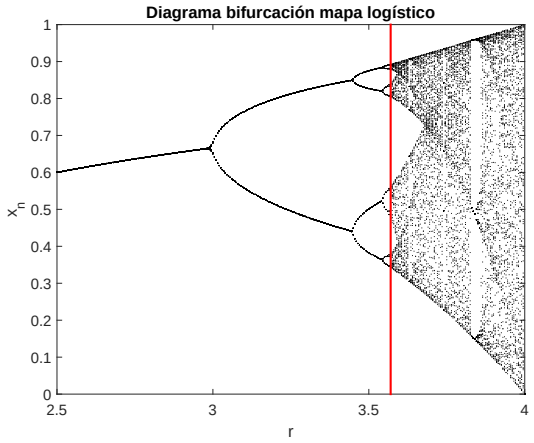
donde r es la llamada *tasa de crecimiento*, que si tiene tiene un valor $r \in (0, 4]$ hace que el intervalo $[0, 1]$ se proyecte sobre sí mismo. Debido a la importancia de r en la dinámica de la aplicación logística es conveniente estudiarla con más detenimiento.

2.1. Dependencia de la dinámica con la tasa de crecimiento

Este apartado estudia cómo evoluciona la dinámica de la aplicación logística en función del valor de la tasa de crecimiento r. Para ello, se analiza qué valor alcanza la iteración de la aplicación logística sobre valores iniciales x_0 en el intervalo $[0, 1]$.

- Si $0 < r \leq 1$ la secuencia converge a 0 para cualquier x_0.
- Si $1 < r \leq 2$ la secuencia converge rápidamente al valor $\frac{r-1}{r}$ para cualquier x_0.
- Si $2 < r \leq 3$ la secuencia converge a $\frac{r-1}{r}$ para cualquier x_0 pero más lentamente.
- Si $3 < r \leq 1 + \sqrt{6} \simeq 3.45$ la secuencia oscila entre dos valores, que dependen de r, para casi cualquier x_0.
- Si $3.45 < r < 3.54$ la secuencia oscila entre cuatro valores para casi cualquier x_0.
- Si $r > 3.54$ la secuencia oscila entre 8, 16, 32... valores a medida que aumenta el valor de r, para casi cualquier x_0. Estos cambios reciben el nombre de *bifurcaciones de doble periodo*.

Figura 2. Diagrama de bifurcación de la aplicación logística. El valor $r = 3.57$ separa las regiones sin comportamiento caótico ($r < 3.57$) de las que sí presentan caos ($r > 3.57$).



2.2. Aparición de caos

Las secuencias generadas por la aplicación logística, llamadas órbitas, convergen a un único valor fijo para $r < 3$ y a partir de $r = 3$ se vuelven oscilantes, variando entre un número de valores que aumenta a medida que lo hace r, lo que se puede observar de forma muy clara en el *diagrama de bifurcación* (Figura 2), que consiste en una representación del valor hacia el que convergen las órbitas en función de r. Otra propiedad relevante del diagrama de bifurcación de la aplicación logística es que es *auto-similar*; es decir, si es sometido a un cambio de escala, el diagrama resultante tiene la misma estructura que el original. La propiedad de auto-similaridad se mide con la dimensión fractal (o Haussdorf), que en el caso de la aplicación logística es igual a 0.538.

La presencia de bifurcaciones de doble periodo y auto-similaridad son indicativos de comportamiento caótico en un sistema. Sin embargo, de forma rigurosa, se dice que un sistema cuya evolución se puede describir mediante una función $f : I \subset \mathbf{R} \to I$ tiene un comportamiento caótico si:

- Tiene sensibilidad a las condiciones iniciales: una pequeña variación de la condición inicial x_0 produce variaciones grandes en las órbitas.
- El conjunto de sus puntos periódicos es denso en I.
- Es topológicamente transitivo: para cualesquiera dos $J, K \subset I$ siempre existen puntos de J cuyas órbitas tienen puntos en K.

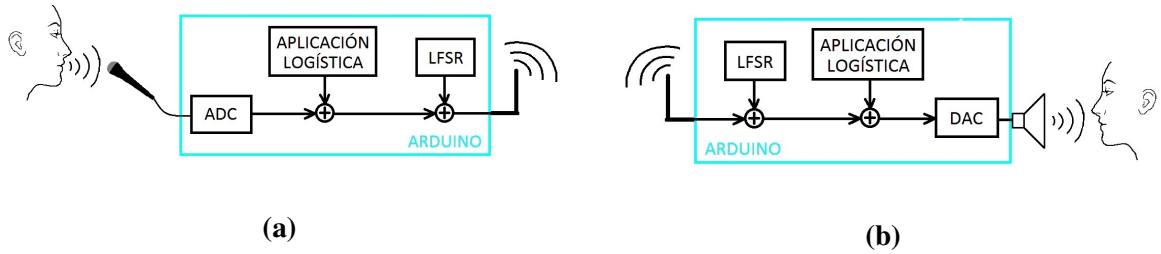
La segunda y tercera propiedad son ciertas para la aplicación logística, lo que se puede demostrar que implica que la primera también lo es. Sin embargo, en sistemas caóticos es habitual utilizar los exponentes de Lyapunov como medida de la sensibilidad a condiciones iniciales del sistema.

En efecto, si consideramos un sistema dinámico unidimensional $f : \mathbf{R} \to \mathbf{R}$ tal que $x_{n+1} = f(x_n)$, como es la aplicación logística, y calculamos el punto de la órbita correspondiente a N iteraciones sobre dos condiciones iniciales arbitrariamente próximas x_0 y $x_0 + \epsilon$, su distancia se puede escribir como:

$$|f_N(x_0 + \epsilon) - f_N(x_0)| = \epsilon e^{N\lambda(x_0)} \tag{2}$$

con N suficientemente grande para un cierto $\lambda(x_0)$, que es el exponente de Lyapunov del sistema. Así, un sistema unidimensional presenta sensibilidad a las condiciones iniciales si su exponente de Lyapunov

Figura 3. (a) Diagrama de cifrado de la señal en el emisor, con y sin LFSR y (b) diagrama de descifrado de la señal en el receptor, con y sin LFSR.



(a) **(b)**

es mayor que 0. En la aplicación logística el exponente de Lyapunov es negativo para $r < 3.569945$ mientras que su comportamiento es más complicado a partir de ese valor, adoptando mayoritariamente valores positivos. Por este motivo se establece $r = 3.57$ como la frontera entre el comportamiento no caótico ($r < 3.57$) y caótico ($r > 3.57$). Hay que tener en cuenta que existen valores de r mayores que 3.57 para los que la aplicación logística no muestra comportamiento caótico, llamadas ventanas periódicas, que hay que evitar para la generación de señales caóticas. En la Figura 2 se separa con una línea roja vertical las regiones caóticas y no caóticas.

3. Implementación del sistema hardware de cifrado caótico

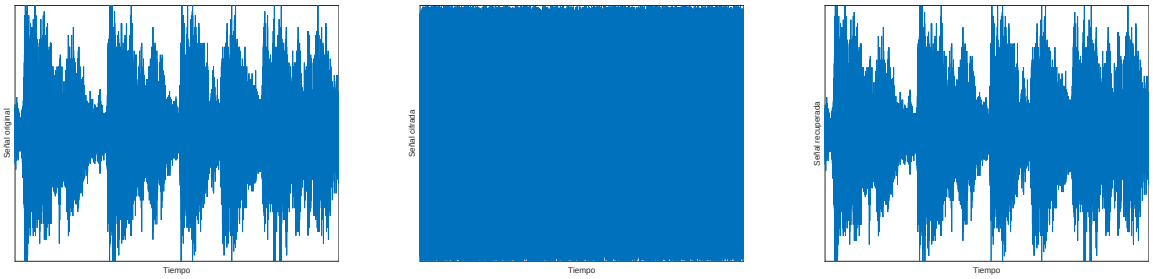
La implementación de un sistema de cifrado de señales basado en caos necesita contar con un sistema de digitalización de la señal, el generador caótico y un sistema de mezclado que dé como resultado la señal cifrada. Por su parte, el receptor debe contar con un generador caótico idéntico al del emisor y sincronizado con él y un sistema de procesado de la señal digital para convertirla de nuevo en una señal de voz. Dicho sistema está representado en la Figura 3.

En el emisor (Figura 3-a), una primera etapa se encarga de muestrear la señal de voz a unas 8000 muestras por segundo para evitar sibilancia para posteriormente digitalizarla mediante un convertidor A/D de 8 bits, dando el texto plano. En una segunda etapa, el texto plano se mezcla con la secuencia caótica generada por una aplicación logística mediante una puerta XOR. Finalmente, una tercera etapa se implementa con la intención de ofrecer un mayor grado de aleatoriedad en el texto cifrado, que consiste en el mezclado, a través de una puerta XOR, de la señal cifrada con la secuencia caótica con una señal pseudo-aleatoria generada a partir de un LFSR. De esta manera, la combinación de la señal puramente aleatoria generada con la aplicación logística y la señal pseudo-aleatoria generada mediante el LFSR permite mejorar las propiedades globales de aleatoriedad del sistema, lo que se traduce en una mejora de la seguridad.

En la etapa de recepción (Figura 3-b) dicho proceso se revierte. De esta manera, en primer lugar se produce la mezcla la señal recibida con la señal producida por un LFSR sincronizado con el del emisor y posteriormente se mezcla la señal resultante con la señal generada por la aplicación logística.

El resultado de este proceso se ilustra en la Figura 4, en la que se representa el texto plano digitalizado (Figura 4-a), el texto cifrado en formato binario (Figura 4-b), y finalmente el la señal recuperada en el receptor (Figura 4-c).

Figura 4. Señales en el sistema de comunicaciones: (a) señal original, (b) señal cifrada con la secuencia del generador caótico y el LFSR y (c) señal recuperada.



(a) **(b)** **(c)**

4. Resultados

En criptografía es necesario contar con valores numéricos que indiquen la capacidad de enmascaramiento del sistema. De las muchas pruebas estadísticas de aleatoriedad que existen (*die-hard*, *die-harder*, NIST, ENT, TestU01...), se ha sometido a la señal cifrada a las pruebas NIST [9], propuestas por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología del Departamento de Comercio de los Estados Unidos[1]. Dichas pruebas (17 en total) analizan diversas propiedades de la señal cifrada para comprobar su aleatoriedad basado en la hipótesis nula: cada prueba arroja un valor, y si éste es mayor que un determinado nivel de significación estadística, la señal se comporta como aleatoria para esa prueba.

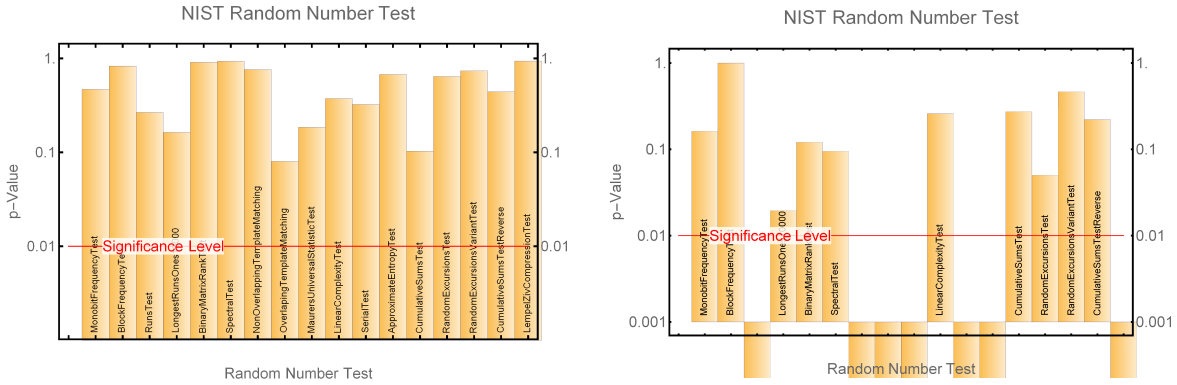
La Figura 5-a muestra los resultados de las pruebas NIST sobre la señal cifrada mediante su mezclado con la combinación de las señales generadas por la aplicación logística y el LFSR. Como se desprende de la figura, todas las 17 pruebas consiguen un resultado por encima del nivel de significación estadística, lo que se puede interpretar como que la señal se comporta como una señal aleatoria para toda la batería de pruebas y por lo tanto, se puede concluir que un receptor no autorizado no va a poder extraer información relevante a partir de ella.

4.1. Cifrado únicamente con aplicación logística

Para evaluar la necesidad de mezclar la señal con la secuencia pesudo-aleatoria generada por el LFSR, la Figura 5-b muestra los resultados de las distintas pruebas NIST llevadas a cabo sobre la señal cifrada únicamente mediante su mezclado con la señal generada por la aplicación logística. Se puede observar que de las 17 pruebas, solamente en 10 de ellas se consigue un resultado por encima del nivel de significación estadística, lo que indica que las 7 pruebas restantes no se superan y por tanto la señal no se comporta como aleatoria para dichas pruebas. La consecuencia es que la señal cifrada presenta ciertas regularidades en su estructura, lo que podría permitir a un receptor no autorizado inferir información a partir de ella.

[1]Se ha usado la implementación de las pruebas NIST de Ilja Gerhardt (http://gerhardt.ch/random.php).

Figura 5. Resultados del análisis NIST sobre la señal cifrada (a) con la señal de la aplicación logística y del LFSR y (b) únicamente con la señal de la aplicación logística. La combinación de las dos técnicas de cifrado hace que se superen las pruebas de aleatoriedad.



(a) **(b)**

5. Conclusiones

Este trabajo demuestra la posibilidad de obtener textos cifrados con un elevado grado de aleatoriedad realizando el proceso de cifrado del texto plano con una señal caótica. Además, debido a su naturaleza digital, este proceso de cifrado es compatible con otros procesos de aleatorización complementarios de la señal como puedan ser el *scrambling* en sus diversas variantes (*cat map*, *baker map* o transformación afín entre otros) o la mezcla con otras señales con diversos grados de aleatoriedad obtenidas, por ejemplo, de otros sistemas caóticos, o de generadores pseudo-aleatorios.

En el caso reportado en este trabajo, la secuencia caótica ha sido implementada mediante una aplicación logística. El cifrado de la señal original únicamente usando la señal caótica, a pesar de lograr cierto grado de aleatoriedad, no es capaz de pasar las pruebas estadísticas de aleatoriedad NIST, lo que indica posibles problemas de seguridad a la hora de transmitir mensajes usando dicha técnica.

Sin embargo, si la secuencia caótica obtenida mediante la aplicación logística se combina con otra secuencia con altas propiedades aleatorias, como es la señal generada mediante un LFSR realimentado convenientemente, se ha demostrado que es posible obtener una señal cifrada que sí pase las pruebas de aleatoriedad, confirmando la seguridad en las comunicaciones. De esta manera, los resultados de este trabajo abren la puerta a la implementación de sistemas complementarios de cifrado de señales, que requieren una reducida capacidad de cálculo y que por tanto pueden ser implementados en sistemas portátiles de comunicaciones en las que la seguridad sea un aspecto relevante, como pueden ser las comunicaciones en el ámbito de la Defensa.

Finalmente, los resultados presentados suponen una validación por simulación del sistema, cuya implementación hardware mediante el microprocesador Arduino está siendo llevada a cabo actualmente por los autores.

Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda concedida por el Centro Universitario de la Defensa (2013-12) para llevar a cabo esta línea de investigación, así como la colaboración del Grupo de Diseño Electrónico mediante los proyectos del Plan Nacional de I+D+i TEC2011-23211 y TEC2014-52840-R.

Referencias

1. Aznar, F.; Sánchez-Azqueta, C.; Gimeno, C. Encriptación caótica para radiocomunicaciones seguras en defensa. *Actas del II Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad (DESEi+d 2014).* **2014**, 173-180.
2. Ashtiyani, M.; Moradi Birgani P.; Karimi Madahi, S.S. Speech Signal Encryption Using Chaotic Symmetric Cryptography. *Journal of Basic and Applied Scientific Research.* **2012**, 1668-1674.
3. Ahmad, M.; Alam, B.; Farooq, O. Chaos based mixed keystream generation for voice data encryption. *International Journal on Cryptography and Information Security.* **2014**, vol. 2, no. 1, 36-45.
4. Jovic, B.; Unsworth, C.P. Fast synchronisation of chaotic maps for secure chaotic communications. *Electronics Letters.* **2010**, vol. 46, no. 1, 49-50.
5. Sadkhan, S.B.; Al-Sherbaz, A.; Mohammed, R.S. Chaos based cryptography for voice encryption in wireless communication. *International Conference on Electrical, Communication, Computer, Power, and Control Engineering (ICECCPCE 2013).* **2013**, 191-197.
6. Serna, J.; Joshi, A. Visualizing the logistic map with a microcontroller. *Physics Education.* **2011**, vol. 47, no. 6, 736-740.
7. Volos, K.C. Chaotic Random Bit Generator Realized with a Microcontroller. *Journal of Computations and Modelling.* **2013**, vol. 3, no. 4, 115-136.
8. May, R. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature.* **1976**, vol. 261, 459-467.
9. Rukhin, A.; Soto, J.; Nechvatal, J.; Smid, M.; Barker, E.; Leigh, S.; Levenson, M.; Vangel, M.; Banks, D.; Heckert, A.; Dray, J.; Vo, S. A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications; NIST special publication 800-22, Rev. 1-a, NIST; Gaithersburg, Maryland, EE.UU., 2010.

Monitorización de la Temperatura en Camiones Frigoríficos

Lozano Albalate, María Teresa [1,*] **y Trillo-Lado, Raquel** [2]

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza; Mayte.Lozano@unizar.es (M.L.)
[2] Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza; raqueltl@unizar.es (R.T.L.)

* Autor responsable del trabajo; Mayte.Lozano@unizar.es

Abstract: Durante la última década se ha popularizado el hardware libre, dispositivos físicos cuyo acceso es público y replicable a muy bajo precio o gratuitamente, como por ejemplo los módulos Arduino. Esto ha dado lugar a la creación de soluciones innovadoras a muy bajo coste en diversos ámbitos. En este artículo se describe el estudio realizado para determinar si una propuesta basada en módulos Arduino es viable y permite disminuir el riesgo de potenciales indemnizaciones a clientes en una empresa dedicada al transporte terrestre. En concreto, se determinan los costes de instalación y mantenimiento de dispositivos para la transmisión de la temperatura a la que se encuentra la mercancía transportada, a una base de datos central de la empresa. Este dispositivo evitaría el posible extravío de los registros en papel de la temperatura y por tanto potenciales indemnizaciones a clientes. Además, gracias al registro digital se podrían llevar a cabo procesos de minería de datos para tratar de obtener información y/o conocimiento a partir de los registros.

Keywords: sensores; hardware libre; Arduino; logística; redes vehiculares; gestión de datos e información; sistemas de información

---

1. Introducción

Durante la última década se ha popularizado el hardware libre, dispositivos físicos cuyo acceso es público y replicable a muy bajo precio o gratuitamente, como por ejemplo los módulos Arduino. Esto ha dado lugar a la creación de soluciones innovadoras a muy bajo coste en diversos ámbitos.

Por otro lado, el control de temperatura de los remolques resulta indispensable cuando se transporta determinadas mercancías (materia prima que se deteriora a altas o bajas temperaturas, alimentos, etc.). Por ello, el rango de temperatura durante el viaje debe estar controlado y es una de las condiciones incluidas en los contratos entre las empresas del sector transporte y sus clientes. En dichos contratos también se especifican las indemnizaciones en caso de que no se cumplan las condiciones establecidas.

El problema adquiere mayor importancia aún cuando se trata de logística militar, dado que se suelen transportar materiales sensibles a la temperatura y es fundamental que estos lleguen en las condiciones adecuadas a su destino.

En la actualidad, generalmente los remolques y camiones están provistos de dispositivos que registran la temperatura a la que ha estado la carga durante un cierto trayecto o tiempo; p.e., los camiones *Volvo Trucks* emplean *DryPack*, un dispositivo que imprime en un rollo de papel el registro de la temperatura. Estas impresiones deben ser conservadas por los conductores como pruebas de que el producto transportado conserva su calidad original en el momento de la entrega, y entregadas al personal de gestión de la empresa (jefes de tráfico, etc.) para evitar reclamaciones del cliente.

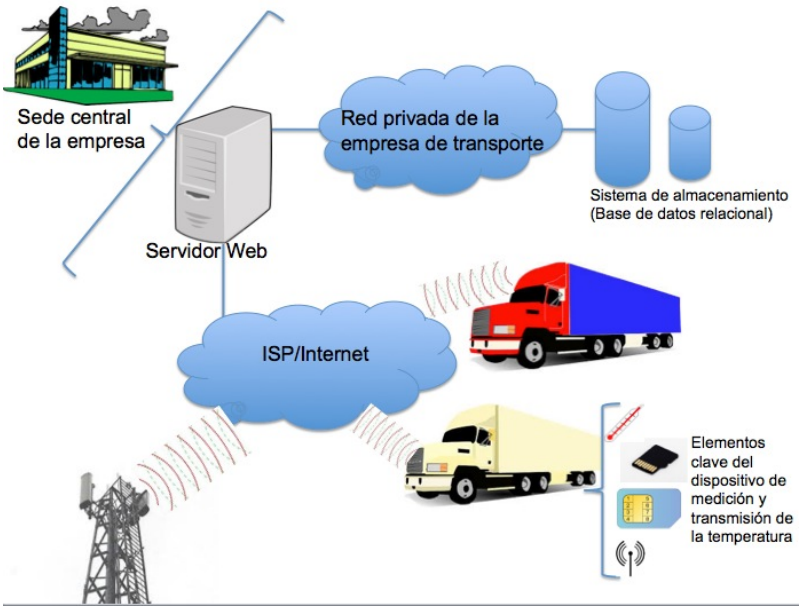
En este artículo, se describe el estudio realizado para determinar si una propuesta basada en módulos Arduino es viable y permite disminuir el riesgo de potenciales indemnizaciones a clientes en una empresa dedicada al transporte terrestre.

2. Registro y envío automático de los datos

Actualmente, a pesar de que el transporte de mercancías se haya realizado de forma óptima, la empresa de transporte recibe numerosas reclamaciones de sus clientes. Además, en un gran porcentaje de los casos, los clientes exigen el registro de temperaturas alcanzadas/mantenidas durante los trayectos y éste no se localiza por diversas causas (olvido de impresión por parte del conductor, extravío de los *tickets* de registro antes de ser almacenados en el sistema de información de la empresa, fallo en el sistema de impresión del camión por carecer éste de papel, etc.).

2.1. Propuesta y estudio de viabilidad

Figure 1. Esquema de la solución propuesta.

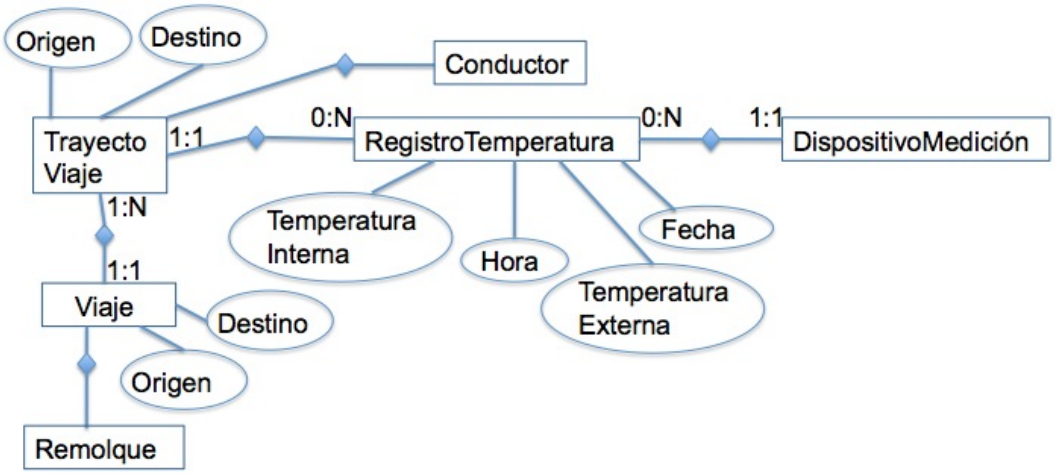


Se plantea la construcción de un dispositivo basado en módulos Arduino que realice el registro y envío automático y directo de la temperatura al sistema de información de la empresa de transporte. De este

modo se descarga al conductor de la responsabilidad de impresión y conservación de los diferentes *tickets* de registro, aumentando la seguridad en carretera y disminuyendo el riesgo de pérdida de impresiones (no disponer de rollo de papel, olvido de las impresiones, etc.). Al mismo tiempo, esto también supone un ahorro en tiempo para el conductor puesto que no necesita detenerse para imprimir y recoger todos los *tickets* de las temperaturas en los diferentes trayectos, pues toda esta información estará disponible en un solo fichero, que incluso se puede enviar telemáticamente al cliente. Además, de este modo el personal encargado de la gestión de tráfico de la empresa puede corroborar, desde la propia central logística, las buenas condiciones a las que está expuesta la mercancía durante el transporte, sin llamar a los conductores de los diferentes camiones, aumentando así aún más el control de calidad, la seguridad en carretera y el ahorro en tiempo de gestión.

En mayor detalle, la solución propuesta consta de un servicio web y el dispositivo de registro y transmisión de la temperatura (véase la Figura 1). El servicio web disponible en un servidor con conexión a Internet en la sede central de la empresa permite el almacenamiento y registro de los datos de temperatura recibidos en una base de datos relacional (véase la Figura 2). El dispositivo basado en módulos Arduino realiza la medición de la temperatura y la almacena en una tarjeta SD cuando se inicia el dispositivo y cuando se produce un cambio de temperatura superior a 1°C. Además, cada cierto intervalo de tiempo y cuando la conexión 3G está disponible, realiza el envío de los nuevos datos al servicio web (véase la Figura 3).

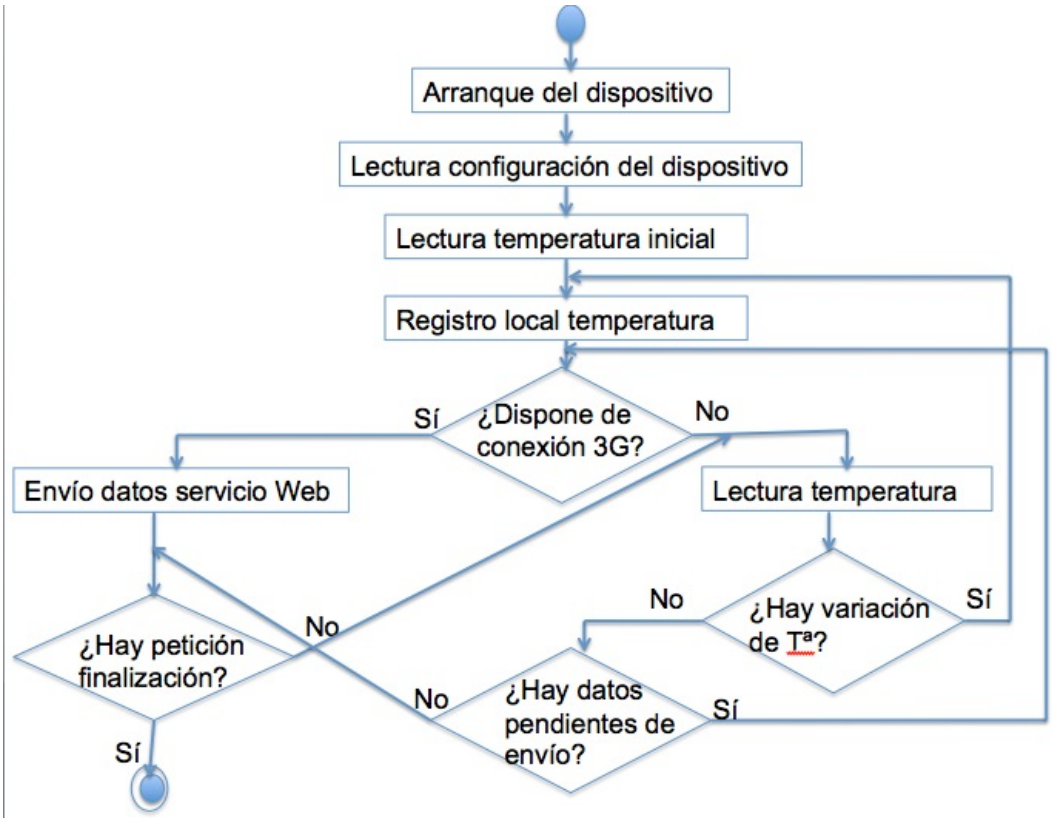
Figure 2. Esquema simplificado del modelo entidad-relación de la base de datos.



2.1.1. Análisis del coste económico

La solución propuesta implica fundamentalmente dos tipos de costes: 1) *coste de diseño e implantación* y 2) *coste de mantenimiento*. El *coste de diseño e implantación* abarca el coste de diseño e implantación del servicio central para realizar el almacenamiento de los registros de la temperatura en la sede central de la empresa y el diseño, desarrollo e instalación del dispositivo de medición y transmisión de la temperatura del interior del remolque frigorífico. El *coste de mantenimiento*, por su parte, incluye el coste mensual del contrato de la línea telefónica 3G para la transmisión de datos, y un coste adicional de un 10% para posibles imprevistos.

Figure 3. Diagrama de flujo del funcionamiento del dispositivo de medición y transmisión de la temperatura en los camiónes.



El coste del diseño e implantación del servicio web con el que interactuarán los diferentes dispositivos de medición y transmisión de temperaturas y también los gestores de tráfico, se establece en unos 600 euros sin considerar el hardware necesario para su implantación (puesto que en la sede central ya se dispone actualmente de servidores que pueden alojar dicho servicio). El coste de diseño y programación del dispositivo a instalar en los camiones se estima en otros 600 euros. En este caso, además del coste de programación es necesario contar con un apartado para la adquisición de hardware, para la construccón del dispositivo. En concreto son necesarios los siguientes componentes:

- 1 placa Arduino Uno Release 3 [1] para el control del dispositivo, cuyo coste aproximado es actualmente de 25,00 euros,
- 1 tarjeta 3G shield para Arduino [2], cuyo coste aproximado es actualmente de 125,00 euros,
- 2 sensores de temperatura LM35 [3], cuyo coste aproximado es actualmente de 3,00 euros,
- 1 batería de litio para la alimentación del dispositivo, cuyo coste aproximado es actualmente de 15,00 euros,
- 1 botón de encendido y apagado ON/OFF, cuyo coste aproximado es actualmente de 0,30 euros,
- Varios cables macho-hembra para las conexiones, cuyo coste aproximado se estima en 2,00 euros,
- Varios cables macho-macho para las conexiones, cuyo coste aproximado se estima en 2,50 euros,

- 1 caja de empalmes, cuyo coste aproximado se estima en 3,5 euros,
- 1 cargador USB de batería para coche, cuyo coste aproximado se estima en 10,00 euros,
- 1 tarjeta SIM, que se proporciona de forma gratuíta al realizar el contrato con la compañía telefónica, y
- 1 tarjeta SD de 16 GB, cuyo coste aproximado es actualmente de 10,00 euros.

Esto supone un *coste de diseño e implantación* total aproximado de 600+600+196,30=1396,30 euros. Hay que destacar, que una gran parte de estos componentes no se prevee que suban de precio, sino que más bien su precio baje con el paso del tiempo. Por otro lado, el coste de mantenimiento se estima que sería inferior a 296,00 euros anuales (13,00 euros mensuales de contrato de línea de datos[1] + 140,00 euros de reserva para imprevistos).

La elaboración e implantación del prototipo presentado supondría por tanto, un coste aproximado de 1700 euros. A priori esta cantidad podría parecer elevada. Sin embargo, si se considera que una indemnización a un cliente por una pérdida de *ticket* supone un coste dentro de un rango de 500 a 2500 euros por viaje (dependiendo de si el viaje es nacional o internacional), y que a lo largo de un mes se pierden aproximadamente de 3 a 4 registros (*tickets*) de temperatura, se considera que la inversión es ínfima con respecto al potencial beneficio/ahorro que proporcionaría.

3. Resultados

Adoptando la solución que en este artículo se plantea, se obtendrían diversos beneficios:

- mayor control de la temperatura,
- automatización del control de la temperatura (sin necesidad de llamar al conductor para preguntar),
- mayor control de la calidad del producto,
- mayor seguridad alimentaria, cuando el producto en cuestión sea alimentario,
- mayor seguridad en la conducción, por liberar al conductor de una tarea por la que debía preocuparse (control de la temperatura) y por recibir menos llamadas mientras está al volante (registro directamente almacenado en la central y accesible para su control),
- mayor satisfacción del cliente por recibir los registros de temperatura siempre que los solicite, ya que permanecen almacenados en la central, sin posibilidad de que no se disponga de la información a causa de la pérdida de un *ticket*, y por recibir los datos digitalizados.

Estos resultados tendrían lugar en un contexto de logística militar, a excepción del último, por su referencia al *cliente*, que en este ámbito no existiría como tal.

[1] Contrato básico con la compañía Simly (más información en: http://www.xatakamovil.com/omvs/simly-el-operador-solo-datos-de-media-markt-con-interesantes-precios-nacionales-y-en-roaming.

4. Trabajos relacionados

Debido a la popularización de Arduino, otros autores y empresas han diseñado e implantado soluciones similares en diversos contextos [4,5]. En el proyecto fin de carrera de Pérez Gutierrez [5], se presenta una solución para realizar el registro de temperatura a bajo coste basada en módulos Arduino. A diferencia de la propuesta planteada en este artículo, el dispositivo diseñado realiza el almacenamiento de los registros de temperatura en el propio mecanismo de medición (concretamente, en una tarjeta SD conectada a la placa Arduino). En el caso que nos atañe, el almacenamiento en la tarjeta SD es temporal, y los datos registrados se transmiten al repositorio central de la empresa (una base de datos) vía http, cada cierto intervalo de tiempo, de modo automático, o tambin bajo demanda de los gestores de tráfico.

La solución propuesta por la empresa aragonesa Libellium [4] se basa en la tecnología Waspmote Plug & Sense! y Meshlium, y permite la monitorización en tiempo real de la temperatura y la posición de cada uno de los vehículos de la flota de camiones de reparto de la Tahona Goyesca, una compañía líder en el sector de la repostería en Aragón. Esta solución es más amplia que la presentada en este artículo (además de la monitorización de la temperatura se monitoriza la localización de la flota), por ello, el coste del dispositivo empleado es superior. En el caso que nos atañe, no es necesario realizar la geolocalización de los camiones, puesto que la empresa dispone de otro mecanismo para controlar este apartado. Por otro lado, en el artículo publicado por Libellium no se trata el coste de mantenimiento de la solución ni la transmisión de datos (temperatura y posicionamiento) inter-estatal (entre los diferentes países europeos).

5. Trabajo futuro

Se prevé realizar un primer prototipo del dispositivo diseñado y presentado en este artículo y su implantación en uno de los camiones de la flota de la empresa de transportes. Una vez implantado se realizará el seguimiento y análisis del funcionamiento y el uso durante un período de dos meses donde tanto conductores como gestores de tráfico informarán de las incidencias que surjan. Además, se entrevistará a los diferentes usuarios (conductores y gestores de tráfico, principalmente) para analizar las ventajas e inconvenientes del prototipo.

6. Conclusiones

En definitiva, se propone un cambio de un bajo coste económico, gracias al cual se verían mejorados múltiples puntos de calidad y satisfacción del cliente de logística, y se aumentaría al mismo tiempo algo tan importante como la seguridad: principalmente, la seguridad alimentaria y la seguridad en carretera.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto CUD2013-11 del CUD de Zaragoza, el proyecto TEC2014-54143-P del Ministerio de Economía y Competitividad y el proyecto PUENTE UZ2014-TEC-04 de la Universidad de Zaragoza.

Referencias

1. Arduino. Arduino Uno. Disponible en https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno, [fecha último acceso: 17 de julio de 2015].
2. Electrical freaks. Entrada correspondiente a la 3G Shield en la Wiki creada por la comunidad Electrical freaks. Disponible en http://www.elecfreaks.com/wiki/index.php?title=3G_shield, [fecha último acceso: 17 de julio de 2015].
3. Texas Instruments. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors, Dallas, Texas, enero de 2015.
4. Libellium. Cold Chain Monitoring and Smart Tracking in Zaragoza. Libellium World; Zaragoza, España, 26 de enero de 2015. Disponible en http://www.libelium.com/cold-chain-monitoring-smart-tracking-zaragoza/, [fecha último acceso: 17 de julio de 2015].
5. Pérez Gutiérrez, J. Registrador de datos de bajo coste (Low Cost DataLogger). *Proyecto Fin de Carrera de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Universidad de Cantabria.* **2013**.

Avances de la mecatrónica en un escenario de operaciones militares en ambiente de selva húmeda tropical

Serrano Pitti, Juventino Encarnación [1,*], Calderón Godoy, Antonio José [2] y Carmona Fernández, Diego [2]

[1] Universidad de Panamá. Email: juventino.serrano@up.ac.pa (JESP)
[2] Universidad de Extremadura; Emails: ajcalde,dcarmona@unex.es (AJCG), (DCF)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: juventino.serrano@up.ac.pa (JESP);

Abstract: La supervivencia en ambientes especialmente hostiles durante las operaciones militares no sólo dependerá del entrenamiento y dotación de las tropas sino que también puede tener gran dependencia de los avances en mecatrónica en materia de defensa. Estos avances pueden llevarse a cabo en distintos ámbitos como la robótica, la sensórica, la logística, la inteligencia o el tipo de soporte en general. En lo que se refiere a vigilancia persistente perimetral en áreas de operaciones o de combate, bajo todo tipo de condiciones climáticas diurnas y nocturnas, se evidencia la necesidad de dotar al combatiente con el mejor equipo mecatrónico posible, aumentando así su posibilidad de supervivencia y elevando el grado de cumplimiento de la misión. En este caso de estudio se han utilizado sensores de vigilancia remota HALO-PS724 que permiten la vigilancia continua desde puntos lejanos. Como elemento de enlace se utilizó un equipo especializado de retransmisión de datos basado en la tecnología IRIDIUM SATCOM de tipo umbrela (paraguas), de fácil instalación desde un avión en vuelo rasante o desde un helicóptero.

Keywords: mecatrónica; cámaras de vigilancia; entornos selváticos, defensa

1. Introducción

El uso de cámaras de vigilancia en áreas ribereñas ayuda en la seguridad. En todo el mundo se desarrollan conflictos armados. Las áreas selváticas de ambiente húmedo tropical de por si hostil, pasan a ser altamente mortales cuando en él se llevan a cabo operaciones militares [1]. La supervivencia en este tipo de ambiente no sólo dependerá del entrenamiento y la dotación de las tropas,

más aún de los avances mecatrónicos en materia de defensa; la robótica, los sensores, la logística, la inteligencia asistida, además de todo tipo de soporte en general. En lo que se refiere a vigilancia persistente perimetral en áreas de operaciones o de combate, bajo todo tipo de condiciones climáticas diurnas y nocturnas, se evidencia la necesidad de dotar al combatiente con el mejor equipo mecatrónico posible, aumentando así su posibilidad de supervivencia y elevando el grado de cumplimiento de las misiones. Lo arduo del terreno hace que las tareas de vigilancia perimetral o de incursiones en la selva sean aún más difíciles dado el alto grado de limitantes a la hora de ejercer una vigilancia ya sea defensiva u ofensiva, bajo los parámetros de las áreas húmedas selváticas. Éstas se deben tomar en cuenta en el momento de la planificación de cualquier operación militar.

Teniendo en cuenta los avances de la tecnología mecatrónica y con ayuda de las técnicas de camuflaje, se insertarán en la selva elementos de vigilancia, de comunicaciones, sensores y cualquier otra capacidad que permita garantizar su funcionamiento en condiciones de extrema humedad y temperatura típicas de la selva tropical. Todo ello, para poder asegurar las líneas de defensa y ejercer una vigilancia persistente en ríos, copas de los árboles, etc. También se incluirá cualquier tipo de tecnología para la obtención de inteligencia [2] y una mayor efectividad en el desarrollo de las operaciones de combate.

2. Descripción del sistema

El sistema de vigilancia está basado en cámaras de vigilancia perimetral continua con sensores remotos. La metodología utilizada en este estudio ha consistido en monitorizar en “tiempo real” el funcionamiento de estas cámaras, sensores y demás equipos de comunicación de ayuda y soporte [4]. El estudio se ha llevado a cabo en todos los escenarios posibles de operación en los que se desarrollan actividades militares, movimiento de tropas o elementos humanos. Un entorno especialmente hostil corresponde a las húmedas selvas de ambiente tropical, específicamente los que contienen: ríos, atajos, puntos de acceso, caminos, campamentos, campos de aterrizaje ilegales o carreteras secundarias que constituyen áreas de posible enfoque para actividades humanas y vehiculares de tipo militar o paramilitar. Este proyecto se ejecutó en las selvas húmedas de Panamá, en la reserva selvática de Chagres, a un costado del Canal de Panamá. El elemento de prueba consistió en una serie de cámaras de vigilancia remota HALO-PS724, tipo infrarrojo visible (IR/Vis) con sensores de detección de movimiento que permiten la vigilancia continua desde puntos lejanos, y el control y la toma de decisiones a medio planeta de distancia pero en “tiempo real”. Éstas son especialmente útiles en la detección de tráfico humano en selvas de triple dosel, con visibilidad reducida, y que transmiten y reciben sus instrucciones a través de las ayudas satelitales y por internet desde cualquier dispositivo que conozca sus frecuencias. Como elemento de enlace de comunicaciones se utilizó un equipo especializado de retransmisión de datos basado en la tecnología IRIDIUM SATCOM del tipo umbrela de fácil instalación desde un avión en vuelo rasante o desde un helicóptero [3]. Estas unidades se arrojan sobre el dosel del bosque y retransmiten las señales de los diferentes sensores y/o cámaras de vigilancia instaladas en todo el perímetro que está considerado como el área operacional y que permiten un fácil acceso desde la web a cualquier sensor, en cualquier lugar a cualquier hora, pudiendo tener acceso a la información de las diferentes cámaras de vigilancia ribereña o del perímetro de interés en “tiempo real” [5].

El elemento de prueba fundamental a ensayar en los pasos ribereños corresponde a las cámaras de vigilancia sobre un área perimetral. Las características técnicas más destacables de estas cámaras son: capacidad infrarroja con flash de LED; actividad diurna de fotografía blanco y negro o color; detección nocturna por infrarrojo (IR); distancia de detección hasta 20 metros en la selva; cono de detección de 30 grados; imágenes de baja resolución de 3KB y de alta resolución de 50KB; capacidad de auto borrado automático después del envío; comunicación en espectro de banda de 900MHz; transmisión de sus imágenes al Data Exfiltration Unit (DEU) que cubre todo el perímetro y retransmisión a los puestos de control; programación remota (estado, exposición, disparador retardado, purga remota de la imagen una vez transmitida) y bajo consumo energético con baterías de alta duración. Los datos son retransmitidos por internet con localización exacta de cada cámara en base a tecnología GPS. Además, se les puede instalar una alarma acústica opcional para alejar animales o insectos que podrían interaccionar con el elemento de prueba. En la figura 1 se muestra el tipo de cámara utilizado.

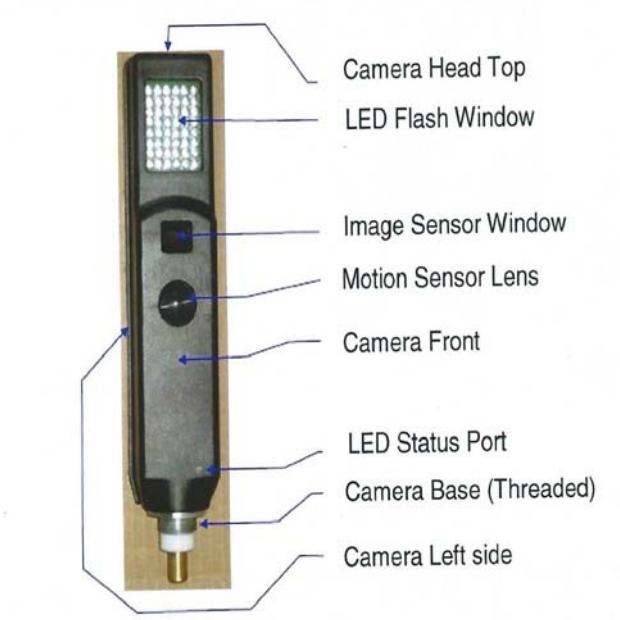


Figura 1. Cámara de vigilancia remota HALO-PS724.

3. Metodología utilizada

La metodología seguida se basa en un protocolo típico de ejecución para este tipo de pruebas. Este protocolo consta de las siguientes fases:

- Presentación y aprobación del “Plan de Prueba”.
- Recepción de los elementos de pruebas.
- Inspección inicial y verificación de funcionamiento.
- Estudio, selección e instalación en las áreas operacionales de la prueba.
- Etapa de “Recolección de los Datos” y parámetros ambientales.
- Análisis de los datos.
- Reporte final de la prueba, y reenvío, o retorno a los propietarios de los ítems.

Durante la parte operacional de la prueba se llevan a cabo un número plural de actividades diseñadas específicamente para probar las capacidades de detección de las cámaras de vigilancia y verificar su interacción con los equipos de apoyo como las unidades de retransmisión de datos DEU,

que enlazan a través de la red inalámbrica cualquier cantidad de unidades, cámaras distribuidas en el perímetro supuesto de vigilancia y equipos de recolección de datos y de soporte técnico. La unidad DEU a su vez sube los datos a través de su capacidad de comunicación "IRIDIUM SATCOM" a través de los satélites al internet. Consta de una antena de banda lateral omni-direccional de tipo L para la captación de las cámaras de vigilancia con soporte de baterías hasta para tres días sin actividad solar y capacidad de retransmisión satelital.

3.1. Presentación y aprobación del "Plan de Prueba"

El primer paso de toda prueba en clima húmedo tropical de triple dosel de selvas conlleva un protocolo para asegurar la calidad de los datos y garantizar la corrección de los cálculos y análisis posteriores de cualquier incidente que ocurra durante el desarrollo, ya sea por factores humanos o ambientales propios del área de pruebas. Se escriben los escenarios a seguir en cada una de las misiones a ejecutar y lo que se espera de los resultados a obtener. Todo este compendio se envía a los superiores del comando para su aprobación. Una vez debidamente aprobado se inicia la fase de ejecución propia de la prueba o parte operacional.

3.1.1. Procedimiento en las detecciones ribereñas según el plan de pruebas previamente aprobado

A lo largo de un trayecto ribereño se seleccionó un área de aproximadamente un kilómetro de longitud, donde se habrían de instalar, debidamente camufladas, diez cámaras de detección, cada una a cien metros de distancia de la otra, de forma escalonada y fuera del alcance de la corriente del rio, de forma tal, que los participantes no tenían conocimiento, ni de la cantidad, ni de la posición de las cámaras de vigilancia. . En la figura 2 se muestra la disposición de las cámaras de vigilancia a lo largo del trayecto seleccionado. Para ello, se escogió un área selvática del curso del rio Chagres y se midieron las posiciones de emplazamiento a diez metros una de la otra. De esta forma se creaba una red de vigilancia perimetral. Cada cámara de prueba se enlazaba con las dos más adyacentes a través de enlaces de radiofrecuencia y todas transmitían su información en tiempo real a un DEU (Data Extraction Unit) que enlazaba la red con los satélites militares. La activación de una cámara (detección) generaba una vista que era enviada vía EDU a los puntos de control a distancia permitiendo la observación en tiempo real de la ruta. Los sujetos de prueba deberán ejecutar el número de misiones aprobadas en el "Plan de Prueba". Cada una de las misiones consiste en diez viajes, cinco en aval y cinco en amonte por el rio de forma que completan diez pasadas frente a las cámaras de vigilancia por cada unidad de prueba. Los resultados se almacenarán en unas hojas de control como la presentada en la Tabla 1, repitiéndose las operaciones tanto de día como de noche con resultados sistematizados de detección, en toda clase de condiciones atmosféricas. En estas hojas de control se recogerán los datos de temperatura ambiente, humedad relativa, presión barométrica, visibilidad, lluvia, radiación solar, entre otras, para poder comparar y evaluar los aspectos climáticos. Los resultados aquí obtenidos se compararán con los resultantes de otras pruebas idénticas ejecutadas en las zonas desérticas y en zonas de clima ártico, al ser los tres tipos representativos del clima planetario extremo.

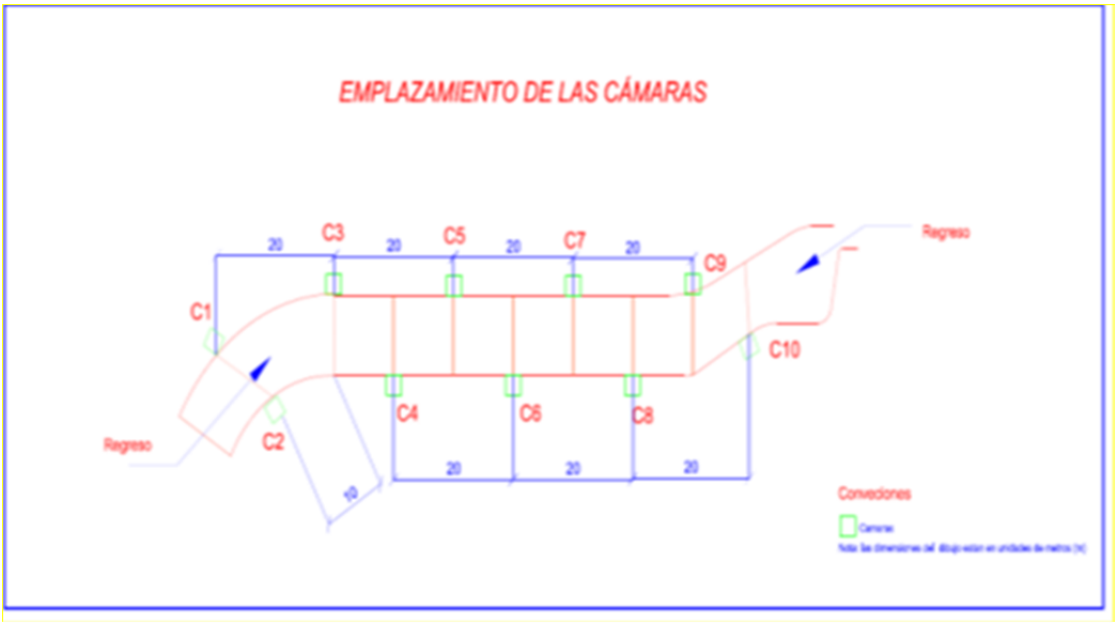


Figura 2. Emplazamiento de las cámaras de vigilancia.

3.2. Recepción de los elementos de prueba.

Se recibieron diez cámaras de vigilancia perimetral que constan de un cuerpo con una base tubular de un metro de altura que a su vez contiene la fuente energética (baterías) que suministran la energía necesaria para el funcionamiento. En la parte superior de cada una, en un rectángulo, se instaló la ventana de imagen del sensor, un sensor de movimiento, un flash de LED, la ventana de apertura de la cámara, un LED de puerto de estado, todo de fácil instalación, robusto y de fácil camuflaje. En el momento de la recepción se marca cada una de las cámaras de C1 a C10 junto con todas sus partes y baterías.

3.3. Inspección inicial y verificación.

Al recibir los elementos destinados para la prueba, estos se marcan para su identificación y posterior seguimiento. Se verifica su montaje y funcionamiento hasta declararlo apto para el inicio de la prueba. Una vez completada la inspección y la verificación de funcionamiento de cada una de las cámaras de vigilancia que participarán en la prueba especificada, se dictamina la resolución de llevar a cabo las pruebas planificadas aprobadas por el ente rector a cargo de la prueba en su fase operacional.

3.4. Instalación en las áreas de vigilancia e inicio de la parte operacional de la prueba.

Durante la fase de planteamiento se han identificado y seleccionado una serie de lugares que pongan a prueba el máximo de las capacidades de las cámaras de vigilancia bajo ensayo. Una vez seleccionada el área ribereña de prueba los responsables de la instalación proceden a camuflar cada una de las cámaras en su receptáculo por la duración del periodo de pruebas, e instalarlas en los sitios preestablecidos, junto con todos los equipos de apoyo y recolección de los datos de la prueba. Una vez instaladas todas las cámaras de vigilancia en los sitios especificados se procede a la prueba preliminar

de todo el sistema. Si la prueba se completa satisfactoriamente se declaran los sistemas aptos para la fase de ejecución de la parte operacional, y se inicia la operación.

4. Recolección y análisis de datos

Al iniciar la parte operativa de la prueba se completan todas las formas de recolección de datos preestablecidas en el plan de prueba oficial. Como ejemplo se presenta la Tabla 1 donde se recogen los valores de detección según se establece al inicio, con los valores 1= detecta y 0= no detecta.

Cámara ID	Vuelta 1	Vuelta 2	Vuelta 3	Vuelta 4	Vuelta 5	Vuelta 6	Vuelta 7	Vuelta 8	Vuelta 9	Vuelta 10
C1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Detecciones	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10

Tabla 1. Ejemplo de formato de detección ribereña para una misión.

Los valores de detección positiva o negativa se tabulan para cuantificar los niveles de detección de todas las cámaras, con el objetivo de evaluar el nivel de detección de la intromisión en todo momento y a toda hora del día o de la noche en el área perimetral bajo vigilancia. A lo largo de cuatro meses se ejecutaron misiones que cumplieron con un número de 10,000 detecciones por parte de las cámaras de vigilancia en las cien vueltas operativas de las pruebas.

Los datos recogidos por los equipos de soporte y ayuda, conjuntamente con los datos de las características climáticas del sitio se tabulan y se presentan de forma que permitan un fácil entendimiento de las vicisitudes de los sujetos de prueba. En la Tabla 1 se presentan las detecciones con su valor de 1 o 0 (detección o falla) Observándose un 100% de detecciones durante los 100 días de prueba. Dando como resultado 10 misiones x 100 detecciones x 100 días = 10000 detecciones (100% completadas).

En un análisis de cumplimiento del número total de misiones (100 días de pruebas) con su resultado de detecciones por misión y global se obtiene:

$$N = 10000 \times \frac{T.Det}{100} \times (n.Det \times misión) = 100\ misiones\ \rightarrow N = 100 \quad (1)$$

$$n = 10\ cámaras \times 10\ vueltas = 100\ detecciones\ \rightarrow n = 100 \quad (2)$$

$$\sum d = N \times n = 100 \times 100 = 10000\ número\ total\ de\ detecciones\ en\ la\ prueba \quad (3)$$

A este análisis se le agrega la información de las tablas climatológicas con todos los datos meteorológicos durante la duración de toda la prueba. De este modo, cuando ocurra algún incidente se puedan conocer las características climáticas del momento en que ocurra el fallo, para así poder determinar si los fallos son causados por defectos de fabricación u otra causa externa. También sirven para cuantificar los efectos adversos de los rigores del ambiente de selva húmeda tropical sobre los materiales usados en la ejecución de los elementos de pruebas. La figura 3 proporciona un gráfico que contiene la información meteorológica del área de prueba.

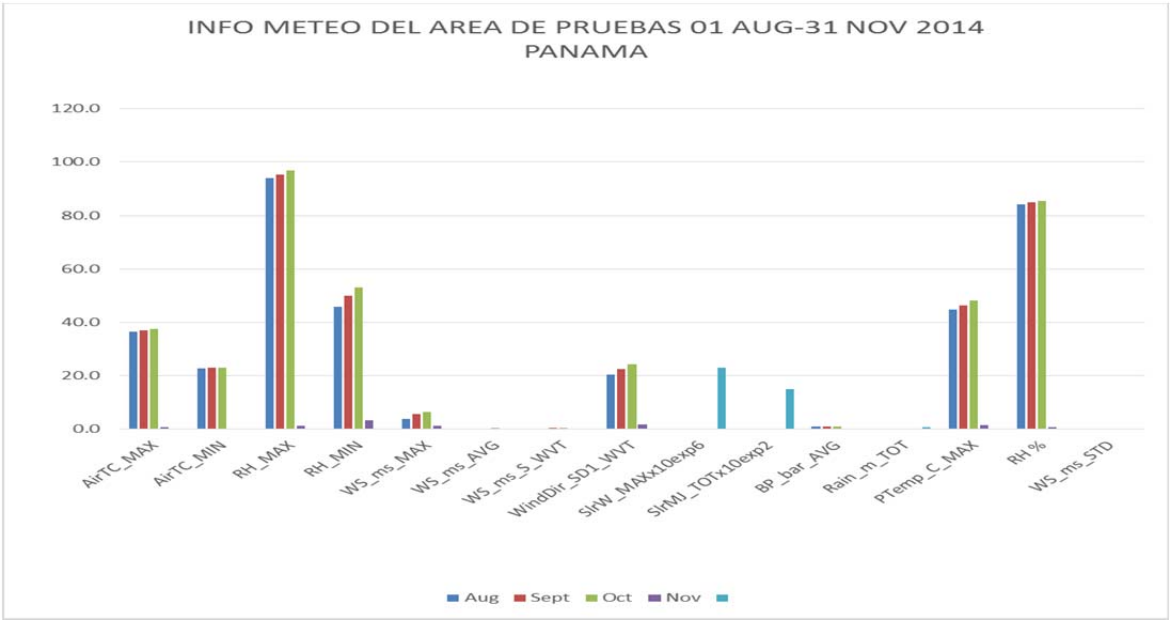


Figura 3. Información meteorológica del área de prueba.

Según se desprende de este gráfico, en este periodo se obtuvo una temperatura/humedad relativa máxima de 37.6 C/96.9 % y una mínima de 22.8 C/45.7%, además de un total de 700 mm de lluvia y una radiación solar acumulada de 1490.1 MJ durante el periodo de pruebas. El anticiclón semipermanente del Caribe Norte, afecta sensiblemente las condiciones climáticas de este país, ya que desde este sistema se generan los vientos alisios del nordeste que en las capas bajas de la atmósfera llegan a Panamá, determinando sensiblemente el clima de este país.. Existe una zona de confluencia de los vientos alisios de ambos hemisferios (norte y sur) que afecta el clima de los lugares que caen bajo su influencia y que para Panamá tiene particular importancia: la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual se mueve siguiendo el movimiento aparente del sol a través del año. Esta migración norte-sur de la ZCIT es la responsable de las dos estaciones (seca y lluviosa) características de la mayor parte de este territorio

5. Conclusiones

Con los datos analizados se procede a realizar un reporte final de la prueba, categorizando todas las conclusiones que se pueden sustentar y a la vez cuantificando los niveles de credibilidad de cada una de las pruebas a las que se sometieron los ítems. En este caso las cámaras de vigilancia se evaluaron de

acuerdo a su rendimiento y a los fallos que pudieron ocurrir durante todo el periodo de pruebas. También se puede calcular el tiempo promedio entre fallos o *"mean time between failures (MTBF)"* que no es más que un indicativo que permite calcular el tiempo de vida promedio hasta que ocurra un fallo. Esto, a su vez, permite determinar en la vida real el tiempo aproximado de uso con la seguridad de que no fallará el equipo. Una vez completada toda la prueba para cerrar el círculo se reenvían todos los elementos a sus propietarios y con esto se declara cerrada la prueba. Del Análisis de datos anteriores se desprenden las siguientes conclusiones:

a. 100 % de detección en la ejecución de esta prueba, poniendo de manifiesto la capacidad y el desempeño de este tipo de cámara para la vigilancia en selva, en áreas ribereñas y en cualquier tipo de terreno que requiera operaciones de vigilancia.
b. Los factores ambientales enmarcan el clima como húmedo tropical de acuerdo a los valores de la figura 3.
c. La facilidad de camuflaje del equipo de cámaras asegura un buen desempeño bajo diversas condiciones, como las que suponen las operaciones militares o de vigilancia perimetral en ambientes de selva húmeda tropical.
d. El tener el mejor equipo disponible ya probado en las regiones de selva húmeda tropical, disminuye el riesgo de fallos durante la ejecución de operaciones militares debido a los factores ambientales, elevando así el grado de cumplimiento de las misiones y minimizando el número de bajas durante las operaciones.
e. Los avances en mecatrónica, probados en la selva tropical, usados en el ámbito militar producen un mejoramiento en las ventajas tácticas de combate, el cumplimiento de la misión y la salvaguarda del territorio nacional.

Referencias

1. 1. https://services.traxintl.com/what-we-do/test-range-services/natural-environments-testing/tropic-regions/
2. http://www.ww2gyrene.org/pacific-battleground.htm
3. Jane's International Defense Review Magazine.
https://www.ihs.com/janes-international-defence-review.html
4. GPR- Ground Penetration Radar. KTS-Electronic GmbH & Co. KG.
5. FPR- Foliage Penetration Radar. Forester http://dtsn.darpa.mil/ixo/programs.asp?id=

Sesión I-B

Adquisición de Información y Procesado

Sistema de Toma de Demoras Electrónicas para Buques basado en Sensores Inerciales

De Meer Méndez, Alejandro[1,*], Núñez Ortuño, José María[2] y González-Cela Echevarría, Gerardo[3]

[1] F-102 'Juan de Borbón' Arsenal de Ferrol. Rúa Argüelles, 4. 15401 Ferrol, La Coruña; Email: ademme1@fn.mde.es (ADM).

[2] Centro Universitario de la Defensa (CUD). Escuela Naval Militar (ENM). Plaza de España, 2. 36920 Marín, Pontevedra; Email: jnunez@cud.uvigo.es (JMNO).

[3] Departamento de Navegación. Escuela Naval Militar (ENM). Plaza de España, 2. 36920 Marín, Pontevedra; Email: gerarcela@fn.mde.es (GGE).

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: ademme1@fn.mde.es (ADM).

Abstract: Para conocer la posición de un buque cuando éste se encuentra realizando una navegación costera, es posible hacer uso de la información geográfica disponible en las Cartas Náuticas tomando referencias a los puntos notables y conspicuos de la costa y realizar una triangulación con la información obtenida.

En este trabajo se presenta un sistema alternativo de captura de datos basado en **sensores inerciales**, que mejora la precisión del método manual y automatiza la tarea de toma de demoras, permitiendo, con la ayuda de un computador, el cálculo de la triangulación a partir de las líneas de posicionamiento obtenidas.

Para su implementación se ha seleccionado un conjunto de componentes comerciales (COTS) que proporcionan una precisión adecuada a un coste reducido. Una plataforma de desarrollo **Arduino** controla los sensores inerciales, enviando las posiciones obtenidas a un computador en el que se ejecuta un programa que resuelve el problema de situación con ayuda de la trigonometría esférica. Se utilizan cartas electrónicas comerciales para obtener las coordenadas geográficas de los puntos de interés de forma inmediata.

El nuevo sistema es innovador y mejora las prestaciones de los métodos manuales de posicionamiento actuales, en cuanto a precisión, rapidez, agilidad, validación y verificación de la posición y empleando un coste reducido para el prototipo desarrollado.

Keywords: Sistema de posicionamiento; Navegación Costera; Arduino; Sensor Inercial; Trigonometría Esférica; Cartas Electrónicas.

1. Introducción

El conocimiento de la posición en un buque es uno de los principales problemas que han abordado a lo largo de la historia a todos los hombres de mar. En la ciencia náutica coexisten en la actualidad distintos métodos que permiten al navegante conocer su posición con la máxima precisión y fiabilidad. En cualquier embarcación, pero con mayor importancia en plataformas navales militares, es imprescindible la simultaneidad y reciprocidad de distintos métodos de posicionamiento. Es también necesario que de dichos sistemas se puedan obtener los datos de posición, rumbo o velocidad para poder constatar y/o incluso crear algoritmos de fusión de los mismos.

Uno de los métodos más antiguos desarrollado para la navegación costera consiste en la obtención de referencias o líneas de posición (demoras) respecto a los puntos conspicuos o notables de los distintos perfiles de la costa (faros, cabos, etc.) y la triangulación de estas líneas de posición. Este método utiliza la giroscópica de abordo para obtener las líneas de posición y la carta náutica sobre la que se realiza la propia triangulación y obtiene la posición gracias a su referencia geográfica, el traslado de esta información se realiza verbalmente, hasta su proyección y triangulación en la carta náutica, lo que conlleva una serie de errores y un retraso en la obtención de la situación que reducen la precisión del método [1].

En la actualidad este es uno de los métodos cuyo conocimiento se exige a cualquier navegante y tiene la ventaja de que, al igual que con los medios astronómicos, no es necesario disponer de ayudas externas, no emite energía, ni es vulnerable a interferencias o perturbaciones electromagnéticas, en contraposición a la navegación electrónica (GPS).

Con el avance que proporcionan las cartas electrónicas y los sensores inerciales integrados en pequeños circuitos integrados, surge la idea de aprovechar ambos para automatizar el proceso de posicionamiento anteriormente descrito. En este trabajo se presenta un nuevo dispositivo electrónico que permite determinar la posición de un buque durante la navegación costera basándose en la triangulación de líneas de posición a puntos conspicuos (ángulos de demora), pero tomadas a través de la información proporcionada por diversos sensores inerciales miniatura encapsulados en componentes electrónicos (acelerómetros y giróscopos). Además este sistema dispone de cartas electrónicas que permiten la captura automática de las coordenadas geográficas de los puntos conspicuos seleccionados.

La idea requiere, por tanto, desarrollar un programa que permita integrar la información que proporcionan los sensores inerciales y las cartas electrónicas, para conseguir como resultado la posición en la que se encuentra el buque. Al realizarse la toma de datos y el cálculo de la posición de forma prácticamente inmediata la posición obtenida tiene una precisión mucho mayor a la obtenida siguiendo el método convencional, obteniéndose prácticamente la posición en tiempo real del buque. Este sistema supone un mayor grado de automatización de los procedimientos actuales permitiendo además determinar la posición del buque de manera independiente del GPS [2].

2. Sistema propuesto. Sección Experimental

2.1. Componentes

El sistema desarrollado es una combinación de tres componentes principales, de cuyo trabajo combinado se puede obtener la posición del buque:

- En primer lugar un prototipo que integra la placa de desarrollo Arduino y la unidad de medición inercial (IMU) así como los elementos de indicación visual (LEDs) y acústica (zumbador) que informan al operador de diversas circunstancias durante la fase de toma de demoras, tal y como muestra el esquema de conexión de la **Figura 1**. La IMU incorpora un acelerómetro de 3 ejes, un giróscopo de 3 ejes y un magnetómetro de 3 ejes [3] que se sitúa, mediante un sistema de anclaje, sobre las tradicionales alidadas azimutales utilizadas en los buques. Auxiliado por la alidada, el sistema toma el ángulo que determina la línea de posición, procesando la variación angular que ha sometido la alidada en su desplazamiento, determinándose así el ángulo de demora. El sensor inercial que se ha seleccionado y empleado en las pruebas es el MPU-9250.

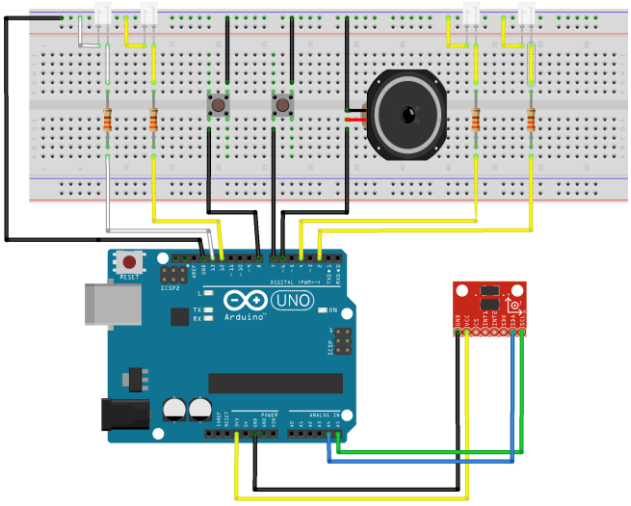


Figura 1. Esquema de conexión básico.

- El segundo componente son las cartas electrónicas (ECDIS), en este caso se ha integrado el sistema desarrollado al programa OpenCPN. En dicho programa el operador debe seleccionar los puntos conspicuos adecuados para obtener una buena triangulación. Al seleccionar dichos puntos se extraen sus posiciones geográficas, información que se puede procesar y enviar por distintos puertos a través de las sentencias NMEA.

- El tercer y último componente es el Programa Principal, generado en el entorno de programación Processing, que se encarga de recopilar la información obtenida con los dos componentes anteriormente mencionados y obtener la posición en la que se encuentra la embarcación desde la que se realiza la medición.

2.2. Obtención de las demoras electrónicas

La obtención de las demoras o líneas de posición de manera electrónica es posible gracias a los sensores inerciales integrantes del prototipo (**Figura 2**) que permiten, mediante la integración de sus componentes, la medición precisa de ángulos relativos al movimiento al que se ven sometidos. En nuestro caso el ángulo de Euler de interés que se obtiene para procesar posteriormente tras el algoritmo de fusión de los tres sensores es el de guiñada (*yaw*) [4]. Es necesario que los ángulos relativos obtenidos por los sensores estén referenciados para poder trabajar con dichas mediciones. Por este motivo se relacionan los ángulos procesados con la giroscópica de abordo o a un compás magnético, lo que permite obtener líneas de posición geográfica de la posición del buque y su utilización para la posterior triangulación. Esto es posible gracias a la reinicialización del IMU para que su ángulo nulo coincida con el Norte Verdadero terrestre. [5]

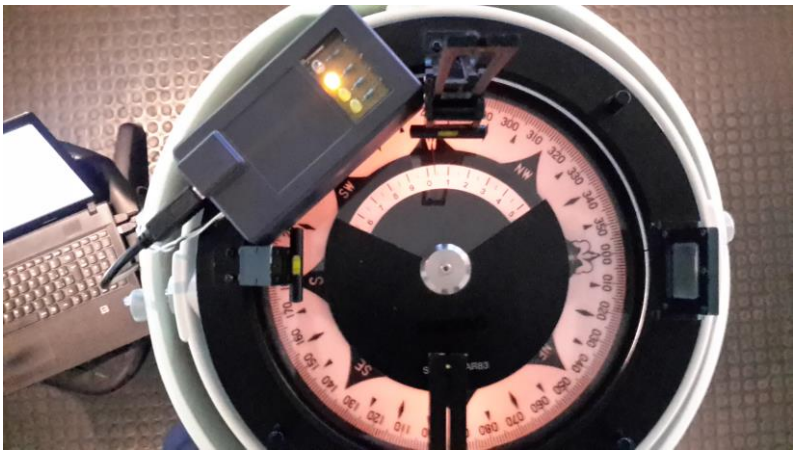


Figura 2. Vista azimutal del Prototipo sobre la alidada.

La información de los sensores se procesa en una plataforma de desarrollo Arduino, el programa que se carga en el procesador incluye la lógica de funcionamiento de todos los componentes que lleva conectados (con señales acústicas y luminosas) y realiza también la fusión de datos de los distintos sensores inerciales empleando un filtro complementario. El mecanismo de control se realiza mediante un mando de control unido a la placa de Arduino en el que se incluyen dos botones, el botón de 'Norte' cuya función es la de realizar la referencia con el Norte verdadero, y otro botón, 'Demora', cuya finalidad, es la del registro de la demora electrónica del punto conspicuo seleccionado. En el momento en el que se pulsa el botón se registra el valor del ángulo verdadero medido por el sensor inercial referenciado.

2.2. Obtención de las coordenadas de los puntos conspicuos

Las coordenadas de los puntos conspicuos se obtienen de manera sencilla colocando marcas sobre los mismos en las cartas electrónicas y enviando esa información, que como se ha indicado se encuentra en sentencias NMEA, a través de los puertos con los que es capaz de trabajar el OpenCPN. Debido al lenguaje en el que se codifica la información geográfica de los puntos conspicuos se puede utilizar para numerosas aplicaciones, e incluso existe la posibilidad, todavía no materializada, de enviar la posición obtenida de nuevo a la carta electrónica con lo que se puede realizar un seguimiento de la posición obtenida por demoras electrónicas en la misma [6].

2.3. Triangulación y obtención de la posición

Una vez obtenidas las demoras y las posiciones de los puntos conspicuos se puede resolver el problema de triangulación y obtener la posición. Para ello se dispone de un ordenador en el que se ejecuta el Programa Principal.

2.3.1. Algoritmo de intersección de las curvas ortodrómicas

El algoritmo empleado para obtener la triangulación utiliza la expresión analítica del círculo ortodrómico que permite calcular la latitud en función de la longitud según la siguiente expresión [7]:

$$lat\ (orto) = arctg(sen(L - \alpha) * \text{tg}(\beta)) \quad (1)$$

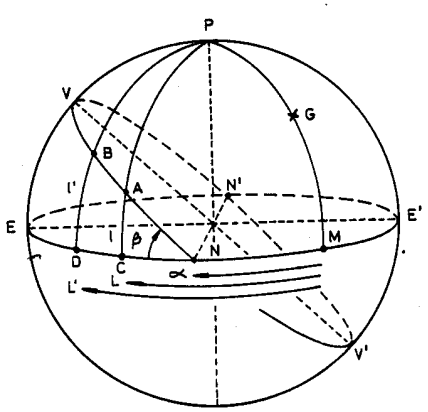


Figura 3. Ejemplo de línea de posición sobre el globo terráqueo.

En dicho algoritmo se parte del valor inicial de los puntos conspicuos y se van recorriendo dos a dos las curvas ortodrómicas mediante el incremento (o decremento según la posición relativa de los puntos y sus demoras) de la longitud. Para obtener las nuevas longitudes se utiliza un paso variable que es función de la diferencia relativa entre las dos longitudes obtenidas anteriormente. De esta manera, mediante este paso variable, conseguimos optimizar el tiempo de cálculo requerido por el algoritmo. Estas nuevas longitudes permiten calcular las nuevas latitudes de la ortodrómica.

Al converger obligatoriamente las dos curvas, por tratarse de una triangulación, el paso variable se va reduciendo con lo que va aumentando la precisión indefinidamente hasta llegar a la intersección entre ambas. El algoritmo abandona el bucle de cálculo cuando el error entre las latitudes y longitudes de los puntos de las dos curvas es menor a la centésima de una yarda.

Las intersecciones dos a dos determinan los tres vértices del triángulo de posición. Finalmente se da como mejor estimación de la posición del buque es el centro de dicho triángulo obtenido. También se calcula el error máximo de la propia triangulación como la diferencia entre el centro y el vértice más alejado, lo que ofrece una idea de la precisión de la posición obtenida y por tanto de su validez para la navegación.

2.3.2. Interfaz Gráfico

La selección de Processing para ejecutar el programa principal se debe a las capacidades gráficas que presenta. Los esfuerzos destinados a hacer más cercano al usuario el manejo e interpretación de la solución obtenida tienen una consecuencia casi inmediata en el interfaz. Un ejemplo de la presentación en la pantalla de una triangulación típica se muestra en la **Figura 4**.

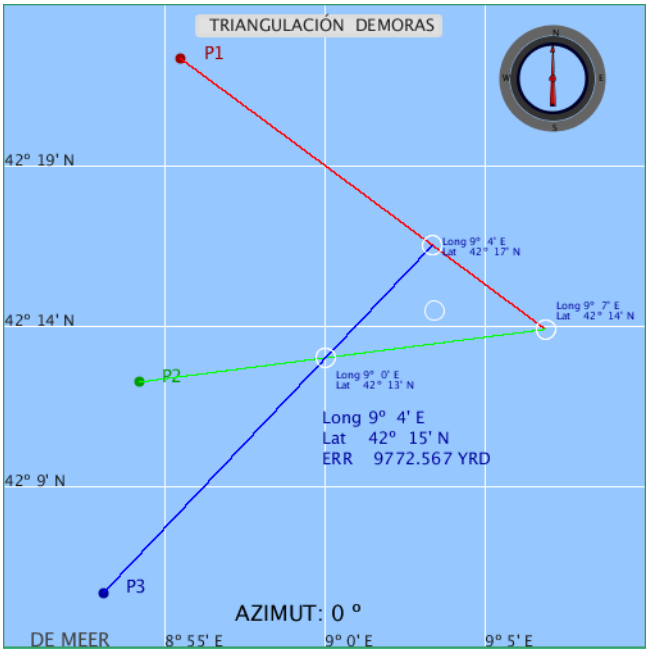


Figura 4. Interfaz gráfico y ejemplo de triangulación.

La aplicación posee una interfaz de usuario sencilla en la que se presenta el detalle de los puntos de intersección con sus correspondientes coordenadas geográficas. Así mismo, la posición del buque corresponde a la marca que aparece en el centro del triángulo, incluyéndose también sus coordenadas y el error en yardas correspondiente al peor caso de los tres vértices del triángulo.

También se presenta una cuadrícula con las referencias geográficas de la zona del globo terráqueo a por la que se está navegando, y una brújula inercial cuyo movimiento se corresponde con la lectura del ángulo azimutal obtenida por el sensor inercial.

Una función 'zoom' en el programa permite acercar o alejar la imagen cambiando la escala de la zona representada.

2.4. Comunicación entre componentes

Es de especial relevancia el modo en el que interactúan los tres elementos que integran el sistema. El flujo de información que intercambian estos elementos se realiza a través de la siguiente interfaz serie:

- El Arduino se comunica y obtiene alimentación a través de un cable serie USB que se conecta al ordenador principal. A través de esta conexión se cargan, en el arranque, los programas de calibración y la aplicación de lectura de bajo nivel de los sensores inerciales. La información azimutal captada por el sensor se envía al ordenador principal por esta misma línea serie.

- La carta electrónica OpenCPN envía los datos geográficos de los puntos seleccionados también por medio de una línea serie. Puesto que esta aplicación corre en el mismo ordenador que la aplicación principal, para comunicar con ella mediante una línea serie es necesario instalar un gestor de puertos serie virtuales. Para ello se ha utilizado la aplicación comercial (COTS) Virtual Serial Port.

El siguiente diagrama recoge cada interfaz que existe entre los distintos componentes del sistema:

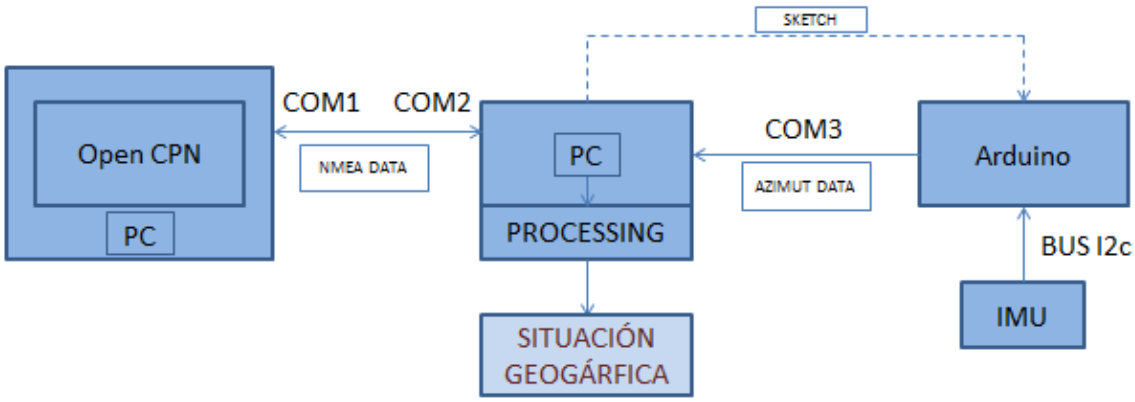


Figura 5. Esquema de interfaz.

3. Resultados y Discusión

El prototipo creado es portátil y fácilmente acoplable a la alidada del taxímetro de un buque. Los avisadores luminosos y acústicos permiten al operador asegurarse de que las demoras se han capturado correctamente o que éste reinicie el proceso en caso de que se detecte algún error.

El sistema cumple con los objetivos de automatización del proceso de toma de demoras y triangulación según los requisitos establecidos inicialmente en el diseño.

El prototipo desarrollado se encuentra totalmente operativo y se está trabajando en la incorporación de mejoras para una versión posterior, consistentes en la reducción del tamaño del sistema portable, su "rugerización", la eliminación de cables entre el sistema de toma de datos y el PC en el que se ejecuta el ECDIS (mediante un sistema de transmisión de datos vía radio), y un sistema de alimentación mediante batería que lo haga verdaderamente portátil con una autonomía de uso razonable.

Además como resultado de las pruebas realizadas el sistema debe robustecer sus interfaces, modificando el SW de comunicación de forma que los errores de transmisión de datos sean reducidos.



Figura 6. Pruebas en el Simulador de Navegación de la ENM.

4. Conclusiones

El sistema desarrollado elimina la posibilidad de que el sirviente de demoras lea de manera incorrecta los ángulos sobre la alidada (error frecuente, pues la lectura se realiza mirando en un pequeño prisma) o que la transmita de manera incorrecta (algo menos frecuente) o que el receptor dibuje los ángulos de demora sobre la carta náutica de manera incorrecta. Además, este sistema acorta considerablemente el tiempo de resolución de la situación sobre la carta náutica, mejorándose considerablemente la precisión con que queda estimada la posición.

La posibilidad de corregir cualquier error en el proceso de posicionamiento y realizar recomendaciones al puente de gobierno a través de un sistema de toma de demoras automatizado aumenta de forma considerable. Esta mejora está directamente relacionada con la fiabilidad de las situaciones obtenidas y la seguridad de la navegación.

La información que se puede proporcionar es más fluida y, dependiendo del grado de avance en el desarrollo del programa, se pueden incorporar un mayor número de aplicaciones útiles para de cálculo de otros parámetros de interés, facilitando el conocimiento de la posición y mejorando la precisión y la fiabilidad de la situación obtenida [8].

Agradecimientos

El agradecimiento de los autores está dirigido a la Escuela Naval Militar (ENM), por el esfuerzo y facilidades dedicadas al nuevo modelo de formación de Oficiales de la Armada y al Centro Universitario de la Defensa de Marín (CUD), por hacer viable este nuevo modelo de formación y por la implicación del personal docente.

Referencias

[1] **Curbera, C.N. Martínez Jiménez C.N. Moreu.** *Artronomía y Navegación Tomo I.* Vigo. Libreria San José, 1970.

[2] **Llanes, T.N. Carlos Pajares.** *Informe NEMO 14 EW Trials.* 2014.

[3] **Núñez Ortuño, J.M.** "Capítulo 4. Sistemas de Medición Inercial (IMU), un ejemplo de una Tecnología de Uso Dual" en el Libro "Las Tecnologías de Doble Uso: La Contribución de la I+D

en Defensa al crecimiento económico, industrial y social"; 1ª Edición; Editorial Edelvives-CUD San Javier. Marzo 2015. ISBN 978-84-942-9317-7.

[4] **F. Berizzi; M. Diani**. *ISAR imaging of rolling, pitching and yawing targets*. Proceedings of the International Conference of Radar, 1996, pp. 346–349

[5] **CH Robotics.** CH Robotics. [En línea] http://www.chrobotics.com/library/understanding-euler-angles.

[6] **Kalian, Pavel.** GitHub. [En línea] 2013. https://github.com/OpenCPN/OpenCPN.

[7] **Curbera, C.N. Jímenez Martínez C.N. Moreu.** *Astronomía y Navegación Tomo III: Curso de Capitanes.* Vigo. Librería San José, 1987.

[8] **Jalan Ayer Keroh Lama.** International Journal of Engeneering and Technology Innovation. [En línea] 2011. http://sparc.nfu.edu.tw/~ijeti/download/V1-35-52.pdf.

Evaluación de algoritmos de identificación no cooperativa de blancos aéreos mediante perfiles de alta resolución

Hernán Vega, Olga [1,*], López Rodríguez, Patricia [1], Escot Bocanegra, David [1], Poyatos Martínez, David [1], Fernández Recio, Raúl [2] y Bravo, Ignacio [3]

[1] Laboratorio de Detectabilidad y Guerra Electrónica. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Torrejón de Ardoz, 28850, Madrid; Emails: lopezrp@inta.es (P.L.R.), escotbd@inta.es (D.E.B.), poyatosmd@inta.es (D.P.M.)

[2] Departamento de Matemática Aplicada a las TIC. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 28031, Madrid; Email: rfrecio@euitt.upm.es (R.F.R.)

[3] Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares, 28871, Madrid; Email: ibravo@depeca.uah.es (I.B.)

* Autor responsable del trabajo; Email: hernanvo@inta.es (O.H.V.)

Abstract: El principal desafío tecnológico relacionado con la Seguridad y Defensa es la identificación de forma rápida y fiable de diferentes aeronaves en vuelo. La identificación no cooperativa de blancos aéreos basada en perfiles en distancia de alta resolución, permite conocer si un blanco es amigo o enemigo sin necesidad de establecer un enlace de comunicación con él. Este artículo presenta la simulación de un sistema de reconocimiento basado en la aplicación de la descomposición de valores singulares a un conjunto de perfiles sintéticos, para extraer sus características principales. Mediante esta técnica, cada blanco se modela como un subespacio, y de esta manera es posible trabajar con la información más significativa en el dominio transformado, reduciendo efectos no deseados como el ruido u otras posibles interferencias.

Keywords: base de datos sintética; HRRP; NCTI; SVD

---

1. Introducción

La tecnología radar es la más adecuada para la detección de blancos donde la seguridad es cada vez más difícil, como en escenarios bélicos. El desarrollo de los sistemas radar de alta resolución ha permitido obtener una mayor información de los blancos a partir de la recolección y el procesado de

mayor cantidad de datos. Los sistemas radar de alta resolución permiten detectar y reconocer blancos a grandes distancias y bajo cualquier condición atmosférica [1], por ello han adquirido un papel clave en el ámbito de la Defensa. Entre las imágenes que se pueden obtener a partir de estos sitemas destacan, por su sencilla obtención, los perfiles en distancia de alta resolución o HRRP (*High Resolution Range Profile*). Un perfil HRRP puede considerarse como una imagen unidimensional que representa la reflectividad de un blanco en movimiento proyectada sobre la línea de visión directa del radar. Cada perfil está formado por celdas de resolución en distancia o *range bins* y contiene la distribución de los centros de dispersión, facilitando información acerca de la geometría del blanco [2]. La identificación no cooperativa de blancos aéreos (NCTI - *Non-Cooperative Target Identification*) basada en HRRPs consiste en comparar un perfil de un determinado blanco, o una colección de ellos, con la información contenida en una base de datos. En la literatura, el reconocimiento puede llevarse a cabo de diferentes maneras, enfrentando medidas de la misma naturaleza ya sean perfiles reales [3,4] o simulaciones [5,6]; o por el contrario comparando información de distinto dominio es decir, HRRP reales vs. sintéticos [7,8].

En este documento se presenta la simulación de un sistema NCTI basado en la aplicación de la descomposición de valores singulares (SVD - *Singular Value Decomposition*) [9] a un conjunto de perfiles consecutivos en el tiempo y alineados. A diferencia de otros estudios [4,10] en los que la SVD se utiliza para reconstrucción de imágenes y eliminación de ruido, en este artículo se aplica para disminuir la dificultad del reconocimiento; ya que permite extraer la información más significativa en el dominio transformado, reduciendo características no deseadas como el ruido. Las medidas empleadas provienen únicamente de simulaciones electromagnéticas de siete aeronaves civiles para unas trayectorias reales de vuelo. De esta manera, se han analizado dos métricas en un escenario ideal de actuación con vistas a estudiar las prestaciones del sistema si se comparan perfiles de blancos reales contra perfiles sintéticos.

2. Metodología

2.1. SVD. Singular Value Decomposition

La descomposición en valores singulares o SVD (*Singular Value Decomposition*) es una factorización de matrices y su aplicación constituye una parte primordial en muchos algoritmos. Los métodos para el reconocimiento de blancos en este estudio tienen en común la aplicación de la técnica SVD a una matriz de HRRPs. Ésta, es una alternativa robusta y muy eficiente para descomponer cualquier matriz en espacios vectoriales expandidos por bases ortonormales [9]. Así, siendo $X \in \Re^{N\times M}$ una matriz de perfiles consecutivos y alineados de dimensiones $N \times M$ (asumiendo $N > M$), con M el número de ángulos de iluminación o perfiles totales de la medida del blanco y N el número de *range bins*, al aplicar la SVD la matriz X se descompone en tres matrices ortogonales:

$$X = USV^T \quad \text{siendo,} \tag{1}$$

$$U = EV[X \cdot X^T] = [u_1, ..., u_N] \in \Re^{N\times N} \tag{2}$$

$$V = EV[X^T \cdot X] = [v_1, ..., v_M] \in \Re^{M\times M} \tag{3}$$

$$S = diag(\sigma_1, ..., \sigma_p) \in \Re^{N\times M}; \tag{4}$$

La operación $EV[\cdot]$ hace referencia al cálculo de los "autovectores de". De este modo, las matrices $U \in \Re^{N\times N}$ y $V \in \Re^{M\times M}$ contienen los vectores singulares de X por la izquierda y por la derecha respectivamente. Por su parte, la matriz diagonal $S \in \Re^{N\times M}$ está formada por los p valores singulares de X en orden decreciente, representando así los pesos asociados con el vector *i-ésimo* correspondiente. De esta manera, una mayor contribución del vector singular en la formación de señal depende de un mayor valor singular, σ_i. Como afirma el teorema de Eckhart y Young [9], al aplicar la SVD, los vectores singulares con mayor peso asociados a los mayores valores singulares proporcionan la mejor aproximación de los datos iniciales. Este hecho trasladado a una matriz de perfiles permite seleccionar los vectores singulares más significativos para distinguir entre el *subespacio señal*, donde se almacena el mayor porcentaje de energía, y el *subespacio ruido*. De este modo, se consigue modelar cada blanco como un subespacio, y no solo reducir el volumen de los mismos, sino mejorar el proceso de identificación ya que las componentes de ruido serán descartadas.

Dado que los perfiles HRRP proporcionan la reflectividad del blanco en función de la distancia a la que se encuentre, solo se explotará la información contenida en la matriz U para implementar los métodos de identificación. Esto se debe a que los vectores singulares por la izquierda, u_i, expanden el subespacio vectorial en el dominio de la distancia mientras que los vectores singulares contenidos en V lo expanden en el dominio angular.

Para el desarrollo del sistema NCTI se han aplicado dos algoritmos de identificación F2 [8] y gMSM [11], basados en encontrar la aeronave que minimiza las diferencias entre el *subespacio señal* de la medida a detectar y cada uno de los *subespacios señal* de los blancos que componen la base de datos. En este estudio, los conjuntos de datos empleados son dos, la entrada al sistema o conjunto de *test*, representado a través de la letra R y el segundo constituye la base de datos o conjunto de *training*, representado mediante la letra S.

2.1.1. Algoritmo F2

Partiendo de una matriz de perfiles HRRP consecutivos y alineados a la entrada del sistema y aplicándoles una SVD se obtienen las matrices U, V y S. De la misma forma se procede con los perfiles que componen la base de datos. Puesto que no toda la información es relevante se descartarán aquellos vectores singulares pertenecientes al *subespacio ruido* tanto de la medida a identificar como del conjunto de *training*. Para seleccionar los vectores singulares que componen el *subespacio señal* se define un umbral η, el cual representa en tanto por uno el porcentaje de energía de la matriz U, como muestra la Ecuación 5.

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{K} \sigma_i}{\sum_{i=1}^{p} \sigma_i} \tag{5}$$

Teniendo en cuenta el peso de los valores singulares y el porcentaje de energía η, el *subespacio señal* estará compuesto por los K primeros vectores singulares u_i en el dominio de la distancia, mientras que el *subespacio ruido* será descartado, reduciendo las dimensiones de las matrices de trabajo. Una vez se obtienen los K vectores del *subespacio señal*, mediante la Ecuación 6 se calcula el ángulo comprendido entre el *subespacio señal* del conjunto de *test* y los K vectores singulares de cada avión del conjunto de

training. El ángulo es ponderado de manera que los valores singulares, σ_i, se encuentran asociados a cada vector singular, u_i [8].

$$F2_s(k) = \frac{1}{\sum_{j=1}^{p} \sigma_j^s} \sum_{i=1}^{k} \sigma_i^s \cdot angle(X^R, u_i^s) \; ; k = 1, \ldots, K \tag{6}$$

Finalmente, la muestra S de la base de datos que proporcione el menor ángulo comprendido entre los *subespacios señal* será el que se corresponde con el blanco iluminado R.

2.1.2. Algoritmo gMSM. *Generalized Mutual Subspace Method*

Determinar la dimensión de los subespacios analizados es una tarea ardua, por este motivo se presenta el método gMSM basado en la ponderación suave o *softweighting* de las bases del subespacio [11]. Empleando esta ponderación será posible determinar las similitudes entre el conjunto de *test* y *training*, sin necesidad de definir previamente las dimensiones como ocurre en F2 mediante el parámetro η.

En este método, para eliminar la redundancia de información existente, se aplica al conjunto de *test* y de *training* una descomposición en vectores propios. Así, siendo $X \in \Re^{N \times M}$ $(N > M)$ una matriz de perfiles, según la Ecuación 7 se obtiene, una matriz $V \in \Re^{N \times N}$ que contiene los vectores propios y una matriz diagonal $\Lambda \in \Re^{N \times N}$, la cual contiene los valores propios, λ_i.

$$X \rightarrow EV[X \cdot X^T] = V \Lambda V^T \tag{7}$$

A diferencia de F2 para definir las dimensiones de los subespacios se aplica una ponderación suave mediante un parámetro m. Éste marca el valor propio a partir del cual se ponderarán los demás. Una vez realizada la descomposición en vectores propios y seleccionando m, se obtiene un vector Ω de valores propios ponderados según la Ecuación 8.

$$\Omega = \min \left[\frac{\lambda}{\lambda_{mm}}, 1 \right] \tag{8}$$

En este caso, los *subespacios señal* tanto del conjunto de *test* como el de *training* se ponderan a diferencia de F2, donde sólo se ponderaba el *subespacio señal* del conjunto de *training*. Tras realizar esta operación, se aplica la SVD (Ecuación 1) al producto V_R^T y V_S teniendo en cuenta el vector de ponderación Ω según la Ecuación 9. De esta manera, cada uno de los valores singulares obtenidos, contenidos en la matriz diagonal Θ, representa el *coseno* de los ángulos canónicos.

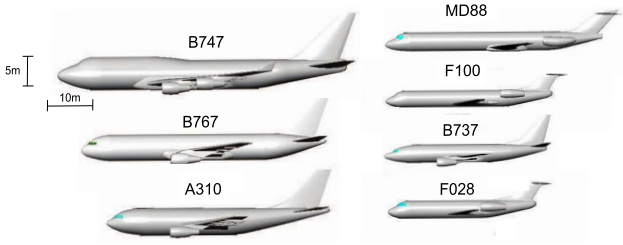
$$\Omega_R \cdot V_R^T \cdot V_S \cdot \Omega_S \quad \xrightarrow{SVD} \quad Q'_R \cdot \Theta'_{RS} \cdot Q_S^{T'} \tag{9}$$

El algoritmo decidirá qué muestra S de la base de datos se corresponde con el blanco iluminado por el radar R. En este caso, la medida de similitud entre ambos conjuntos se define a partir de la suma al cuadrado de los cosenos de los ángulos canónicos. Por lo tanto, aquella medida que presente la mayor similitud será el avión identificado.

2.2. Data sets

Para la simulación del sistema NCTI, se han empleado dos colecciones, el conjunto de *test* que constituye la medida a identificar, y el correspondiente a la base de datos, definido como conjunto de *training*. Ambos conjuntos se han poblado mediante perfiles sintéticos formados a partir de modelos CAD para siete aviones civiles, como muestra la Figura 1, en diferentes trayectorias. Los datos de las 22 trayectorias empleadas provienen de la campaña de vuelo ORFEO organizada por un grupo de trabajo de la OTAN [12]. Éstas han sido troceadas en sectores de $2.5°$ en azimut con el fin de mejorar el proceso de identificación y ampliar el número de muestras, contando finalmente con 178 sectores. Cada sector estará formado por un número variable de perfiles sintéticos consecutivos y alineados.

Figure 1. Modelos CAD empleados: Boeing B747-400, Boeing B767-300, Airbus A310-300, McDonnell Douglas MD88, Fokker F100, Boeing B737-500 and Fokker F028



	Longitud (m)	Envergadura (m)	Altura (m)
B747-400	70.66	64.44	16.79
B767-300	54.22	47.52	14.77
A310-300	46.66	43.90	12.74
MD88	45.10	32.80	7.43
F100	35.53	28.08	6.58
B737-500	31.10	28.90	9.73
F028	29.61	25.07	6.62

El proceso se ha llevado a cabo comparando una secuencia de perfiles para obtener más información sobre la posición de los centros de dispersión dominantes y su evolución a lo largo de las trayectorias descritas. A partir de los modelos CAD se han generado simulaciones electromagnéticas mediante la herramienta de software FASCRO [13], desarrollada por la Universidad de Alcalá (UAH) y posteriormente optimizada y adaptada por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). FASCRO está destinada a la predicción de la RCS de diferentes tipos de blancos y hace uso de PO y PTD para simular diversos efectos producidos en superficies curvas y planas. Las simulaciones se han realizado considerando las aeronaves como conductores eléctricos perfectos sin incluir en los modelos cavidades, antenas y otros pequeños salientes del fuselaje.

El principal inconveniente de comparar simulaciones electromagnéticas en lugar de HRRPs reales es la implicación de un entorno ideal de identificación, ya que el conjunto de *test* y el de *training* poseen relaciones similares de señal-ruido (SNR). Mientras que las medidas reales pueden estar contaminadas con ecos procedentes de otros blancos próximos, señales de objetos indeseados, ruido y otras posibles interferencias; los perfiles sintéticos poseen una firma radar muy limpia. Por lo tanto, con el objetivo de analizar las prestaciones del sistema en un escenario real, se ha realizado un segundo estudio añadiendo ruido al conjunto de *test*. De esta manera, se consigue modificar la señal de entrada del sistema con efectos indeseados y simular así un entorno real de clasificación.

3. Procedimiento y resultados

Cada una de las matrices de perfiles de los blancos que componen el conjunto de *test* ha sido comparada con la información contenida en la base de datos siguiendo la metodología presentada en

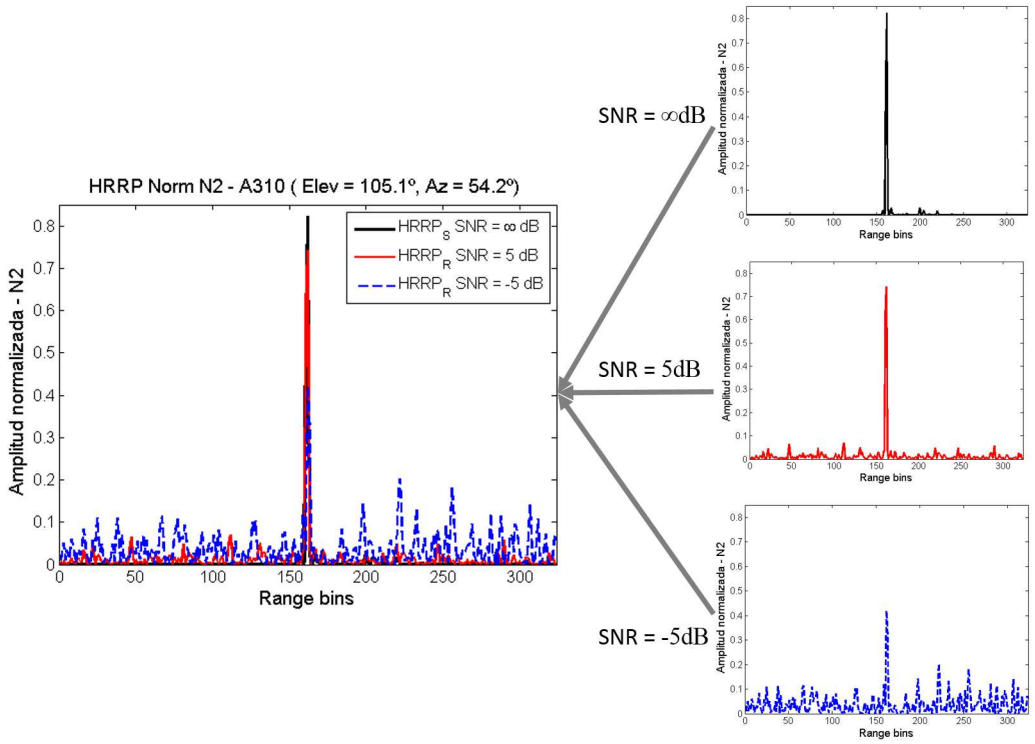
la sección anterior. Los resultados obtenidos en el proceso serán analizados con el objetivo de que el sistema sea lo más preciso posible y pueda ser considerado, al obtener altas tasas de reconocimiento, como un identificador con un cierto nivel de confianza.

En este artículo, para equiparar los perfiles de forma que exista una característica común en todos ellos se ha aplicado la técnica de normalización *L2-norm* [6]. De esta manera, el proceso se establece de forma independiente a las amplitudes de los centros de dispersión dominantes de cada perfil HRRP.

Con el fin de determinar las dimensiones de los *subespacios señal* y de esta manera descartar el *subespacio ruido*, se han realizado dos estudios paramétricos para obtener los valores óptimos del umbral de energía η y la variable de ponderación m. Al escoger $\eta = 0.90$ para F2 y $m = 2$ para gMSM se establece un compromiso entre el *subespacio señal* obtenido y las tasas de acierto.

Debido a la naturaleza sintética de los perfiles, se han llevado a cabo dos casos de estudio para validar el comportamiento de los algoritmos. En primer lugar, el proceso de identificación se ha realizado sin añadir ruido al conjunto de *test*. Dado que ambos conjuntos poseen la misma naturaleza y las medidas son muy limpias se ha obtenido el 100% de aciertos para los dos algoritmos. En estos términos, con el objetivo de simular un escenario de actuación real, un segundo estudio se ha llevado a cabo introduciendo ruido a la entrada del sistema. Siete valores de relación señal-ruido, (-10dB, -5dB, -3dB, 0dB, 3dB, 5dB, 10dB), han sido analizados para determinar cuál de los algoritmos presentados proporciona mayor robustez frente a éste. La adición del ruido implica que exite mayor diferencia entre el conjunto de *test* y el de *training*, un ejemplo de ello se muestra en la Figura 2 donde tres perfiles de un Airbus A310 para un determinado ángulo de aspecto se han representado.

Figure 2. Diferencias entre el conjunto de *Test* y de *Training*



Como se observa en la Figura 2, el centro de dispersión dominante disminuye cuanto menor es la relación señal-ruido y además, aparecen componentes de ruido indeseadas donde antes no había que

pueden ser confundidas con otros centros de dispersión. Por lo tanto, para pequeños valores de SNR, mayores diferencias se producen entre el conjunto de *test* y el de *training* reduciendo las tasas de acierto. Por el contrario, una mayor SNR implica menores diferencias entre los conjuntos, y por ello se obtendrán tasas de identificación más elevadas.

Los resultados obtenidos para las 22 trayectorias divididas en sectores de 2.5° de azimut al aplicar ruido al conjunto de *test* para $\eta = 0.90$ y $m = 2$ se recogen en la Tabla 1. Teniendo en cuenta el carácter aleatorio del ruido, se han realizado 20 experimentos para cada caso de estudio; los resultados de la Tabla 1 constituyen la media de los mismos.

Table 1. Tasas de reconocimiento (%) para los diferentes casos de SNR

	-10dB	**-5dB**	**-3dB**	**0dB**	**3dB**	**5dB**	**10dB**	**∞dB**
$F2$	87.48	90.69	92.46	94.62	96.23	96.79	98.48	100
$gMSM$	91.63	93.98	96.23	97.11	98.63	98.15	98.88	100

Los resultados mostrados en la Tabla 1 han sido obtenidos a partir de las métricas descritas en las Ecuaciones 6 y 9. Como se esperaba, al aumentar el valor de SNR, mayor es el parecido entre la base de datos y el conjunto de *test*, y por ello aumenta la tasa de reconocimiento. Sin embargo, al disminuir la SNR, el número de aciertos es menor ya que existe más información indeseada. A pesar de que los resultados no se ven severamente modificados por el ruido, para los dos algoritmos presentados se obtienen peores tasas de éxito al disminuir la SNR. Aun así, observando la Tabla 1, para el algoritmo $F2$ esta disminución es mayor que para el método $gMSM$. Por lo tanto, se obtienen mejores resultados de clasificación cuando los subespacios de los conjuntos de *test* y de *training* se definen mediante una ponderación suave. Este hecho implica no solo una mejora de las tasas de reconocimiento para los siete aviones analizados sino una demostración de la robustez de los métodos para el sistema NCTI en un posible escenario real.

4. Conclusiones

En este artículo se han presentado dos algortimos de identificación basados en la SVD para estudiar las prestaciones de un sistema NCTI, enfrentando en él perfiles sintéticos contra perfiles sintéticos. La SVD permite reducir la información de los datos originales mediante cambios de base ortonormales; de esta manera solo se explotan las características más significativas mejorando así el proceso de identificación. El éxito alcanzado se debe a la naturaleza sintética de las medidas y es por este motivo, por el cual se han realizado diversas pruebas con el fin de intentar aproximar el escenario de actuación a uno real.

Como se ha visto, en este trabajo se han comparado perfiles sintéticos con una base de datos de la misma naturaleza. Mientras que los datos reales sufren diferentes efectos no desados, las simulaciones poseen una firma radar muy limpia ya que provienen de un entorno ideal. De esta forma, con el objetivo de analizar la fiablidad del sistema en un entorno de actuación real se han añadido diferentes valores de relación señal-ruido a la entrada del sistema. Independientemente del valor de SNR ha sido posible demostrar que aplicando una ponderación a los subespacios, las tasas de acierto obtenidas en el proceso

son elevadas. Por otro lado, la aplicación de una ponderación suave mediante el algortimo gMSM a ambos cojuntos de datos proporciona una mejora de las mismas.

Considerando las diferencias entre ambos conjuntos una vez que se ha añadido ruido a la entrada, los resultados obtenidos en la identificación son prometedores cuando se aplican los dos algoritmos, siendo más robusto el método gMSM. Las pruebas se han llevado a cabo aplicando únicamente ruido al conjunto de *test*; un desalineamiento de los perfiles para simular el movimiento traslacional de los blancos, además de la adición del ruido, implicaría una mejor aproximación del proceso a un entorno real. Las investigaciones futuras se centrarán en la implementación del sistema añadiendo el desalineamiento mencionado y la comprobación de las hipótesis propuestas al emplear medidas reales.

Referencias

1. Cohen, M.N. An overview of radar-based, automatic, noncooperative target recognition techniques. *Systems Engineering, IEEE International Conference on* **1991**, 29-34.
2. Wehner, D.R. *High-Resolution Radar*; 2nd ed.; Artech House; Norwood, USA, 1995; 197-237.
3. Chen, L.; Chen, R. A new radar target recognition method based on complex high resolution range profiles. *Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), International Conference on* **2012**, *2*, 1-4.
4. Bhatnagar, V.; Shaw, A.K.; Williams, R.W. Improved automatic target recognition using singular value decomposition. *Acoustics, Speech and Signal Processing. Proceedings of the IEEE International Conference on* **1998**, *5*, 2717-2720.
5. Zhou, D.; Shen, X.; Liu, Y. Nonlinear subprofile space for radar HRRP recognition. *Progress in Electromagnetics Research Letters* **2012**, *33*, 91-100.
6. Du, L.; Liu, H.; Bao, Z.; Zhang, J. Radar automatic target recognition using complex high-resolution range profiles. *Radar, Sonar & Navigation, IET* **2007**, *1*, 18-26.
7. Jurado-Lucena, A.; Errasti-Alcalá, D.; Escot-Bocanegra, D.; Fernández-Recio, R.; Poyatos-Martínez, D.; Montiel-Sánchez, I. Methodology to Achieve Accurate Non Cooperative Target Identification Using High Resolution Radar and a Synthetic Database. *Trends in Applied Intelligent Systems* **2010**, 427-436.
8. López-Rodríguez, P.; Escot-Bocanegra, D.; Fernández-Recio, R.; Bravo, I. Non-Cooperative Target Recognition by Means of Singular Value Decomposition Applied to Radar High Resolution Range Profiles. *Sensors* **2015**, *15.1*, 422-439.
9. Golub, G.H.; Loan, C.F.V. *Matrix Computations*; Third ed.; The Johns Hopkins University Press; Baltimore, USA, 1996; 69-75.
10. Lee, K.C.; Ou, J.S.; Fang, M.C. Application of SVD noise-reduction technique to PCA based radar target recognition. *Progress In Electromagnetics Research* **2008**, *81*, 447-459.
11. Kobayashi, T. Generalized Mutual Subspace Based Methods for Image Set Classification. *Computer Vision - ACCV* **2012**, *7724*, 578-592.
12. Heiden, R.V.D.; Vries, J. *The ORFEO Measurement Campaign*; TNO Defence, Security and Safety Report, 1996.
13. Perez, J.; Catedra, M.F. Application of physical optics to the RCS computation of bodies modeled with NURBS surfaces. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* **1994**, *42*, 1404-1411.

Estudio del impacto producido por la variación de parámetros en las prestaciones de un radar LPI

Valles Castro, Antonio [1,*] y Valles Cancela, Jose Ignacio [2]

[1] Centro de Medidas Electromagnéticas (CEMEDEM). Escuela Naval Militar (ENM).
Email: avallesc@fn.mde.es

[2] Fragata Blas de Lezo; Email: jvalc11@fn.mde.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: avallesc@fn.mde.es

---

Abstract:. Uno de los inconvenientes de los radares de pulsos tradicionales es su indiscreción, que los pone en desventaja con respecto a los receptores de Guerra Electrónica (GE). Los radares de baja probabilidad de interceptación (LPI) nacen con la idea de diseñar unos sistemas menos susceptibles a la interceptación por parte de los equipos de GE. En este estudio se utilizarán las características más típicas de los sistemas existentes tanto de radares LPI como de receptores de GE y se concluirá como la variación de algunas de las características del radar puede reducir drásticamente su comportamiento LPI.

Keywords: LPI; radar FMCW; ESM; factor de ventaja; distancia de interceptación, distancia de detección.

---

1. Introducción

En la guerra naval moderna y en un escenario de crisis es fundamental denegar al enemigo el conocimiento tanto de la posición como de las capacidades de los sistemas propios instalados a bordo. Para ello se desarrollan procedimientos tácticos encaminados al ocultamiento de esa información al enemigo. Durante la Segunda Guerra Mundial, se produjo el desarrollo de uno de los sistemas más importantes en la guerra naval moderna y que significó un cambio radical en la táctica a emplear por las fuerzas navales: el radar.

En un principio, el radar fue pensado para la detección de aeronaves durante la Guerra de Inglaterra, pero su desarrollo naval trajo consigo que se hiciera imprescindible para las operaciones navales.

Permitió a los buques conocer en tiempo real y en todo tiempo la situación aérea y de superficie a distancias mayores que las visuales, que eran las utilizadas hasta ese momento. Sin embargo, el inconveniente del radar es su indiscreción. Al ser un sistema que emite energía de radiofrecuencia al aire, es susceptible de ser localizado, con lo que la capacidad de denegación de información al enemigo queda anulada.

Paralelo al desarrollo del radar, aparece la *Guerra Electrónica* (GE), y con ella los receptores *Electronic Support Measures* (ESM), cuyo objeto es el de interceptar e identificar las emisiones de los radares. Con la identificación de estas emisiones y una adecuada inteligencia, se puede conocer la plataforma donde van instalados los radares. El enemigo tiene entonces la posibilidad de conocer la información de posición y las capacidades de los sistemas del buque con el consiguiente perjuicio táctico que ello conlleva. Estos receptores de ESM tienen una ventaja fundamental sobre los radares: las distancias de interceptación que consiguen son mayores que las distancias de detección de los radares, porque el receptor ESM intercepta la señal en un solo camino, mientras que los radares trabajan con caminos de ida-y-vuelta, por lo que su potencia de transmisión debe ser elevada.

Adicionalmente, la aparición de los *misiles antirradiación* (ARM) que se dirigen a las fuentes de radiación, así como el desarrollo de novedosas técnicas *stealth* (o de reducción de la firma radar de buques y aeronaves), hacen que la capacidad operativa de los radares tradicionales y los sistemas de armas asociados sea cuestionada.

En este contexto, aparecen los radares de *Baja Probabilidad de Interceptación* (*Low Probability of Intercept*, LPI) con el objeto de contrarrestar la ventaja de los receptores ESM. En los últimos años, el desarrollo de este tipo de radares para aplicaciones militares ha sido muy importante. Hoy en día, todas las Marinas desarrolladas tienen instalados en sus buques radares LPI que, en teoría, logran solventar el problema de la ventaja del equipo ESM sobre el radar. Es decir, la máxima vigente en la actualidad es: "*To see and not be seen*" [1].

En este trabajo se pretende realizar un estudio teórico-práctico de los diferentes parámetros de diseño de los radares LPI. Se estudiará cómo la variación de los parámetros afecta a la capacidad LPI de los radares y se hará una comparativa de cómo pueden modificar drásticamente el factor de ventaja con respecto a un receptor ESM. En primer lugar, se planteará el problema de la ventaja del equipo ESM sobre el radar. A continuación se repasarán las distintas técnicas aplicables para la implementación de los radares LPI y se hará un estudio teórico del radar de onda continua modulado en frecuencia (FMCW). Por último, se realizará un estudio comparativo de las prestaciones LPI de diferentes radares teniendo en cuenta los parámetros más típicos tanto de los radares como de los equipos ESM más comunes.

2. Planteamiento del problema

Para poder visualizar el problema inherente a la indiscreción de los radares, se va a plantear un ejemplo comparativo con un radar de pulsos comercial y un receptor ESM.

Si despreciamos las pérdidas de propagación, un equipo interceptador con una antena de ganancia G_i recibirá una señal que viene dada por la siguiente expresión [2]:

$$S_i = \frac{P.G_r.G_i\,\lambda^2}{(4\pi)^3 R_i^2} \tag{1}$$

Donde P es la potencia de transmisión del radar, G_r es la ganancia de la antena del equipo de radar y R_i la distancia a la que se encuentra el equipo interceptador. Esta ecuación no tiene en cuenta el factor de propagación (que en espacio libre es 1) ni las pérdidas de polarización, ya que se supone que las polarizaciones del transmisor y del receptor están adaptadas. Para los equipos de interceptación ESM se considera que su sensibilidad (S_i) se mueve en el rango de -35 a -85 dBm, con una ganancia de antena $G_i = 0$ dB.

La señal recibida por el radar, considerando un blanco de sección equivalente radar σ, viene dada por la expresión [2]:

$$S_r = \frac{P.G_r^2.\lambda^2.\sigma}{(4\pi)^3 R_r^4} \tag{2}$$

Aplicando estas a los datos de un radar comercial de 10 kW de potencia, un blanco de RCS $\sigma = 30$ dBsm y una sensibilidad de -81 dBm, se obtienen los resultados de la figura 1. Como se puede ver, a partir de una distancia de aproximadamente 2 km, la señal recibida por el equipo ESM es mayor.

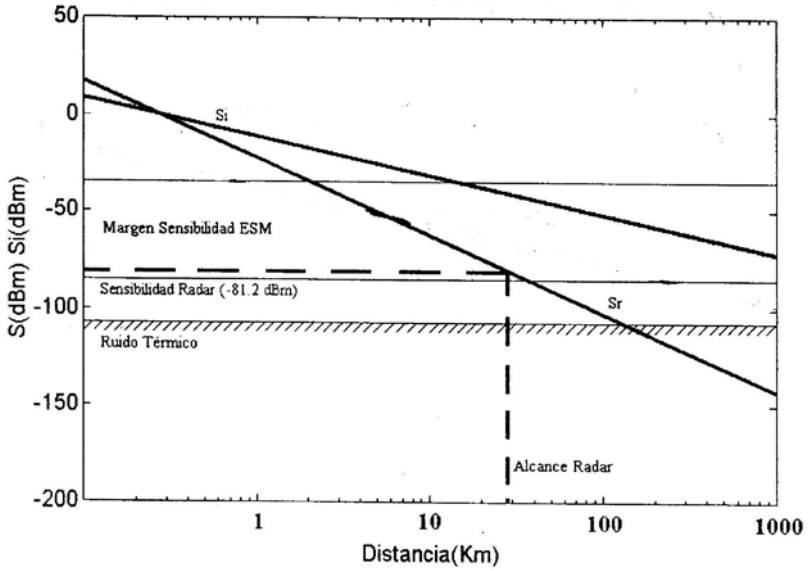


Figura 1. Alcance e interceptabilidad de un radar marino

Para compensar la ventaja del equipo ESM sería necesario que el radar transmitiera con una potencia menor, lo que significa que, para conseguir los mismos alcances de detección, sería necesario mejorar la ganancia de proceso del radar. La figura 2 lo muestra de una forma más intuitiva. Se puede apreciar que la ventaja del equipo de interceptación es evidente. Antes de que el radar pueda detectar la plataforma donde está instalado el equipo ESM, éste ya habrá interceptado la emisión del radar. La relación entre las dos distancias se llama ***Factor de ventaja*** y suele ser mayor que 1.

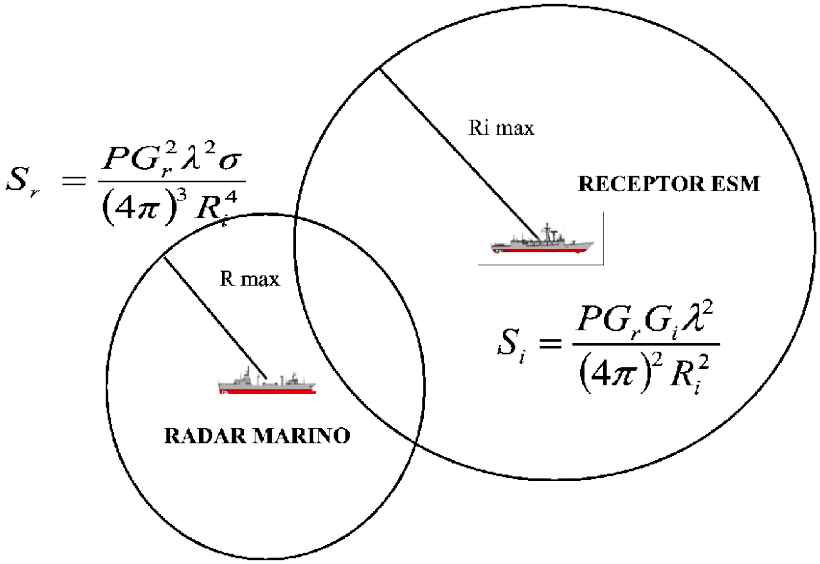


Figura 2.- Ventaja del equipo interceptador ESM

Los radares LPI aparecen para contrarrestar la ventaja táctica inherente a los receptores ESM contra los radares de pulsos tradicionales, de manera que la distancia de detección sea mayor que la de interceptación. De esta forma, el radar detectará la plataforma que contiene el receptor ESM, antes de que el equipo ESM intercepte la emisión del radar.

3. Técnicas para implementación de radares LPI

Para ayudar a una mejor comprensión de la problemática que nos ocupa, a continuación se darán unas ideas sobre las diferentes técnicas utilizadas en los sistemas de radar LPI.

(i.) *Utilización de radares biestáticos o multiestáticos:* En realidad no son radares LPI en el sentido estricto de la palabra. Son radares que no pretenden evitar la interceptación si no dificultar la neutralización del sistema situando el transmisor en zona protegida y aprovechar las características pasivas del receptor para ocultarlo.

(ii.) *Limitación de las emisiones espacial y temporalmente*: Se debe transmitir exclusivamente la potencia requerida por cada dirección espacial y sólo en el intervalo de tiempo imprescindible que garantice las condiciones de detección adecuadas. Son especialmente adecuados los radares multifunción dado que no transmiten una señal constante e indiscriminadamente en todas las direcciones del espacio.

(iii.) *Transmisiones difíciles de detectar por los receptores ESM:* Utilización de portadoras en bandas milimétricas donde hay pocos equipos receptores de ESM, efectuar transmisiones con frecuencia ágil o impedir la integración de pulsos con frecuencias de repetición de pulsos aleatorias.

(iv.) *Utilización de técnicas de espectro ensanchado:* Utilización de señales muy complejas, por ejemplo pulsos modulados internamente en fase mediante códigos pseudoaleatorios, que

permitan obtener ganancias de proceso muy elevadas en el receptor radar y por lo tanto disminuir la potencia radiada.

(v.) *Utilización de antenas con bajos lóbulos laterales:* Normalmente las antenas tienen lóbulos laterales del orden de 20 dB por debajo del valor del lóbulo principal. Para evitar la detección se implementan antenas que tienen al menos 30 dB por debajo del valor del lóbulo principal. La probabilidad de interceptación por los lóbulos laterales se ve reducida significativamente.

(vi.) *Radares pasivos*: Son radares que no tienen transmisor. El receptor recoge las reflexiones sobre el blanco causadas por las emisiones de estaciones comerciales de radio y televisión. Necesita un equipo con gran capacidad de proceso que correlacione las señales recibidas con una gran base de datos, calcule la posición del blanco y realice su seguimiento. Actualmente están en proceso de investigación.

(vii.) *Radares de onda continúa:* Este tipo de sistemas maximiza el tiempo de observación del blanco lo que significa una gran ganancia de proceso que permite una reducción considerable de la potencia transmitida y por lo tanto una importante disminución en la distancia de interceptación de un receptor ESM. En la actualidad los radares de onda continua modulados en frecuencia (FMCW) son los más utilizados.

4. Radares de onda continúa modulados en frecuencia

Los radares de onda continua modulados en frecuencia (o *FMCW*) son radares potencialmente adecuados para configurarse como LPI debido a que maximizan el tiempo de iluminación. Hasta hace pocos años, se habían utilizado en aplicaciones de corto alcance y detección de un único blanco. En la actualidad, el desarrollo de las técnicas de radiofrecuencia (RF) y el avance de los sistemas digitales permite mayores prestaciones, así como superar las limitaciones inherentes a este tipo de radares. Entre otras ventajas, estos equipos disponen de:

- Alta precisión en alcances cortos (especialmente diseñados para radares de superficie y navegación).
- Potencia de transmisión mucho más baja que los radares de pulsos con las mismas prestaciones.
- Mayor resistencia a las interferencias que los radares de pulsos.

Por otro lado, cuentan con las siguientes limitaciones:

- Alcances limitados por el aislamiento entre el transmisor y receptor, lo que obliga a utilizar dos antenas en muchos casos.
- Los blancos son más difíciles de discriminar que en los radares de pulsos, que se basan en los diferentes retardos asociados a su separación espacial.

Para la obtención de la distancia es necesario marcar de alguna manera la señal de onda continua transmitida. Para ello a la onda continua (*CW*) se le introduce una modulación en frecuencia (*FM*) que permite conocer la distancia a un blanco comparando la frecuencia de la señal transmitida y recibida.

Esta diferencia en frecuencia se mide utilizando un mezclador donde la señal recibida se mezcla con una muestra de la señal transmitida, obteniendo una *frecuencia de batido*. Esta señal, adecuadamente amplificada y filtrada, se presenta en un indicador que nos proporciona la distancia en función de la frecuencia de la señal. Normalmente la modulación en frecuencia que se aplica es lineal, lo que permite de una manera sencilla la medida de la frecuencia utilizando procesadores digitales basados en la transformada rápida de Fourier (FFT).

En la figura 3 se puede ver un diagrama de bloques de un radar de onda continua *FMCW*. Dado que transmite de forma constante, el sistema suele disponer de dos antenas, una para transmisión y otra para recepción. La señal recibida se bate en el mezclador con una muestra de la señal transmitida, generando la frecuencia de batido f_b. La salida del mezclador se aplica posteriormente a un banco de filtros FFT, cuya respuesta es, a su vez, integrada y tratada como video para su posterior presentación.

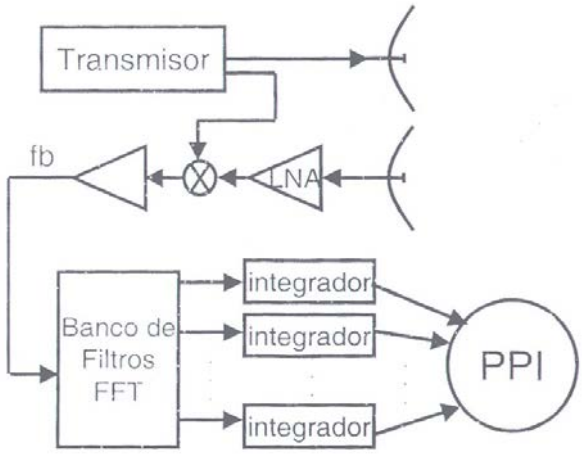


Figura 3.- Diagrama de bloques de un radar FMCW

4.1. Forma de onda de la señal transmitida

La señal transmitida por un radar FMCW está definida por la expresión:

$$v(t) = Ae^{j(2\pi f_c t + \frac{\pi \Delta f t^2}{T})} \tag{3}$$

Donde *A* es la amplitud de la señal, f_c es la frecuencia de la portadora, Δf es el barrido de frecuencia y *T* el periodo del barrido. La figura 4 muestra la señal resultante (denominada comúnmente *diente de sierra* o *chirp*). La frecuencia instantánea en el dominio del tiempo se obtiene diferenciando la expresión en el paréntesis de (3), para obtener (4) y (5), siendo α la pendiente del barrido en frecuencia:

$$2\pi f_i = \frac{d}{dt}\left(2\pi f_c t + \frac{\pi \Delta f t^2}{T}\right) = 2\pi f_c + \frac{2\pi \Delta f t}{T} = 2\pi f_c + 2\pi \alpha t \tag{4}$$

$$f_i = f_c + \alpha t \tag{5}$$

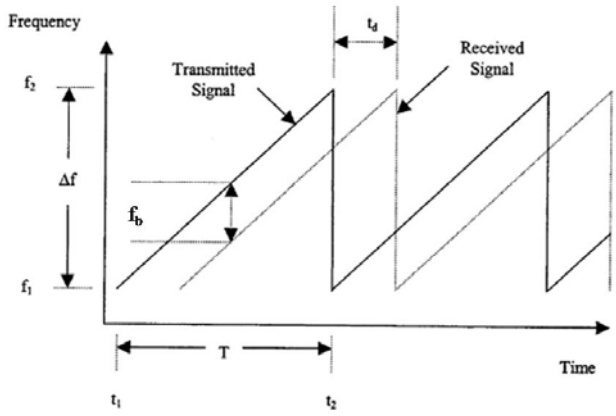


Figura 4.- Forma de onda de un radar FMCW

4.2 Resolución en distancia y alcance máximo

Para determinar la distancia a un blanco determinado, el radar FMCW mezcla la señal recibida con una muestra de la señal transmitida. Esto nos da una frecuencia de batido, f_b, que es la diferencia entre las dos frecuencias. Por tanto, la salida del mezclador se regirá por la expresión (6):

$$y(t) = A_t e^{j(2\pi f_c t + \frac{\pi \Delta f t^2}{T})} * A_r e^{-j\left[2\pi f_c (t-t_d) + \frac{\pi \Delta f (t-t_d)^2}{T}\right]} = A_t A_r e^{j(2\pi \Delta f t_d + \frac{2\pi \Delta f t_d t}{T} + \frac{\pi \Delta f t_d^2}{T})} \quad (6)$$

Diferenciando el contenido del paréntesis de la expresión anterior obtenemos la frecuencia de batido (ec. (7)-(8)), con lo que se puede calcular la distancia a un blanco, que vendrá dada por la ecuación (9).

$$2\pi f_b = \frac{d}{dt}\left(\frac{2\pi \Delta f t_d t}{T}\right) = \frac{2\pi \Delta f t_d}{T} \quad (7)$$

$$f_b = \frac{\Delta f t_d}{T} = \frac{\Delta f \; 2R}{Tc} \quad (8)$$

$$R = \frac{f_b T c}{2\Delta f} \quad (9)$$

El radar recibirá una componente en frecuencia por cada uno de los blancos detectados. En caso de tener varios blancos de forma simultánea, estas señales se convierten en una forma de onda compleja a la salida del mezclador. El método de filtrado más común consiste en pasar la señal por un convertidor analógico digital y realizar la transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform, FFT*). Por tanto, el tamaño de las celdas de distancia dependerá de la resolución con la que podamos separar las componentes. Sin embargo, la resolución no depende realmente del número de puntos que tomemos en la FFT, sino del tamaño de las ventanas que vayamos procesando, que a su vez será la inversa del período de modulación del barrido (*T*). El número de celdas de distancia que podíamos distinguir será la mitad de puntos que se tomen en la FFT.

La resolución en distancia está relacionada con la resolución en las frecuencias de batido Δf_b de acuerdo a (10). Siendo Δf_b la inversa del periodo de barrido, la ecuación (10) se convertirá en (11).

$$\Delta R = \frac{cT}{2\Delta f}\Delta f_b \tag{10}$$

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta f} \tag{11}$$

Por último, el alcance máximo del sistema para un blanco de una determinada sección equivalente radar (*RCS*) está definido por la ecuación radar definida en (12) [3].

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{PG^2\lambda^2\sigma}{(4\pi)^3 S_{min}}} \tag{12}$$

4.3 Distancia máxima instrumental

La distancia máxima instrumental de un radar hace referencia al rango máximo que puede ser procesado (y por tanto, presentado por el sistema). Por tanto, a todos los efectos, supone un límite superior en la distancia máxima detectable. Se calcula en función de la frecuencia de muestreo (f_m), que, a su vez, dependerá de la frecuencia de batido máxima ($f_{b\ max}$). Por tanto, si n_f representa el número de celdas de distancia, y *PRF* el inverso del período *T*, la frecuencia de muestreo vendrá dada por (13). A su vez, la frecuencia de batido máxima ($f_{b\ max}$) está limitada por el teorema de Nyquist a la mitad de la frecuencia de muestreo (f_m), según se muestra en (14), por lo que, si sustituimos la frecuencia de batido máxima en la ecuación (10) tendremos la máxima distancia instrumental del radar, es decir la máxima distancia en la que los blancos pueden ser procesados, cuya expresión completa se muestra en (15).

$$f_m = \frac{2n_f}{T} = 2n_f PRF \tag{13}$$

$$f_{b\ max} = \frac{f_m}{2} \tag{14}$$

$$R_{max} = \frac{cT}{2\ \Delta f} f_{b\ max} \tag{15}$$

4.4 Ganancia de proceso

Uno de los parámetros más importantes a la hora de diseñar un radar LPI es la *ganancia de proceso* (G_p). Esta ganancia permite reducir la potencia transmitida y por lo tanto disminuir la distancia de interceptación del equipo de ESM, sin sacrificar la distancia máxima de detección.

La ecuación (12) muestra cómo uno de los parámetros que más influye en la distancia de detección del radar es la señal mínima necesaria (S_{min}) para poder detectar un blanco con una determinada probabilidad de detección y de falsa alarma. Esta señal mínima necesaria se puede calcular a través de

(16), suponiendo un factor de ruido *F*, unas pérdidas del sistema *L* y una relación señal ruido *(S/N)* dada para una probabilidad de detección (P_d) y de falsa alarma (P_{fa}), donde el ruido a aplicar es el que entraría por uno de los filtros de distancia.

$$S_{min} = KT_0\,\Delta f FL\,\frac{1}{\boldsymbol{G_p}}\left(\frac{S}{N}\right)_{P_d,P_{fa}} \tag{16}$$

La ganancia de proceso se define según (17), donde *n* es el número de pulsos integrados [3], dado por (18), θ_B es el ancho de haz de la antena, f_p es la frecuencia de repetición del barrido (en Hz) y ω_m la velocidad de giro de antena (expresada en r.p.m.).

$$G_p = n\frac{\Delta f}{\Delta \mathrm{f_b}} = n\Delta f T \tag{17}$$

$$n = \frac{\theta_B f_p}{6\,\omega_m} \tag{18}$$

Por tanto, las expresiones anteriores muestran que la ganancia de proceso no es más que el producto ancho de banda-tiempo de iluminación del blanco. Si sustituimos (17) en (16) obtenemos la expresión final de la señal mínima necesaria, que viene dada por la ecuación (19).

$$S_{min} = kT_0\,\frac{1}{T}FL\,\frac{1}{n}\left(\frac{S}{N}\right)_{P_d,P_{fa}} \tag{19}$$

5. Radar vs. interceptador ESM. Factor de ventaja

La relación entre la distancia a la que un equipo receptor de ESM intercepta la señal de un radar y la distancia a la que el radar detecta la plataforma donde va instalado ese equipo ESM, es lo que se denomina el *Factor de Ventaja* (RAF) [2]. Tradicionalmente, este parámetro toma valores mayores que la unidad, y se define según la ecuación (20) [4].

$$\frac{R_{imax}}{R_{Rmax}} = R_{Rmax}\sqrt{\frac{4\pi G_t' G_I S_{rmin}}{\sigma G_t G_r S_{imin}}} \tag{20}$$

Donde $R_{i\,max}$ es el alcance máximo del interceptador, $R_{R\,max}$ es el alcance máximo del radar, G_t' es la ganancia de la antena del radar en la dirección del equipo interceptador, G_i es la ganancia de la antena del interceptador, G_t es la ganancia de la antena del radar en transmisión, G_r es la ganancia de la antena del radar en recepción y σ la sección equivalente radar del blanco.

El factor de ventaja es un parámetro fundamental en Guerra Electrónica a la hora de evaluar las capacidades de un equipo receptor ESM. Estos receptores tienen ventaja sobre el radar debido principalmente a que el radar es un sistema en que la señal es de ida y vuelta por lo que la potencia de transmisión tiene que ser mayor. En cambio, el equipo ESM, al ser un receptor, intercepta la señal

únicamente en el camino de ida. Aunque la sensibilidad del receptor ESM es bastante menor que la del radar, no lo es en cantidad suficiente para que el factor de ventaja sea menor que 1.

Las técnicas LPI intentan cambiar este escenario y conseguir que el factor de ventaja sea favorable al radar. Es fundamental la reducción de la potencia transmitida, ya que este es el parámetro que más influye en la distancia de interceptación, pero también es el más influyente en la distancia de detección del radar. Para reducir la potencia manteniendo la misma distancia de detección, es necesario aumentar la ganancia de proceso de manera que la reducción de la potencia se vea compensada con el aumento de la ganancia de proceso. A su vez, como se ha analizado en el apartado 4.4, la ganancia de proceso influye en la mínima señal necesaria para conseguir una la detección de un blanco (S_i). Los radares LPI son capaces de trabajar con potencias de transmisión reducidas y con S_i muy bajas, del orden de -130 dBm, debido a que tienen unas ganancias de proceso muy altas.

Por tanto, siempre y cuando el RAF sea menor que uno podremos decir que el radar es verdaderamente LPI y que en un escenario de crisis tendrá ventaja sobre el equipo de ESM.

6. Estudio del comportamiento LPI

A continuación se analizarán las características LPI de diferentes tipos de radares. Para ello veremos el RAF con diferentes configuraciones, teniendo en cuenta los parámetros de diseño de los radares, así como valores de RCS típicas de plataformas actuales que llevan instalados equipos ESM.

Para el cálculo del factor de ventaja es necesario conocer las distancias de detección del radar y de interceptación del equipo ESM, así como tener en cuenta el concepto de *horizonte radar* [5]. Muchas de las distancias que aparecen en las diferentes tablas son superiores al horizonte radar de los equipos instalados a bordo de buques. Sin embargo, cabe tener en cuenta que existen aeronaves con equipos receptores de ESM, lo que significa que, cuando éstas se elevan en altura, el horizonte radar aumenta de forma considerable, con lo que las distancias de interceptación aplicables son más elevadas.

A modo de ejemplo, la tabla 1 muestra diferentes distancias de horizonte radar en función de la altura del equipo receptor, suponiendo un transmisor situado a una altura de 27 metros.

Altura antena TX (m)	**Altura antena RX (m)**	**Horizonte radar (millas náuticas, mn)**
27	25	22,69
27	1000	81,94
27	3000	133,47
27	10000	234,12

Tabla 1. Horizonte radar

6.1. Radar SCOUT

Quizás sea éste el radar FMCW más conocido y referenciado y del que se pueden conocer más datos. Su antecedente es el PILOT que se desarrolló a partir de 1984. Es el primer radar LPI de navegación y en él se recogían los trabajos realizados por *A. G. Stove* en los *Philips Research Laboratories* en el Reino Unido. En estos laboratorios se realizaban actividades de investigación y desarrollo en el aérea de microondas aplicadas a la defensa. Durante años se desarrollaron en estos laboratorios técnicas de FMCW aplicadas a guiado terminal de armas, radares anticolisión y radares tácticos. El SCOUT tiene las características típicas de este tipo de radares y es por ello por lo que se ha utilizado como primera aproximación para el estudio de las características y el comportamiento LPI de los radares. Sus características se resumen en la tabla 2.

PARAMETRO	VALOR	OBSERVACIONES
Frecuencia	9.2-9.4 GHz	
Barrido de frecuencia	54 (máx.) 1.68 (min) MHz	
Escala	0.75 (min) a 24 (máx.) MN.	
Potencia	1-10-100 mw y 1 w	
Resolución	2.8 (máx.) a 89 (min) metros	
Periodo del barrido	1 ms	
Figura de ruido	4.5 dB	
S/N	12 dB	Estimado
Ganancia antena	29.5 dB	
Polarización	Horizontal	
Velocidad de rotación	20 rpm	
Ancho haz vertical	20º	
Ancho haz horizontal	1.4º	
Nº celdas	512	
Nº pulsos a integrar	11	Calculado
S min	-131.88 dB	Calculado
Gp (máx.)	57.7 dB	Calculado
Frecuencia de muestreo	1.024 MHz	Calculado
Rmax instrumental	24.57 MN	Calculado

Tabla 2. Parámetros del radar SCOUT

Conociendo los datos del radar, es posible calcular la distancia máxima de detección para las RCS de varios tipos de buques y aeronaves. La diferencia entre buques de casco antiguo y buques de diseño moderno, es que en los buques más modernos la RCS está optimizada y es menor. Estos datos se pueden ver en la tabla 3, donde las celdas sombreadas corresponden a potencias de transmisión no implementadas por el radar pero que nos permiten ver la influencia de la potencia transmitida en las prestaciones LPI de un radar.

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
1 mW	10,38	4,91	6,55	8,74	1,74	1,85
10 mW	18,47	8,74	11,65	15,54	3,1	3,28
100 mW	32,84	15,54	20,72	27,63	5,51	5,84
1 W	58,4	27,63	36,85	49,13	9,8	10,38
3 W	76,85	36,36	48,49	64,67	12,9	13,67
10 W	103,85	49,13	65,52	87,36	17,43	18,47

Tabla 3. Distancia máxima de detección en millas náuticas

Para el cálculo de la distancia de interceptación del equipo de ESM vamos a emplear las características más típicas de los equipos receptores de ESM, distinguiendo entre dos tipos de receptores: Los de *Medida Instantánea de Frecuencia* (IFM) y los *Superheterodinos* (SH). Las distancias de interceptación para cada uno de ellos se muestran en la tabla 4.

POTENCIA Tx radar	IFM	SH
1 mW	0,14	0,78
10 mW	0,44	2,45
100 mW	1,38	7,76
1 W	4,37	24,55
3 W	7,56	42,52
10 W	13,8	77,63

Tabla 4. Distancias de interceptación en millas náuticas

Con estos datos se puede calcular el factor de ventaja del equipo receptor IFM con respecto al radar, que se muestra en la tabla 5. En ella se aprecia cómo, para un receptor IFM, el factor de ventaja del radar es menor que 1 en todas las condiciones de potencia transmitida, con lo que se puede afirmar categóricamente que el radar es LPI. En la tabla 6 se puede ver el factor de ventaja en el caso de un receptor superheterodino, donde el aumento de sensibilidad del receptor superheterodino en condiciones de RCS reducida (por ejemplo aeronaves) hace que el factor de ventaja sea mayor que 1, con la consiguiente pérdida de capacidad LPI del radar. *Esto puede dar la idea de la importancia de la RCS del blanco a la hora de mantener las prestaciones LPI del radar.*

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
1 mW	0,01	0,03	0,02	0,02	0,08	0,08
10 mW	0,02	0,05	0,04	0,03	0,14	0,13
100 mW	0,04	0,09	0,07	0,05	0,25	0,24
1 W	0,07	0,16	0,12	0,09	0,45	0,42
3 W	0,10	0,21	0,16	0,12	0,59	0,55
10 W	0,13	0,28	0,21	0,16	0,79	0,75

Tabla 5. Factor de ventaja con receptor *IFM*

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
1 mW	0,08	0,16	0,12	0,09	0,45	0,42
10 mW	0,13	0,28	0,21	0,16	0,79	0,75
100 mW	0,24	0,50	0,37	0,28	1,41	1,33
1 W	0,42	0,89	0,67	0,50	2,51	2,37
3 W	0,55	1,17	0,88	0,66	3,30	3,11
10 W	0,75	1,58	1,18	0,89	4,45	4,20

Tabla 6.- Factor de ventaja con receptor *Superheterodino* (SH)

Dado que la máxima distancia instrumental del SCOUT es 24.57 mn, se vuelve a calcular el factor de ventaja aplicando esta distancia de detección máxima. Los resultados de este nuevo cálculo se muestran en la tabla 7, donde se observa que la aplicación de la máxima distancia instrumental en la máxima distancia de detección no influye en el factor de ventaja sobre un receptor IFM.

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
1 mW	0,01	0,03	0,02	0,02	0,08	0,08
10 mW	0,02	0,05	0,04	0,03	0,14	0,13
100 mW	0,06	0,09	0,07	0,06	0,25	0,24
1 W	0,18	0,18	0,18	0,18	0,45	0,42
3 W	0,31	0,31	0,31	0,31	0,59	0,55
10 W	0,56	0,56	0,56	0,56	0,79	0,75

Tabla 7. Factor de ventaja con receptor IFM y máxima distancia instrumental

En la tabla 8 podemos ver el factor de ventaja aplicando la máxima distancia instrumental, con respecto a un receptor superheterodino. Se produce entonces un ligero empeoramiento en las prestaciones LPI cuando el radar transmite con potencias mayores a 1 W. Podemos ver cómo afecta a las prestaciones LPI la máxima distancia instrumental. Este radar tiene una escala máxima de 24 mn, con lo que la distancia máxima instrumental está bien dimensionada en cuanto a la operatividad del buque, pero en cuanto a las características LPI tiene una ligera anomalía.

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
1 mW	0,08	0,16	0,12	0,09	0,45	0,42
10 mW	0,13	0,28	0,21	0,16	0,79	0,75
100 mW	0,32	0,50	0,37	0,32	1,41	1,33
1 W	1,00	1,00	1,00	1,00	2,51	2,37
3 W	1,73	1,73	1,73	1,73	3,30	3,11
10 W	3,16	3,16	3,16	3,16	4,45	4,20

Tabla 8. Factor de ventaja con receptor superheterodino y máxima distancia instrumental

En cuanto a la resolución en distancia, ésta es aproximadamente la mitad que un radar de pulsos convencional en su escala más alta. Operativamente, no es un parámetro muy importante, pero una mejora de la resolución siempre redunda en un beneficio de la presentación del radar.

Como se puede ver en las diferentes tablas, en las celdas con fondo sombreado se realizó el cálculo con dos potencias de transmisión, 3 y 10 W, que no están implementadas en el SCOUT, pero que permiten ver la influencia de la potencia transmitida en las características LPI de un radar. Se ha comprobado que, en el caso del receptor superheterodino, la influencia de la potencia transmitida es importante. Por tanto, es fundamental evitar el escalado de potencia para mejorar la detección y trabajar en mejorar otros parámetros del radar como la ganancia de proceso.

Como resumen, el SCOUT es un radar con unas características LPI bien dimensionadas.

6.2. Radar SIMRAD BROADBAND 4G™

Se trata de un radar de onda continua FMCW totalmente comercial. Este radar no se ha concebido como radar LPI y, aunque está instalado en buques de la Armada, su función es la de un radar de navegación con tecnología moderna, un transmisor de estado sólido y una potencia de transmisión de 165 mW. La poca información disponible sobre este sistema es pública y accesible desde Internet. Esta información permite estimar las distancias de detección del radar para realizar el cálculo del factor de ventaja. Es un ejemplo más de cómo los parámetros del radar influyen el factor de ventaja.

Por tanto, de acuerdo con los datos obtenidos, se han estimado las distancias de detección que se muestran en la tabla 9, mientras que la tabla 10 muestra la distancia de interceptación para los dos tipos de receptor ESM.

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
165 mW	41,74	17,6	23,47	31,3	6,25	6,62

Tabla 9. Distancia máxima de detección en millas náuticas

POTENCIA	IFM	SH
165 mW	1,7	9,54

Tabla 10. Distancias de interceptación en millas náuticas

A su vez, con los valores de distancias de detección y de interceptación, se puede calcular el factor de ventaja. Los resultados de dicho cálculo se muestran en las tablas 11 y 12, para receptores IFM y superheterodino, respectivamente.

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
165 mW	0,04	0,10	0,07	0,05	0,27	0,26

Tabla 11. Factor de ventaja con receptor IFM

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
165 mW	0,23	0,54	0,41	0,30	1,53	1,44

Tabla 12. Factor de ventaja con receptor SH

Como se puede ver este radar, a pesar de que no está pensado como radar LPI, tiene unas buenas características LPI debido a su baja potencia de transmisión. Esta reducción de la potencia de transmisión se compensa con una alta ganancia de proceso. Sólo en el caso de aeronaves y con receptores ESM superheterodinos, el factor de ventaja es mayor que 1. *Debido a que la función de este radar es la de navegación y que no está pensado para la detección de aeronaves, se considera que este radar sí tiene buenas características LPI.*

6.3 Radar LPI con potencias de transmisión mayores de 1 W

El último de los radares LPI de onda continúa FMCW que se va a estudiar dispone, básicamente, de las mismas características que los analizados anteriormente. El único parámetro que varía es uno de los más importantes a la hora de estudiar las características LPI de un radar: la potencia de transmisión. Este radar tiene varios modos de funcionamiento y un escalado en potencia que va de 1 a 60 W. Teniendo en cuenta las diferentes potencias, se calculará el factor de ventaja del radar sobre los dos tipos de receptores de ESM (IFM y SH).

En la tabla 13 se pueden ver las distancias máximas de detección calculadas para buques y aeronaves de diferentes RCS. Como se puede ver, tanto la potencia de transmisión como las diferentes RCS de los blancos cambian significativamente estas distancias.

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
1 W	57,66	27,28	36,38	48,52	9,68	10,25
3 W	75,89	35,91	47,88	63,85	12,74	13,49
10 W	102,54	48,52	64,7	86,28	17,21	18,23
30 W	134,95	63,85	85,15	113,55	22,66	24
60 W	160,48	75,93	101,26	135,03	26,94	28,54

Tabla 13. Distancia máxima de detección en millas náuticas

De forma previa al cálculo del factor de ventaja, se hace necesario calcular las distancias de interceptación para los receptores ESM más utilizados. La tabla 14 refleja dichas distancias, mientras que las tabla 15 y 16 muestran el factor de ventaja cuando el receptor ESM es del tipo IFM y SH, respectivamente.

A la vista de los resultados, queda claro que contra un equipo IFM el radar tiene características LPI en el caso de los diferentes buques, mientras que en el caso de aeronaves y con potencias elevadas, el factor de ventaja es favorable al equipo ESM. A este respecto debemos pensar que hay aeronaves que incorporan receptores ESM, con lo que no se puede asegurar totalmente el ocultamiento del radar con potencias de transmisión altas. En el caso del receptor superheterodino se observa, en la tabla 16, que

las prestaciones LPI del radar son peores, especialmente en el caso de blancos con baja RCS y con altas potencias de transmisión. A partir de los 10 W de potencia el RAF es negativo para el radar.

POTENCIA	IFM	SH
1 W	4,53	25,47
3 W	7,84	44,12
10 W	14,32	80,54
30 W	24,81	139,5
60 W	35,08	197,29

Tabla 14. Distancias de interceptación en millas náuticas

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
1 W	0,08	0,17	0,12	0,09	0,47	0,44
3 W	0,10	0,22	0,16	0,12	0,62	0,58
10 W	0,14	0,30	0,22	0,17	0,83	0,79
30 W	0,18	0,39	0,29	0,22	1,09	1,03
60 W	0,22	0,46	0,35	0,26	1,30	1,23

Tabla 15. Factor de ventaja con receptor IFM

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
1 W	0,44	0,93	0,70	0,52	2,63	2,48
3 W	0,58	1,23	0,92	0,69	3,46	3,27
10 W	0,79	1,66	1,24	0,93	4,68	4,42
30 W	1,03	2,18	1,64	1,23	6,16	5,81
60 W	1,23	2,60	1,95	1,46	7,32	6,91

Tabla 16. Factor de ventaja con receptor Superheterodino

Este radar tiene una máxima distancia instrumental de 35.25 mn. En la ecuación (15) se ve que la distancia máxima instrumental depende principalnte del barrido en frecuencia Δf, de la frecuencia de batido máxima $f_{b\,max}$ y del periodo del barrido T. En las tablas 17 y 18 se muestra cómo la aplicación de la distancia máxima instrumental influye muy negativamente en las características LPI del radar, especialmente en el caso del receptor superheterodino.

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
1 W	0,13	0,17	0,13	0,13	0,47	0,44
3 W	0,22	0,22	0,22	0,22	0,62	0,58
10 W	0,41	0,41	0,41	0,41	0,83	0,79
30 W	0,70	0,70	0,70	0,70	1,09	1,03
60 W	1,00	1,00	1,00	1,00	1,30	1,23

Tabla 17. Factor de ventaja (RAF) con receptor IFM y máxima distancia instrumental

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
1 W	0,72	0,93	0,72	0,72	2,63	2,48
3 W	1,25	1,25	1,25	1,25	3,46	3,27
10 W	2,28	2,28	2,28	2,28	4,68	4,42
30 W	3,96	3,96	3,96	3,96	6,16	5,81
60 W	5,60	5,60	5,60	5,60	7,32	6,91

Tabla 18. Factor de ventaja con receptor superheterodino y máxima distancia instrumental

Es necesario un estudio muy exhaustivo de los parámetros para que la distancia máxima instrumental sea la adecuada y mejore las características LPI del radar. Como se ve en la tabla 18, el factor de ventaja es desfavorable al radar en prácticamente todos los casos, tanto de RCS como de potencia transmitida.

Se debe también tener en cuenta que el radar analizado en este apartado puede funcionar en frecuencia ágil. Esto afectará a la relación señal a ruido, en la medida en que ésta depende de una probabilidad de detección y de falsa alarma dadas y se calcula para un tipo de blanco cuya RCS varia de un barrido a otro (Swerling I). Como la frecuencia ágil produce un cambio de longitud de onda de un pulso a otro, durante el tiempo de iluminación del blanco la RCS podrá variar de un pulso a otro, convirtiéndose en un blanco Swerling de tipo II [2]. Como se muestra en [3], para una P_d del 90% y una P_{fa} de 10^{-6}, la mejora de integración es de 7 dB, lo que nos da un incremento en la distancia de detección del radar de un 50%. En la tabla 19 se pueden ver las distancias de detección de este radar con frecuencia ágil.

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
1 W	86,28	40,82	54,44	72,59	14,84	15,34
3 W	113,55	53,72	71,64	95,54	19,06	20,19
10 W	153,42	72,59	96,8	129,09	25,76	27,28
30 W	201,92	95,54	127,4	169,89	33,9	35,91
60 W	240,12	113,61	151,51	202,04	40,31	42,7

Tabla 19. Distancia máxima de detección con frecuencia ágil (expresada en mn)

Debido a que el radar tiene una distancia máxima instrumental, el aumento de la distancia de detección debido a la frecuencia ágil no se ve reflejado en el factor de ventaja del radar. En las tablas 20 y 21 se observa que la variación del factor de ventaja es poco significativa.

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
1 W	0,13	0,13	0,13	0,13	0,31	0,30
3 W	0,22	0,22	0,22	0,22	0,41	0,39
10 W	0,41	0,41	0,41	0,41	0,56	0,52
30 W	0,70	0,70	0,70	0,70	0,73	0,70
60 W	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 20. Factor de ventaja con frecuencia ágil, receptor IFM y máxima distancia instrumental

POTENCIA	Fragata	Patrullero moderno	Fragata moderna	Portaaeronaves	Helicóptero	Avión Caza
1 W	0,72	0,72	0,72	0,72	1,72	1,66
3 W	1,25	1,25	1,25	1,25	2,31	2,19
10 W	2,28	2,28	2,28	2,28	3,13	2,95
30 W	3,96	3,96	3,96	3,96	4,12	3,96
60 W	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60

Tabla 21. Factor de ventaja con frecuencia ágil, receptor SH y máxima distancia instrumental

Este radar tiene una muy buena resolución, muy por debajo de la obtenida por un radar de pulsos convencional. Como se muestra en la ecuación (11), la resolución depende del barrido de frecuencia utilizado (Δf). Un Δf más grande significa una mejor resolución, aunque, desafortunadamente, de acuerdo con (15), también significa una menor distancia máxima instrumental (R_{max}).

En el ámbito de la GE, la resolución no afecta para nada al factor de ventaja, pero la distancia máxima instrumental sí es un factor determinante ya que limita la distancia de detección del radar. En un sentido más estricto, se puede decir que afecta a la presentación, pero a efectos prácticos es como si afectara a la distancia de detección ya que no puede presentar ningún blanco a partir de esta distancia. Volviendo a la ecuación (15), otro de los parámetros que influyen en la distancia máxima instrumental es la frecuencia de batido máxima, $f_{b\ max}$. Se puede aumentar la distancia máxima instrumental manteniendo la resolución y aumentando la $f_{b\,max}$. Para ello se debe aumentar el número de células de distancia.

En este radar se puede ver cómo el escalado de potencia influye en las características LPI del radar. A potencias mayores, las características LPI disminuyen considerablemente, especialmente en blancos de RCS reducida. Se puede observar también que, aunque es un radar de elevada resolución, el barrido de frecuencias Δf mayor hace que la distancia máxima instrumental reduzca aun más la capacidad LPI del radar y no permita aprovechar la mejora de detección que proporciona la frecuencia ágil.

Por tanto, de acuerdo con lo visto anteriormente, el radar analizado no tiene características LPI contra un receptor IFM con potencia de 60 W en el caso de buques y con potencias de 30 y 60 W en el caso de aeronaves. Contra un receptor SH no tiene capacidad LPI excepto a mínima potencia, 1 W, siempre y cuando el blanco sea un buque. En el caso de aeronaves en ningún momento tiene características LPI.

En resumen, este radar, con potencias mayores de 1 W no tiene buenas prestaciones LPI.

7. Conclusiones

En la guerra naval moderna y en escenarios de crisis se busca denegar la información de posición y de los sistemas instalados a bordo. Esto se contradice de plano con la indiscreción característica de los radares de pulsos tradicionales. Los equipos receptores de ESM tienen una ventaja sobre el radar inherente a su propio funcionamiento, cuantificable a través del factor de ventaja (RAF). El factor de ventaja del equipo ESM sobre los radares de pulsos tradicionales siempre es mayor que 1.

Los radares LPI aparecen para invertir el valor del factor de ventaja y hacer que el radar tenga ventaja sobre el equipo ESM. Para ello se han diseñado una serie de técnicas al objeto de reducir la distancia de interceptación del receptor de GE. La técnica más utilizada es la utilización de radares de onda continua FMCW.

En este estudio se han utilizado las características típicas de los receptores ESM modernos, eligiendo los más comunes: IFM y Superheterodino. Para el estudio de las características LPI se ha tomado como referencia el RAF, considerando que un radar es verdaderamente LPI cuando este parámetro es menor que 1. Las características LPI se pueden graduar pero, como marino que ha está embarcado de Oficial de GE en agrupaciones navales en escenarios de crisis, puedo afirmar que solo cuando el RAF es menor que 1 el radar está totalmente oculto.

Del estudio de los tres radares LPI de onda continua FMCW que se ha realizado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- ***El principal parámetro que afecta al factor de ventaja es la potencia transmitida por el radar.*** Como se extrae de este estudio, los radares con potencias mayores de 1 W no se comportan como radares LPI, aumentando considerablemente el factor de ventaja a favor de los receptores ESM. Para reducir la potencia se hace necesario aumentar la ganancia de proceso del radar. Este parámetro afecta directamente a la S_i que en este tipo de radares es mucho más baja que en los radares de pulsos convencionales. Un aumento de la G_p de X dB reduce la potencia transmitida en la misma cantidad.

- ***Estos radares tienen como característica común a todos ellos la alta resolución en distancia.*** Este parámetro no afecta al factor de ventaja y por lo tanto sus características LPI. Está claro que si un radar tiene una mejor resolución, la presentación será mucho mejor.

- ***Como contrapartida, la consecución de esta alta resolución lleva consigo el aumento del margen de barrido en frecuencias, lo que implica una reducción en la máxima distancia instrumental.*** Esto sí afecta de manera importante al factor de ventaja ya que, aunque no reduce la distancia de detección, reduce la distancia teórica a la que el radar puede presentar un blanco, lo que a efectos prácticos es lo mismo. En los radares estudiados se puede ver cómo el impacto de este parámetro es importante. Habrá que sopesar, a la hora del diseño de un radar de estas características, si se desea resolución en distancia o distancia máxima instrumental. En caso de que se quiera mantener ambas prestaciones de forma simultánea, se debe realizar el estudio para tratar de aumentar la distancia máxima instrumental con otros parámetros como la f_b máxima o el número de células de resolución.

- ***La utilización de la frecuencia ágil mejora la detección de una manera considerable, con lo que el factor de ventaja se reduce, favoreciendo al radar***, pero la distancia máxima instrumental hace que esa mejora no se vea reflejada en la práctica, como se puede ver en el tercero de los radares analizados.

- ***Se ha demostrado que la RCS del blanco afecta de forma importante a las características LPI del radar.*** Hay que pensar que no sólo buques de superficie tienen equipos receptores ESM si no que también van instalados en aeronaves con mucha menor RCS. Estas aeronaves son detectadas por el radar a menores distancias sin que varíe la distancia de interceptación, con lo que el factor de ventaja aumenta a favor del equipo ESM.

- ***El hecho de que haya receptores de ESM en aeronaves hace que el horizonte radar aumente,*** ampliando las distancias de interceptación que en un momento determinado puedan tener límites en el horizonte radar.

Por último, es difícil estar completamente seguro de que un radar es totalmente LPI. Este estudio es teórico y en él se han asumido ciertas simplificaciones. Sería recomendable por parte de la Armada realizar ejercicios, ya establecidos en nuestros procedimientos operativos, al objeto de comprobar realmente las características de los radares LPI instalados a bordo.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Centro de Medidas Electromagnéticas (CEMEDEM), al Centro Universitario de la Defensa (CUD) y en particular a la profesora Paula Gómez Pérez por la valiosa ayuda prestada.

Referencias

1. Fuller,K.L., “To see and not be seen”. *IEE Proceedings 1990*, pp. 1-9
2. Neri, F., *Introduction to Electronics Defense Systems*, Artech House. Boston, USA, **1991**; pp. 272, 54, 273, 102-104.
3. Skolnik, M. I., *Introduction to Radar Systems.* 2nd ed.; Mcgraw-Hill International Book Company. Tokyo, Japon, **1980**, pp. 4, 29, 49.
4. Pace, P.E., “To see and not to be seen”. *Detecting and Classifying LPI Radar*. 2nd ed. Artech House. Boston, USA, **2009**; pp. 30.
5. Ubeda, A., “Radar básico y sus parámetros”. *Radares Marinos*. Marcombo. Barcelona, España, **1978**, pp. 18-20.

Estudio y medidas de radiaciones no ionizantes en un radar naval en Banda-D (1 - 2 GHz).

Sánchez Álvarez, Luis Francisco [1]

[1] Ministerio de Defensa. Armada Española. Escuela Naval Militar. Centro de Estudios y Medidas Electromagnéticas (CEMEDEM). Email: lsanalv@fn.mde.es

***** TN (CIA-EOF) Luis Francisco Sánchez Álvarez; E-Mail: lsanalv@fn.mde.es

Abstract: Un buque de guerra, además de disponer de sistemas de comunicaciones en todas las bandas posibles, incorpora otros sistemas para sus funciones operativas, destacando los sistemas radar. Hay multitud de radares para diferentes propósitos, capaces de trabajar en bandas de frecuencia que abarcan desde 800 MHz hasta más de 10 GHz, con potencias desde unos pocos kilovatios hasta varios megavatios. En la actualidad, y desde el punto de vista de prevención de riesgos laborales en temas de radiaciones peligrosas (RADHAZ) para personal (HERP), los análisis de este tipo de radiación están enfocados en sistemas de onda continua, siendo apenas mencionados los sistemas pulsados y aún mucho menos los sistemas con antenas giratorias. Para prevención de riesgos laborales y cumplimiento de la legislación vigente, es necesario disponer de unas distancias de seguridad, así como la realización de medidas de este tipo de fuente electromagnética (EM). Este artículo expone los cálculos teóricos para estimar inicialmente y de forma aproximada las distancias de seguridad, acorde a la legislación vigente para HERP, así como su medida en una plataforma naval para un radar en la banda-D. Se expone, a su vez, como aplicar la normativa que fija los niveles de campos electromagnéticos para fuentes pulsadas y antenas giratorias.

Keywords: RADHAZ, HERP, radar, D-band, L-band, electromagnetic exposure, ship, vessel.

1. Introducción

Hoy en día, los modernos buques de guerra incorporan tal cantidad de sistemas electrónicos que se pueden considerar como las plataformas con mayor complejidad en fuentes electromagnéticas. Nos encontramos con que, el buque más simple, dispone por lo menos de sistemas de comunicaciones, de navegación y de armamento; todos ellos fuentes emisoras de radiación electromagnética (*ElectroMagnetic Radiation,* EMR) y confinados en un espacio mínimo. Los sistemas transmisores

instalados a bordo generan radiación electromagnética produciendo riesgos de radiación peligrosa conocidos como *RADiation HAzards*, o RADHAZ.

Los riesgos generados por RADHAZ se clasifican en tres vertientes [1]: Riegos para el combustible transportado a bordo (*Hazards of Electromagnetic Radiation to Fuel,* HERF*)*, para la propia munición del buque *(Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance,* HERO) y para el personal que opera en el mismo (*Hazards of Electromagnetic Radiation to Personal*, HERP).

La radiación producida por transmisores de alta potencia puede ocasionar daños en las personas cuando se encuentran en las inmediaciones de las antenas transmisoras. En función del tipo de señal los efectos son distintos (calor debido a la onda continua o desgarros producidos por las señales pulsadas). Además, se pueden inducir altos voltajes que produzcan quemaduras de diversa consideración.

Para cumplir la legislación vigente en prevención de riesgos laborales para el personal (HERP), es necesario conocer las distancias y/o zonas de seguridad de una fuente EMR. El peligro de estas emisiones viene dado por el hecho de que la radiación absorbida se manifiesta como un calentamiento de los tejidos orgánicos, sin que el individuo se percate de ello, al no producirse sensación interna de calor. Los efectos dependerán de diversos factores, como la frecuencia del emisor y su potencia de transmisión, del tiempo de exposición, del tipo de señal (onda continua o pulsada), etc.

En este artículo se analizan el cálculo teórico de las distancias de seguridad acorde a la normativa vigente, desde el punto de vista de seguridad HERP, para un radar en la banda D. Se determinan de forma teórica las distancias acorde a diferente normativa, y se llevan a cabo medidas reales a bordo de una plataforma. Se expondrá una metodología de medida para señales pulsadas, que a su vez permita la posterior replicabilidad de las medidas para la verificación del sistema.

2. Normativa vigente: HERP.

Para la prevención de RADHAZ HERP, Gobiernos y organismos internacionales han establecido diversas legislaciones y estándares, todos ellos caracterizados por introducir un margen de seguridad para el personal. La inmensa mayoría de estos estándares, especifican dos límites distintos:

- Entornos controlados y los niveles de exposición para el público en ocupacional.
- Entornos no controlados y los niveles de exposición para el público en general.

La legislación que fija las medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas en España es el Real Decreto 1066/2001 de 28 de septiembre, que a su vez se basa en los niveles propuestos para el público en general por la Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP) de 1998 [2].

En el ámbito europeo, la Recomendación del Consejo de Ministros de Sanidad de la Unión Europea de 12 de julio de 1999 [3], adopta los mismos niveles. Recientemente, la directiva 2013/35/UE Del Parlamento Europeo y del Consejo de 26 de junio de 2013 [4] establece las disposiciones mínimas de salud y seguridad relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los campos electromagnéticos, fijando unos niveles máximos de exposición. Esta directiva europea aún no ha sido transpuesta por España pero debe hacerlo antes del 1 de julio de 2016.

Los niveles aplicables, en el ámbito militar para España, se encuentran recogidos en el *Standardization Agreement* (STANAG) 2345 de la *NATO Standarization Agency* (NSA) [1] y en el *STANAG 1380 E3 RADHAZ NATO Naval Radio and Radar Radiation HAZARD Manual AECP-02* [5].

Teniendo identificada la normativa que nos fija unos niveles para las fuentes EMR, la Tabla 1 recoge una comparativa de niveles para los márgenes de frecuencia de un radar en banda D (1200 – 1400 MHz).

Frecuencia	**R.D. 1066/2001 ICNIRP Entornos no controlados / niveles de exposición para el público en general. (f en MHz)**			**Directiva 2013/35/EU Entornos controlados / niveles de exposición para el público en ocupacional. (f en Hz)**		**NATO STANAG 2345 (f en MHz) (*)**
[MHz]	E[V/m]	H[A/m]	S[W/m^2]	E[V/m]	H[A/m]	S[W/m^2]
1200-1400	$1{,}375 \cdot f^{0.5}$	$0.0037 \cdot f^{0.5}$	f / 200	$0.003 \cdot f^{0.5}$	$10^{-5} \cdot f^{0.5}$	f / 300

Tabla 1: Comparativa de las distintas normativas para radiación en la banda D.

(*) *El 22 de junio de 2015, por Boletín Oficial de Defensa se implanta el Acuerdo de Normalización OTAN STANAG 2345 MEDSTD (Edición 4), será implantado cuando sea promulgado por la OTAN (dado que, actualmente no lo está, se muestra aquí la referencia de la Edición 3).*

3. Cálculos teóricos de las distancias de seguridad HERP.

En función de la fuente emisora de radio frecuencia (RF), y tomando el valor de la densidad de potencia máxima el nivele máximo de cada normativa, Tabla 1, se calculara de forma teórica, la distancia máxima a la cual se alcanza ese nivel, y por lo tanto a partir de la cual puede haber permanecía de personas.

El cálculo de esta distancia de seguridad (d), se realiza mediante la Ec. (1), suponiendo condiciones de campo lejano y un radiador isótropo ideal [6]:

$$d = \left[\frac{P \cdot G}{4 \cdot \pi \cdot S_{\max}} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

Dónde:

- P es la potencia máxima de transmisión.
- G la ganancia de la antena.
- S_{max} la densidad de potencia máxima permitida a la frecuencia de trabajo.

3.1. Características del radar.

Hay gran variedad de radares que funcionan en la banda D, un ejemplo es el radar LANZA *Air Surveillance Radar* [7]. Este radar tiene las siguientes características técnicas:

- Rango de frecuencia: 1200-1400 MHz.
- Máxima dimensión linear de la apertura: 14 m.
- Ganancia de antena: 33 dBi.
- Potencia máxima de equipo: 8000 vatios.
- Nivel de lóbulos laterales: -30 dB.

Este tipo de radares tienen diversos modos de funcionamiento, todos ellos caracterizados por estar la antena girando y con señales pulsadas, salvo un modo de mantenimiento. Este último es el más peligroso desde el punto de vista HERP, ya que se caracteriza por estar la antena parada y las señales de RF transmitidas son de onda continúa. El resto de modos de funcionamiento se diferencian entre sí por las características de las señales pulsadas, así como por las velocidades de giro de antena y diagramas de radiación.

3.2. Distancia de seguridad.

A continuación se llevaran a cabo la obtención de distancias de seguridad (aquellas a las que se alcanzan los niveles máximos acorde a cada normativa), siempre en el peor caso, en el haz directo de iluminación del radar cuyas características se encuentran en el apartado anterior.

3.2.1. Señal de onda continua (continuos wave, CW*) (modo mantenimiento).*

Desde el punto de vista de seguridad electromagnética, éste es el caso más peligroso, dado que es aquel en el que hay más potencia radiando y durante más tiempo. Con las frecuencias de la banda de trabajo del radar del punto 3.1 (1200 y 1400 MHz), se sustituyen en la primera columna de la Tabla 1, y se obtienen los niveles de E, H y S para cada normativa, valores de la Tabla 2.

Frecuencia	**R.D. 1066/2001 ICNIRP**			**Directiva 2013/35/EU**		**NATO STANAG 2345**
[MHz]	E[V/m]	H[A/m]	S[W/m^2]	E[V/m]	H[A/m]	S[W/m^2]
1200	47.63	0.13	6	103.9	0.34	40
1400	51.44	0.14	7	112.24	0.37	46.67

Tabla 2: Niveles de las distintas normativas para radiación en la banda D.

Con los niveles máximos para cada caso, tanto de normativa como de cada una de las frecuencias extremo, se calcula, en base a la Ec. (1) y las características técnicas del radar del punto 3.1, la distancia a la cual se alcanzan los niveles de la Tabla 2. Obteniéndose los valores de distancias de seguridad de la Tabla 3.

3.2.2. Señal pulsada (resto de modos de funcionamiento):

Para la casuística de medidas de niveles para señales pulsadas, hay que tener en cuenta ciertas notas propias de cada legislación para la obtención de los niveles de campo permisibles.

En el caso de R.D. 1066/2001 ICNIRP, a frecuencias que sobrepasan los 10 MHz, el promedio de la densidad de potencia equivalente de onda plana calculado en la anchura del pulso no debe ser mayor de 1000 veces los niveles de referencia, o bien las intensidades de campo (E / H) no deben ser mayores de 32 veces los niveles de referencia, lo mismo ocurre con la Directiva 2013/35/UE. No son objeto de estudio el caso de que además la antena este girando, como es el caso de funcionamiento típico de un radar.

En el caso del STANAG 2345, se define una nueva densidad de potencia, S', Ec. (2):

—— (2)

Donde T_{exp} es la duración de la exposición (en las mismas unidades que T_{avg}) y T_{avg}=6 minutos. Lo que implica que la distancia de seguridad en el caso del STANAG 2345 está condicionada a las características de la señal pulsada del radar. Por ejemplo, suponiendo un radar con unas anchuras de pulso de 51.2/409.6 µS, hay que multiplicar el valor de S por $7 \cdot 10^6$ ó $8.8 \cdot 10^5$, para los cálculos teóricos supondremos un factor de $8.8 \cdot 10^5$. Con estos datos, se obtienen las distancias de seguridad, para el caso de señales pulsadas, que se recogen en la Tabla 3.

Frecuencia	**R.D. 1066/2001 ICNIRP**		**Directiva 2013/35/EU**		**NATO STANAG 2345**	
[MHz]	Distancia (m)		Distancia (m)		Distancia (m)	
	CW	PULSADA	CW	PULSADA	CW	PULSADA
1200	456	14.25	188	5.94	178	< 1
1400	422	13.20	174	5.50	165	< 1

Tabla 3: Distancias de seguridad para el radar en banda D.

4. Procedimiento de medida.

4.1. Metodología.

Una señal pulsada procedente de una antena giratoria, no se puede proceder a medir de la misma forma que un sistema con antena fija y señal continua. Es necesario cumplir previamente unas premisas.

En primer lugar hay que determinar si se llevan a cabo las medidas en campo cercano o lejano [6], para saber que magnitud hay que medir. De acuerdo a los límites de ICNIRP y la Recomendación del Consejo Europeo [2], en condiciones de campo cercano para evaluar la exposición de un modo riguroso deben medirse el campo eléctrico y el campo magnético por separado, siendo la densidad de potencia un mero parámetro indicativo. Sin embargo, otras normas como las de la *Federal Communications Commission* FCC [8] del Gobierno de los Estados Unidos, evalúan únicamente la

densidad de potencia, que a efectos de estimación de la exposición y cálculo de distancias de protección, el análisis adoptado puede considerarse lo suficientemente preciso y realista.

Si se aplica el criterio definido en [2] para determinar el tipo de campo (cercano o lejano), nos encontramos con que la frontera entre ambos es menor que la propia dimensión de la antena, luego no es válida su aplicación para el caso de un radar en banda D.

Ya que el objetivo es la determinación de distancias de protección mediremos solo la densidad de potencia, siguiendo el criterio de la FCC.

Identificada la fuente a medir (radar banda D) y que magnitud hay que medir, es necesario seleccionar instrumental con el cual se medirá. Se empleará un medidor de campo NBM-550 con una sonda para señales pulsadas EF-5092, con un margen de frecuencias de trabajo de 300 MHz – 50 GHz y un umbral mínimo de 18 V/m de *Narda Safety Test Solutions*.

Conocida la magnitud a medir, así como los equipos a emplear, se procede a describir el método de medida.

Al ser una señal pulsada en un entorno controlado (las medidas se hacen en la mar, y con un control absoluto de los sistemas de RF en el aire), antes de efectuar las medidas se lleva a cabo una exploración del entorno, y en los puntos cuyos niveles sean más elevados, se ubica el medidor de campo con la sonda en un trípode de madera a una altura de la sonda de 1,80 metros y se mide el máximo nivel (modo de medida *max-hold* del medidor de campo), solventando el problema de giro de la antena en la contribución del nivel de señal.

4.2. Descripción de las medidas realizadas

El "JUAN CARLOS I", buque de la clase LHD ("*Landing Helicopter Dock*") dispone de un radar de la banda D, el 3D LANZA-N [9], versión navalizada del LANZA *Air Surveillance Radar* [7], con características muy similares. La plataforma naval con el radar identificado puede verse en la Figura 1.

El radar 3D LANZA, tiene diversos modos de funcionamiento, uno de ellos de onda continua (modo mantenimiento) y el resto de onda pulsada (Alerta y Control de PAtrullas –ACPA-, Control de Tráfico Aéreo –CTA-, Alerta Próxima –AP- y Detección de Blancos de Superficie –DBS-). Las diferencias entre los distintos modos de funcionamiento de onda pulsada, son: el diagrama de radiación de la antena (la antena está formada por 16 arrays horizontales, que en función del modo de funcionamiento determinan su diagrama de radiación), la velocidad de giro de la antena, las características de las señales pulsadas transmitidas y la potencia de transmisión. Dispone de una estabilización automática para corregir los movimientos de la plataforma. La antena es capaz de trabajar con una elevación de 0 a 40º. Con estas características, y suponiendo un haz de radiación en vertical muy estrecho, nunca en la plataforma tendremos iluminación directa del haz.

Se mide el radar en todos los modos de funcionamiento a una frecuencia fija de trabajo (tiene opción, en cada modo, de salto en frecuencia), salvo en el modo mantenimiento con CW y antena parada, ya que en estas condiciones son forzadas y nunca hay dotación en las inmediaciones del radar.

El resto de los modos de funcionamiento (ACPA, CTA, AP y DBS) se miden en la cubierta 06 y 05. Los niveles máximos para cada modo por cubierta, a una cierta distancia de la base de la antena, pueden verse en la Tabla 4.



Figura 1. Perfil de la plataforma y radar objeto de la medida.

MODO DE FUNCIONAMIENTO	CUBIERTA	DISTANCIA A LA BASE DE LA ANTENA (m)	E (V/m)	S(W/m2)
ACPA	05	24	<Umbral(*)	<Umbral(*)
CTA	05	26	<Umbral(*)	<Umbral(*)
AP	05	24	<Umbral(*)	<Umbral(*)
DBS	05	21	<Umbral(*)	<Umbral(*)
ACPA	06	9	19	0,96
CTA	06	9	26,1	1,81
AP	06	9	28,7	2,18
DBS	06	9	31,1	2,57

Tabla 4: Niveles de campo medidos.

(*) En algunas medidas, los niveles obtenidos se encuentran por debajo del umbral del equipo de medida, siendo un valor que no es seguro, por lo tanto se reemplaza por "<Umbral".

5. Resultados y Discusión

Se han expuesto los cálculos teóricos de cómo obtener, acorde a distintas normativas, las distancias de seguridad para permanencia de personas al radar, así como se adecuan las medidas para la casuística de señales pulsadas. La descripción de la metodología de trabajo se ha completado con las medidas reales realizadas en un buque de la clase LHD, midiendo todos los modos de funcionamiento normal de un radar, caracterizados por señales pulsadas, en las dos cubiertas más próximas a la antena.

Tal y como se pueden apreciar los niveles medidos, Tabla 4, en ningún caso nos acercamos a los valores límites. Por la ubicación de la antena en la plataforma, así como en las zonas de medida, nunca habrá permanecía de personal en iluminación directa del radar, los niveles de campo medidos se deben a la radiación por lóbulos secundarios.

6. Conclusiones

Inicialmente se han mostrado las diversas normativas, así como la metodología de cálculo teórico para las distancias de seguridad para RADHAZ HERP de un radar en banda-D. Posteriormente, se expone la metodología de medida, así como el instrumental a emplear. Y por último se completa con medidas reales de un radar en una plataforma naval.

Aunque en los cálculos teóricos no se han empleado las características reales del radar que posteriormente se midió, si se indica cómo aplicar la teoría para su obtención.

Se obtiene como conclusiones, que para este tipo de radares, salvo que haya permanencia de personal en el haz directo y justo al lado de la antena, no se superan los niveles de RADHAZ HERP en ningún caso, salvo con la antena parada y onda continua.

En una plataforma naval, por la envergadura de estos radares y su ubicación, no se produce incidencia de haz directo sobre la plataforma, por lo tanto el personal en las inmediaciones está expuesto a la radiación procedente de los lóbulos secundarios.

Agradecimientos

Este trabajo nunca se habría podido desarrollar sin la dotación, medios y recursos del Centro de Estudios y Medidas Electromagnéticas (CEMEDEM) de la Armada Española, ubicado en la Escuela Naval Militar.

Referencias.

1. North Atlantic Treaty Organization, *Nato Naval Radio and Radar Radiation Hazard Manual AECP-02(D) STANAG 1380 Ed. 5 draft.* The NATO Standardization Office (NSO), **2014**.
2. Ministerio de la Presidencia, *Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre*, RCL 2001\2415, 2597. BOE núm. 234, de 29 de septiembre de **2001**, páginas 36217 a 36227.
3. Consejo de la Unión Europea, *Recomendación del Consejo relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)*, 1999/519/CEE de 12 de julio de **1999.**
4. Parlamento Europeo y del Consejo, Directiva 2013/35/UE, 26 de junio de **2013**.
5. North Atlantic Treaty Organization, *Evaluation and Control of Personnel Exposure to Radio Frequency Fields 3 kHz to 300 GHz STANAG 2345 Ed.3*, The NATO Standardization Office (NSO), **2003**.
6. Balanis, Constantine A; *Antenna theory and design*. John Wiley & Sons, Inc., New York, **1997**.
7. IHS Jane´s, *LANZA air surveillance radar. C4ISR & MISSION SYSTEMS:LAND. SURVEILLANCE RADAR*. Spain. **2014**-07-25.
8. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, *Emisiones radioeléctricas: normativa, Técnicas de Medida y Protocolos de certificación*, Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación Madrid, **2008**.
9. IHS Jane´s, *3D LANZA-N. C4ISR & MISSION SYSTEMS: MARITIME. SURVEILLANCE RADAR*. Spain. **2015**-02-06.

Reducción de la efectividad RADAR en la detección de blancos en bosques

Gómez Pérez, Paula [1,*], Cuiñas, Iñigo [2] y Crego García, Marcos [2]

[1] Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar, Marín, España. Email: paula@cud.uvigo.es

[2] Dept. de Teoría do Sinal e Comunicacións, Universidade de Vigo, Vigo, España; Emails: inhigo@uvigo.es, marcoscregogarcia@gmail.com

* Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: paula@cud.uvigo.es

---

Abstract: La efectividad de los sistemas RADAR ha mejorado considerablemente desde los primeros prototipos hasta los modernos sistemas actuales. Los avances técnicos han ido en paralelo al desarrollo tanto de nuevos materiales como de estructuras que permiten un mejor camuflaje de los blancos. En este artículo se analiza cómo utilizar las masas forestales para reducir la eficiencia del radar a la hora de camuflar dichos blancos. Basándonos en medidas experimentales llevadas a cabo en cinco tipos diferentes de bosques, se estudiará el efecto de los elementos vegetales en la probabilidad de detección de blancos ocultos entre la maleza. Dependiendo del tipo de blanco, la frecuencia de operación del radar y el entorno, se demostrará que un bosque puede proporcionar cobertura incluso a blancos de grandes dimensiones, reduciendo la probabilidad de detección a valores inferiores a 0.1.

Keywords: *Radar countermeasures; radio propagation; vegetation*

---

1. Introducción

Los sistemas RADAR han visto incrementadas sus aplicaciones desde su primera aparición en la Segunda Guerra Mundial: desde vigilancia aérea a los sistemas de vigilancia perimetral utilizados tanto en el ámbito militar como en el civil. Hoy en día, los radares de superficie son útiles tanto para realizar mediciones de velocidad en autopistas y carreteras, como para detectar la presencia de intrusos en áreas de acceso restringido, así como para tareas de seguimiento a media o larga distancia.

Los sistemas RADAR de vigilancia aérea cuentan con la ventaja de que se suelen ubicar en plataformas elevadas y no suelen disponer de obstáculos en la línea de visión directa con los blancos a detectar. Por el contrario, los radares de superficie sufren la presencia de todos los elementos colindantes, como edificios, montañas y bosques, que obstaculizan la detección de blancos.

En la actualidad, existen numerosas líneas de investigación destinadas a desarrollar materiales que reduzcan la propagación electromagnética, y que puedan ser utilizados para bloquear señales radar e incluso para evitar ser detectado (*tecnologías stealth*) [1]. Las pantallas metálicas evitan de forma efectiva la detección de vehículos, armamento o personal ubicado tras ellas, pero tienen el inconveniente de que son fácilmente detectables por el radar, y por lo tanto, el sistema podría identificarlas como elementos extraños (y, por tanto, sospechosos) dentro del entorno. En un primer momento, se descartó utilizar la vegetación para dichas aplicaciones porque las atenuaciones inducidas eran excesivamente bajas en comparación con muros metálicos o de hormigón armado. Sin embargo, estudios recientes [2-3] demuestran que los árboles, y principalmente, las grandes agrupaciones como son los bosques, inducen atenuaciones suficientes para reducir la probabilidad de detección de aquellos objetos situados en sus zonas de sombra. Esto abre la posibilidad de utilizar los bosques como nuevos elementos de camuflaje.

El objetivo de este trabajo es cuantificar la capacidad de una zona forestal para servir como camuflaje a vehículos, armamento o personal militar, de forma que un radar de superficie (de baja altura) sea incapaz de detectar su presencia.

2. Medidas de atenuación radio en bosques

Las zonas arboladas introducen, por defecto, una atenuación adicional en el canal de propagación que degrada la operatividad de los sistemas radio ubicados en dichos escenarios. Para caracterizar dicha degradación, se ha llevado a cabo una completa campaña de medidas con el fin de obtener la atenuación proporcionada por el entorno vegetado, como un primer paso de cara a evaluar el comportamiento de dichas áreas para ser utilizadas como tecnologías *stealth*.

2.1. Configuración y procedimiento de medida

La atenuación en bosques de diferente tipo se analiza en [2], donde se describe en profundidad el sistema de medidas, así como el procedimiento utilizado para la adquisición de las mismas. En líneas generales, la configuración central del sistema de medidas se basa en un transmisor y un receptor ubicados en posiciones diferentes. El sistema transmisor lo compone un generador de señal Rohde-Schwarz SMV-03, mientras que, en el receptor, un analizador de espectro modelo Rohde-Schwarz FSH-6 recogió los datos de potencia en todas las posiciones bajo estudio. El procedimiento consistió en ubicar el transmisor en una posición fija, y desplazar el receptor a lo largo de diferentes radiales. Las 301 muestras de potencia recibidas en cada punto permitieron el cálculo de la atenuación media con la distancia.

La campaña se realizó en cinco escenarios diferentes: dos en bosques de hoja perenne (concretamente, un pinar y un bosque de eucaliptos); dos en bosques de hoja caduca (un bosque de robles, medido en invierno y verano, para analizar el impacto estacional), y una zona sin árboles pero con maleza densa y de altura media superior a 1.8 m.

Las medidas se tomaron en condiciones de banda estrecha, en frecuencias por debajo de los 6 GHz, asignadas a aplicaciones radar tanto civiles como militares. La tabla 1 muestra las frecuencias utilizadas en este trabajo, así como sus aplicaciones radar más comunes [4] [5] [6].

Banda	**Frecuencia (MHz)**	**Aplicaciones RADAR**	
		Civiles	**Militares**
S	2.400	Radiolocalización	Radar de vigilancia (detección y seguimiento de blancos) Radares antimisiles (iluminadores y control de tiro)
	3.500		
C	5.800	Radiolocalización	Vigilancia aérea

Tabla 1. Frecuencias medidas y aplicaciones militares más comunes

Como muestra la tabla, los radares en las bandas S y C suele ser radares de vigilancia. Dependiendo del tipo de área y de la extensión a monitorizar, se hablará de radares marítimos, de vigilancia aérea, de tierra o de vigilancia perimetral. Dado que este trabajo se centra en la utilización de entornos forestados como contramedidas radar, nos centraremos únicamente en las dos últimas categorías.

Este tipo de radares cuentan con una serie de peculiaridades, dado que normalmente se encuentran instalados en áreas pobladas, y las antenas suelen estar ubicadas en mástiles a baja altura. Ambos factores imponen severas restricciones en la potencia máxima transmitida, y por lo tanto, en las distancias máximas de detección. Mientras que los radares de vigilancia aérea o marítima pueden transmitir potencias de kW (o MW) y alcanzar distancias de cientos de km, los radares de vigilancia superficial y perimetral suelen transmitir potencias en el rango de 1 a 8 W, con distancias máximas de detección de 1 a 30 km. Adicionalmente, en el caso de Defensa, estos equipos se suelen desplegar en forma de sistemas portátiles en el área donde las Fuerzas se encuentren desplegadas, con mástiles de antena con alturas de 1 a 2 m. Este caso encaja a la perfección con los datos obtenidos durante la campaña de medidas, dado que las antenas se ubicaron en estos rangos de altura.

2.2. Evaluación de las atenuaciones obtenidas

La potencia recibida en trayectorias a través de bosques se puede describir mediante la ecuación lineal (en dB) definida en (1):

$$P(d)\,[dBm] \;=\; P_0[dBm] \;-\; n \cdot 10 \cdot log_{10}(\,d[m]\,) \qquad (1)$$

donde P es la potencia recibida en dBm a una distancia d (en metros) del transmisor; P_0 es la potencia de referencia a distancia unitaria (d = 1 m), y n es el factor de atenuación. La tabla 2 muestra los parámetros que conforman el modelo, obtenidos de forma empírica mediante las medidas recopiladas [2]. Todos los datos han sido normalizados a 0 dBm de potencia transmitida, lo que permite que el factor de atenuación sea utilizado como una estimación de la potencia recibida a una determinada distancia. En general, para la misma potencia recibida, las señales a baja frecuencia siempre alcanzarán mayores distancias que a altas frecuencias, que sufre de mayores atenuaciones. Por tanto, este trabajo se centrará en el análisis para la Banda S, dado que será el que proporcione mejores alcances de detección.

Bosque o Localización	**Frecuencia**			
	S		**C**	
	P_0	**n**	**P_0**	**n**
Robleda (verano)	-39.9	2.54	-42.2	3.12
Robleda (invierno)	-41.7	2.40	-47.5	2.57
Pinar	-35.7	3.01	-40.8	3.07
Eucalipto	-36.9	2.53	-47.0	2.42
Prado	-47.5	1.90	-51.4	1.98

Tabla 2. Parámetros que modelan la propagación en bosques

3. Utilización de bosques como camuflaje RADAR

En términos generales, un radar detectará un blanco cuando la potencia recibida exceda un umbral, que viene determinado por la sensibilidad del receptor. Este umbral se superará cuando se detecte un blanco fuerte, o bien cuando se dé un pico fuerte de ruido en el sistema, generando una falsa alarma. En la práctica, las falsas alarmas suelen deberse a ecos fuertes del entorno (*clutter*), como es el caso de la vegetación colindante. Sin embargo, no se considerará la contribución de la vegetación como *clutter* dado que su comportamiento se puede modelar como un blanco cuasi-estático, por lo que un filtro MTI podría cancelar fácilmente su respuesta.

Para el caso que nos ocupa, la naturaleza de las falsas alarmas es irrelevante, dado que el problema de la detección se analizará de forma probabilística, y las especificaciones de probabilidad de detección y falsa alarma de un radar se definen en base al ruido del receptor. En caso de que existiesen ruidos adicionales (como por ejemplo, el propio *scattering* generado por la vegetación), estos contribuirían a degradar aún más el comportamiento del sistema, en cuyo caso las condiciones de probabilidad de detección empeorarían. Por tanto, para demostrar la viabilidad de nuestra propuesta, supondremos el mejor de los casos, que es la inexistencia de ruidos adicionales al del receptor.

Bajo esta premisa, el ruido aleatorio de fondo será el que limite la habilidad del receptor para detectar un eco, y el eco más débil que puede ser detectado por un receptor determina la sensibilidad del sistema. En la ecuación radar, esta potencia mínima suele reemplazarse por la relación señal-a-ruido mínima detectable (SNR_{min}), dado que es un parámetro independiente del ancho de banda del receptor y de la figura de ruido del sistema, y que puede expresarse en términos de la probabilidad de detección (P_D) y de la probabilidad de falsa alarma (P_{fa}), dos parámetros relacionados con las necesidades específicas de cada aplicación radar [5].

La relación entre la SNR_{min}, la P_D y la P_{fa} es difícilmente cuantificable, pero se puede aproximar por la ecuación (2) [7]:

$$P_D = 0.5 \times erfc\left(\sqrt{-ln\left(P_{fa}\right)} - \sqrt{SNR + 0.5}\right) \quad (2)$$

donde *erfc* es la *función de error complementario*, definido por la ecuación (3).

$$\mathrm{erfc(z)} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^z e^{-v^2} \quad (3)$$

La figura 1 muestra la relación entre la *SNR* y la P_D, e indica los parámetros más comunes para los radares de vigilancia de superficie, consistentes en una probabilidad de detección alrededor de 0.9 y una probabilidad de falsa alarma alrededor de 10^{-8}, lo que lleva a una SNR_{min} en el receptor de 14.2 dB para un blanco estático [6]. La tabla 3 proporciona algunos valores de *SNR* correspondientes a diferentes valores de P_D y P_{fa}, para sistemas radar pulsados de pulso único.

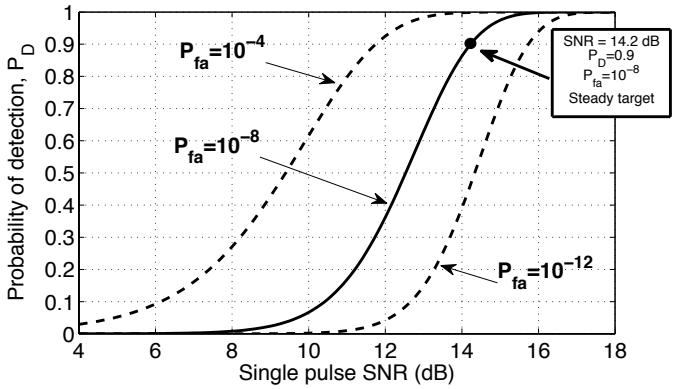


Figura 1. Dependencia de la P_D sobre la *SNR*

P_D	P_{fa}									
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
.1	4.00	6.19	7.85	8.95	9.94	10.44	11.12	11.62	12.16	12.65
.2	5.57	7.35	8.75	9.81	10.50	11.19	11.87	12.31	12.85	13.25
.3	6.75	8.25	9.50	10.44	11.10	11.75	12.37	12.81	13.25	13.65
.4	7.87	8.85	10.18	10.87	11.56	12.18	12.75	13.25	13.65	14.00
.5	8.44	9.45	10.62	11.25	11.95	12.60	13.11	13.52	14.00	14.35
.6	8.75	9.95	11.00	11.75	12.37	12.88	13.50	13.87	14.25	16.62
.7	9.56	10.50	11.50	12.31	12.75	13.31	13.87	14.20	15.59	14.95
.8	10.18	11.12	12.05	12.62	13.25	13.75	14.25	14.55	14.87	15.25
.9	10.95	11.85	12.65	13.31	13.85	**14.25**	14.62	15.00	15.45	15.75
.95	11.50	12.40	13.12	13.65	14.25	14.64	15.10	15.45	15.75	16.12
.98	12.18	13.00	13.62	14.25	14.62	15.12	15.47	15.85	16.25	16.50
.99	12.62	13.37	14.05	14.50	15.00	15.38	15.75	16.12	16.47	16.75
.995	12.85	13.65	14.31	14.75	15.25	15.71	16.06	16.37	16.65	17.00
.998	13.31	14.05	14.62	15.06	15.53	16.05	16.37	16.70	16.89	17.25
.999	13.62	14.25	14.88	15.25	15.85	16.13	16.50	16.85	17.12	17.44
.9995	13.84	14.50	15.06	15.55	15.99	16.35	16.70	16.98	17.35	17.55
.9999	14.38	14.94	15.44	16.12	16.50	16.87	17.12	17.35	17.62	**17.87**

Tabla 3. *SNR* (dB) en función de P_D y P_{fa} (pulso simple)

Las zonas forestales alrededor del emplazamiento del radar reducirán de forma efectiva la señal recibida en el sistema, degradando la *SNR* y por lo tanto, reduciendo la probabilidad de detección. Como se muestra en la figura 1 y la tabla 3, un empeoramiento de menos de 3 dB en la *SNR* puede marcar la diferencia entre una detección fiable y exacta (P_D=*0.99*) y una detección incierta (P_D=*0.50*).

Para cuantificar el impacto de los bosques cercanos, calcularemos la atenuación en exceso inducida mediante la ecuación (1) [8]. Con dicho modelo, se consiguen reducciones de la *SNR* entre 4 y 10 dB

incluso a cortas distancias (10 m), generando un decremento abrupto de P_D, que caerá a valores inferiores a 0.1 en casi la totalidad de los casos analizados. La tabla 4 muestra la reducción en P_D para la Banda-S, utilizando un radar pulsado sin integración de pulsos (es decir, que utilice un único pulso), donde se han considerado dos casos estándar: El caso 1, con un sistema con P_D=0.9, P_{fa}=10^{-8}, y SNR_{min} de detección 14.2 dB; y el caso 2, que asume un radar de precisión con P_D=0.9999, P_{fa}=10^{-12} y SNR_{min} de detección 17.8 dB. Se puede observar el importante impacto que tiene el la zona forestal en la probabilidad de detección, dado que la mantiene por debajo de 0.4 en todos los casos, y por debajo de 0.1 en la mayor parte de las situaciones analizadas.

Bosque o entorno	Reducción SNR (dB)	**CASO 1** P_D=0.9 Pfa=10^{-8} SNR_{min}=14.2 dB	**CASO 2** P_D=0.9999 Pfa=10^{-12} SNR_{min}=17.8 dB
		Nueva P_D	***Nueva P_D***
Robleda (verano)	-10.5	<0.1	<0.1
Robleda (invierno)	-11.3		
Pinar	-11.5		
Eucalipto	-4.3		0.3
Prado	-12.9		<0.1

Tabla 4. Reducción de P_D en Banda-S a cortas distancias (10 m)

Los resultados mostrados utilizan un radar monopulso, donde la detección del blanco se realiza analizando un único eco. En la actualidad, los sistemas radar disponen de técnicas de integración de pulsos, que incrementan la *SNR* recibida sumando los ecos recibidos de dos o más pulsos transmitidos. Dicha suma se puede realizar de forma coherente o incoherente, dependiendo si el sistema retiene (o no) la información de la fase de la señal radar. Ambas técnicas tienen un impacto importante en el incremento de la *SNR*, donde la integración de sólo 10 pulsos puede mejorar la *SNR* en 10 dB [9].

Supongamos el mejor caso para la detección (que es el peor en términos de invisibilidad radar) para demostrar la eficiencia del camuflaje debido a masas forestales: *n* pulsos de la misma *SNR* que se suman de forma perfecta en un integrador coherente sin pérdidas [5]. En este caso, la *SNR* integrada será exactamente *n* veces superior a la que se tenía en el caso de un único pulso. La mínima *SNR* necesaria para detectar un blanco se verá reducida con respecto al caso del pulso único, como se muestra en la ecuación (4), donde $SNR_{n\ pulsos}$ se corresponde con la *SNR* necesaria para producir la mima P_D en el caso de pulso único, cuando se transmiten *n* pulsos.

$$SNR_{n\ pulsos} = \frac{SNR_{1\ pulso}}{n} \tag{4}$$

Toda técnica de integración de pulsos tiene sus limitaciones, puesto que los pulsos a integrar se deben corresponder con los ecos provenientes de una misma dirección. Esto es especialmente crítico en los radares de 360º, donde el número de pulsos viene limitado por la velocidad de rotación de la antena (w_r), el ancho de haz en azimut de la misma (θ_H) y la frecuencia de repetición de pulsos del radar (*Pulse Repetition Frequency* o *PRF*), tal y como se muestra en la ecuación (5). Dado que las antenas tienen una velocidad de rotación mínima, el número máximo de pulsos que el sistema podrá integrar viene prefijado de fábrica.

$$n = \frac{\theta_H \cdot PRF}{6 \cdot w_r} \tag{5}$$

La mayor parte de los radares civiles y militares son capaces de integrar entre 15 y 30 pulsos. Fijado *n*, la ecuación (4) proporciona la mínima *SNR* necesaria, que utilizaremos para obtener la nueva P_D en el caso de tener una pantalla forestal. La tabla 5 muestra la nueva probabilidad de detección para los mismos entornos vegetados y alcances de la tabla 4, con *n=15* pulsos integrados. Las diferencias en la probabilidad de detección son llamativas, puesto que ahora todos los blancos a corto alcance (10 m) son perfectamente detectables.

Bosque o Entorno	*SNR n pulsos* (dB)	**CASO 1** P_D=0.9 Pfa=10^{-8} $SNR_{min\ n\ pulsos}$=2.44 dB	**CASO 2** P_D=0.9999 Pfa=10^{-12} $SNR_{min\ n\ pulsos}$=6.04 dB
		Nueva P_D	***Nueva P_D***
Robleda (verano)	3.7	0.99	1
Robleda (invierno)	2.9	0.95	1
Pinar	2.7	0.9	1
Eucalipto	9.9	1	1
Prado	1.3	0.7	0.6

Tabla 5. Reducción de P_D en Banda-S a cortas distancias (10 m) utilizando integración de pulsos

Se debe tener en cuenta que, a corta distancia, los bosques analizados no proporcionan suficiente atenuación porque están formados predominantemente por troncos, cuando es el follaje lo que realmente es mejor dispersor y atenuador [10].

La atenuación proporcionada por la vegetación se verá incrementada exponencialmente cuando el blanco se aleje del radar, por lo que se repetirá el análisis anterior para una distancia de 100 m. Este alcance es muy común en aplicaciones militares porque es la distancia media que alcanzan distintos proyectiles de corto alcance (como balas y otro tipo de artillería), por lo que 100 m suele ser el rango elegido a la hora de establecer un perímetro de seguridad. La tabla 6 muestra la nueva P_D para la configuración radar estándar (P_D = 0.9 and P_{fa} = 10^{-8}), operando en Banda-S, con *n=15* y *n=30* pulsos integrados, y un blanco situado 100 m adentrado en la foresta.

Bosque o Entorno	*SNR n pulsos* (dB)	P_D n = 15 $SNR_{min\ (n\ pulsos)} = 2.4\ dB$	P_D n = 30 $SNR_{min\ (n\ pulsos)} = -0.5\ dB$
		Nueva P_D	***Nueva P_D***
Robleda (verano)	-7.0	<0.1	<0.1
Robleda (invierno)	-5.0		
Pinar	-17.4		
Eucalipto	-0.6	0.2	0.9
Prado	3.3	0.9	1

Tabla 6. Reducción de P_D en Banda-S a media distancia (100 m) utilizando integración de pulsos

El aumento en la sensibilidad del receptor, debido a la integración de pulsos, implica que en los entornos con menor densidad de vegetación (bosques de eucaliptos y prados), no son capaces de proporcionar atenuación suficiente cuando el número de pulsos integrados es elevado. En el caso de las

praderas, el resultado es el que cabría esperar, y en el caso del bosque de eucaliptos, se debe a que, a la altura de la antena, el bosque está formado casi en su totalidad por troncos, con poca maleza colindante.

La eficiencia de las pantallas forestales es todavía mayor si consideramos blancos móviles (o blancos tipo *Swerling*), cuya firma radar (*RCS*) es variable en el tiempo. Dicha variación se modela como un aumento en la RCS_{min} necesaria en el receptor, y puede clasificarse en cinco categorías principales, como se muestra en la tabla 7 [11].

Tipo de blanco	Ecos correlados en una ráfaga	Ecos decorrelados pulso a pulso
Muchos dispersores comparables	Swerling 1	Swerling 2
Un dispersor dominante y muchos dispersores menores	Swerling 3	Swerling 4
Blancos no fluctuantes (o estáticos)	Swerling 0 o Swerling 5	

Tabla 7. Tipos de blancos Swerling según fluctuación *RCS*

La figura 2 muestra la dependencia de la probabilidad de detección con este tipo de blancos, donde se puede comprobar que, cuando se intenta detectar blancos fluctuantes, los requisitos de *SNR* se ven incrementados en 3 dB con respecto al blanco estático (*Steady target*) para los blancos Swerling 1 y 2, y hasta 8 dB para los blancos Swerling 3 y 4. Por lo tanto, la probabilidad de detección se verá reducida, incluso en el mejor de los casos de los blancos fluctuantes.

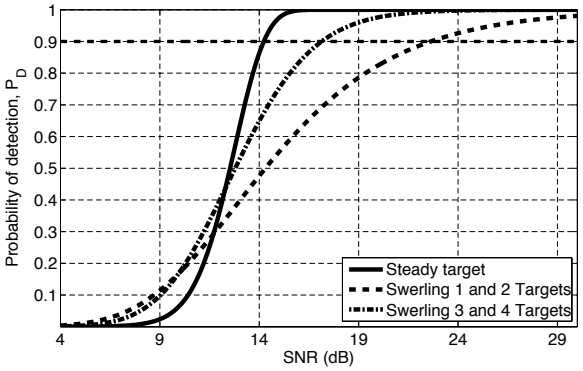


Figura 2. P_D para $P_{fa}=10^{-8}$, y blancos de tipo Swerling

Para validar la propuesta de este trabajo, analizaremos la P_D obtenida para un caso de radar de vigilancia típico (P_D = 0.9, P_{fa} = 10^{-8}) que integre *n=30* pulsos de forma perfecta, y un blanco fluctuante en un rango de 100 m. La tabla 8 muestra la caída de la P_D para los cinco entornos vegetados y blancos de tipo Swerling, en comparación con blancos estáticos.

Los resultados demuestran que la propuesta de este trabajo de utilizar masas forestales como camuflaje frente a un radar es suficientemente buena para reducir la probabilidad de detección del radar a mínimos indetectables. Con respecto a la frecuencia, el impacto sería mucho más acentuado en bandas de frecuencia superiores (Banda-C). Las especies vegetales con follaje más denso (como los bosques de robles en verano, o los pinares) inducirán mayores reducciones de la *SNR*, y por lo tanto, proporcionan mayor invisibilidad radar para cualquier tipo de blanco.

Bosque o Entorno	*SNR n pulsos* (dB)	Blanco Estático	Blanco Swerling tipo 1 y 2 *Reducción SNR* = -3 dB	Blanco Swerling tipo 3 y 4 *Reducción SNR* = -8 dB
		Nueva P_D	***P_D***	***P_D***
Robleda (verano)	-7.0	<0.1	< 0.1	<0.1
Robleda (invierno)	-5.0			
Pinar	-17.4			
Eucalipto	-0.6	0.9	0.2	
Prado	3.3	1	0.98	0.1

Tabla 8. Reducción de la P_D en Banda-S, utilizando integración de pulsos (*n=30*), medio alcance (100 m) y blancos fluctuantes

En realidad, la atenuación que proporcionarían las pantallas vegetales es todavía mayor en un caso real práctico, porque existen otros muchos factores que han sido obviados de cara a la realización de este estudio. Un ejemplo claro sería el hecho de que se ha asumido integrador de pulsos sin pérdidas, mientras que los sistemas reales tienen eficiencias de integración en torno al 70%-100%, lo que decrementaría la probabilidad de detección con respecto a las tablas 6 y 8. Otros efectos que se han soslayado son, por ejemplo, el efecto del viento en la atenuación de la vegetación (que aumentaría la atenuación y la dispersión de los ecos recibidos), o el ruido adicional (*clutter*) que devuelve la propia foresta debido al multitrayecto y a la dispersión adicional que proporciona un entorno intrínsecamente ruidoso como es un bosque.

4. Conclusiones

En este trabajo analizamos la utilización de bosques y zonas arboladas para ser utilizadas como contramedidas radar para generar invisibilidad radar y por tanto, protección contra detección.

Se han presentado, en primer lugar, los resultados de una extensa campaña de medidas, donde se han recopilado medidas de atenuación en cinco entornos diferentes, en las bandas de frecuencia S y C. A partir de ellos se ha obtenido un modelo cuyos parámetros y fórmula constitutiva han sido igualmente presentados.

Teniendo en cuenta dichas atenuaciones, se ha calculado el efecto de dichos entornos en la probabilidad de detección, tanto de radares monopulso como en radares que utilizan integración de pulsos, considerando los cinco tipos de blancos Swerlling. Los resultados indican que, en la mayor parte de los casos, la probabilidad de detección cae por debajo de 0.1, lo que significa que los bosques proporcionan una protección eficiente contra la detección radar, a distancias estándar de 100 m.

Todos los test realizados indican que la eficiencia radar se ve degradada de forma importante cuando el blanco se encuentra oculto entre la maleza, reforzando la idea de la utilización de bosques como contramedidas radar.

Agradecimientos

Investigación patrocinada por el Ministerio de Economía y Competitividad, Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación, (proyecto TEC2011-28789-C02-02), el Centro de Investigación AtlantTIC y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Referencias

1. F. Wang, W. Jiang, T. Hong, H. Xue, S. Gong, Y. Zhang, "Radar cross section reduction of wideband antenna with a novel wideband radar absorbing materials", IET Microwaves, Antennas and Propagation, vol.8, no,7, pp.491–497, 2014
2. J.A. Gay–Fernández, I. Cuiñas, "Peer to Peer Wireless Propagation Measurements and Path–Loss Modeling in Vegetated Environments", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol 61, no. 6, pp. 3302–3311, June 2013.
3. P. Gómez, I. Cuiñas, A.V. Alejos, M.G. Sánchez, J.A. Gay–Fernández, "Analysis of the performance of vegetation barriers to reduce electromagnetic pollution", IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 5, no. 6, pp. 651–663, April 2011
4. J.P. Camacho, "Federal Radar Spectrum Requirements", NTIA Special Publication 00–40, National Telecommunications and Information Administration, US Department of Commerce, May 2000.
5. M.I. Skolnik, "Radar Handbook", 2nd Edition, McGraw Hill, USA, 1990.
6. N. Friedman, "The Naval Institute Guide to World Naval Weapon Systems, 5th Edition", Naval Institute Press, Annapolis, Maryland, USA, 2006.
7. D. O. North, "An Analysis of the Factors which Determine Signal/Noise Discrimination in Pulsed Carrier Systems", Proceedings of the IEEE, vol. 51, no. 7, pp. 1015–1027, July 1963.
8. Recommendation ITU–R P.525–2, "Calculation of free–space attenuation", ITU Radiocommunication Assembly, 2000.
9. G. Richard Curry, "Radar Essentials", SciTech Publishing Inc., USA, 2012.
10. P. Gómez, I. Cuiñas, A.V. Alejos, M.G. Sánchez, R.F.S. Caldeirinha, "Shrub–Blown Time Variability in Attenuation and Scattering at Cellular Frequencies", IET Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 4, no. 4, pp. 526–542, April 2010.
11. IP. Swerling, "Probability of detection of fluctuating targets", IRE Transactions on Information Theory, Vol. 6, No. 2, pp. 269–308, April 1960.

Invisibilidad de blancos radar mediante pantallas vegetales

Gómez Pérez, Paula [1,*], Cuiñas, Iñigo [2]

[1] Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar, Marín, España. Email: paula@cud.uvigo.es

[2] Dept. de Teoría do Sinal e Comunicacións, Universidade de Vigo, Vigo, España; Email: inhigo@uvigo.es

* Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: paula@cud.uvigo.es

---

Abstract: En la últimas décadas se ha demostrado que la vegetación atenúa y dispersa las ondas radioeléctricas de forma efectiva. Aunque en un primer momento se consideró la vegetación como un obstáculo "blando" en términos de atenuación, investigaciones recientes ratifican que los árboles y arbustos pueden inducir importantes atenuaciones en la señal transmitida. Esto abre la puerta a un posible uso de la vegetación como forma alternativa de camuflaje para obtener invisibilidad radar. Este artículo propone la utilización de pantallas vegetales como *tecnología stealth*, cuantificando la degradación en la probabilidad de detección de varios sistemas radar en las bandas de UHF y microondas. Se demostrará que este tipo de apantallamientos puede proporcionar reducciones en la probabilidad de detección hasta situarla por debajo de 0.1, validando la propuesta de este trabajo.

Keywords: *radar, radar target recognition, attenuation measurements, scattering*

---

1. Introducción

En la actualidad, existen diferentes líneas de investigación que tratan de conseguir la invisibilidad radar de la forma más eficiente posible. Este tipo de técnicas, denominadas *tecnologías stealth*, aglutinan diferentes enfoques, entre los que se cuentan, entre otros, la investigación de nuevos materiales sintéticos absorbentes radar (*RAM*) o el rediseño de superficies (como los cascos invertidos o *thumblesome hulls*). Dichos métodos se basan en dos principios de funcionamiento principales: la absorción de la mayor cantidad posible de energía incidente, y/o la dispersión de la señal reflejada en direcciones contrarias a la de incidencia (donde se ubicaría el radar).

Ambas opciones inspiran la propuesta de este trabajo: por un lado, el follaje del elemento vegetal absorberá gran parte de la energía incidente, y por otra parte, los elementos vegetales funcionan como un conjunto de dispersores independientes (tronco, hojas, ramas…), lo que contribuirá a la dispersión de la señal reflejada, reduciendo la potencia del eco que vuelve en dirección al radar.

Las figuras 1 y 2 explican la propuesta en detalle. La figura 1 representa el esquema típico de detección de un radar monoestático: el sistema radar transmite una señal, ésta se ve reflejada en un blanco determinado y retorna al sistema radar tras haber sufrido la atenuación correspondiente a las pérdidas de propagación en espacio libre (en el camino de ida-y-vuelta) y a las propias de la reflexión en el blanco (debido a su forma, material,…).



Figura 1. Esquema de detección de un radar monoestático

La figura 2 muestra la misma situación, pero con una pantalla vegetal ubicada en la línea de visión directa entre el blanco y el radar. Una vez la onda incide sobre el volumen vegetal, se genera un patrón de dispersión alrededor de dicha masa vegetal, haciendo que parte de la señal sea reflejada de vuelta al radar (ondas en líneas discontinuas). Adicionalmente, parte de la señal (ondas en líneas continuas) atraviesa la cubierta vegetal y se transmite hacia el blanco, sufriendo una atenuación que dependerá del patrón de atenuación de la masa vegetal. La señal atenuada alcanza al blanco, que reflejará una proporción de la misma dependiendo de su firma radar (o *RCS*). Como la pantalla vegetal sigue obstaculizando la trayectoria, la señal vuelve a verse atenuada en el camino de retorno al radar, por lo que vuelve a atravesar el volumen vegetal. Por tanto, sólo una porción doblemente atenuada de la señal alcanzará al receptor radar. El resultado es que el sistema recibirá la señal dispersada por la masa vegetal (*clutter*), así como la señal reflejada por el blanco que ha sufrido una doble atenuación inducida por la pantalla vegetal (eco del blanco).

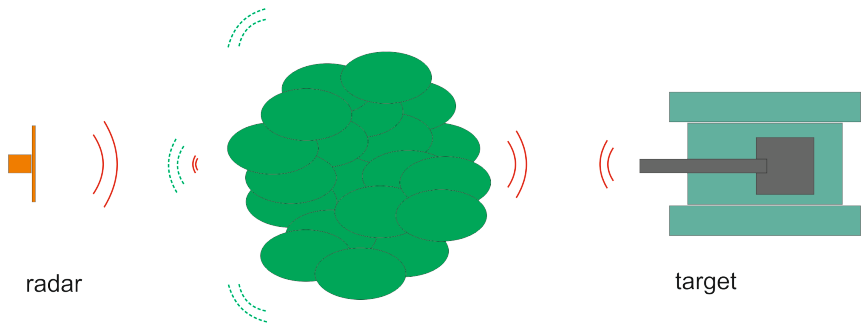


Figura 2. Respuesta radar cuando el blanco está protegido tras una cubierta vegetal

Dependiendo de dicha atenuación y de la ubicación relativa entre radar blanco y barrera vegetal, el radar será capaz (o no) de detectar el blanco. Cuando la señal recibida sea suficientemente débil para

que no se consiga la detección, se podrá afirmar que el volumen vegetal está actuando como apantallamiento electromagnético, camuflando al blanco.

Por tanto, cabe preguntarse ¿es posible utilizar la vegetación como una pantalla de invisibilidad radar? En caso afirmativo, ¿bajo qué condiciones podría funcionar de forma efectiva? Para responder a estas preguntas, se han llevado a cabo diferentes estudios en función de la sensibilidad del radar, la frecuencia, la especie vegetal y sus dimensiones, así como otros parámetros, de forma que se pueda evaluar de forma cuantitativa la viabilidad de esta propuesta.

2. Medición de la atenuación debida a vegetación

Las propiedades de invisibilidad radar de las barreras vegetales puede analizarse en el caso de disponer de árboles individuales, o bien a través de la formación de barreras vegetales en forma de líneas de árboles o arbustos. Ambos escenarios han sido medidos a lo largo de extensas campañas de medidas.

2.1. Configuración y procedimiento de medida

El fin de dichas campañas de medidas fue el de obtener la atenuación que proporciona la vegetación en el lado opuesto al transmisor, en la zona de sombra del volumen vegetal. Para ello, se utilizó un esquema biestático, con un transmisor y un receptor ubicados en emplazamientos diferentes, con el elemento vegetal ubicado en el medio. Se diseñaron campañas de medidas diferentes para árboles aislados y para barreras vegetales. La campaña de medidas para árboles aislados está descrita en detalle en [1], mientras que el esquema de medida para las líneas de árboles se especifica en [2]. En ambos casos, se han utilizado las atenuaciones medianas para llevar a cabo los análisis de este trabajo.Las medidas de atenuación se llevaron a cabo en condiciones de banda estrecha. Las frecuencias seleccionadas estuvieron todas por debajo de los 6 GHz, en bandas asignadas a aplicaciones radar tanto civiles como militares, cuyo resumen se muestra en la tabla 1 [3] [4] [5].

<table>
<tr><th rowspan="2">Banda</th><th rowspan="2">Frecuencia medida (MHz)</th><th colspan="2">Aplicación radar</th></tr>
<tr><th>Civil</th><th>Militar</th></tr>
<tr><td>UHF</td><td>900</td><td>radiolocalización</td><td>exploración aérea</td></tr>
<tr><td>L</td><td>1,400</td><td colspan="2">radares de vigilancia terrestres de largo alcance
(como radares para control de tráfico aéreo)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">S</td><td>2,400</td><td rowspan="2">radiolocalización</td><td rowspan="2">radares de vigilancia
(detección y seguimiento de blancos)
iluminadores y control de tiro</td></tr>
<tr><td>3,500</td></tr>
<tr><td>C</td><td>5,800</td><td>radiolocalización</td><td>vigilancia aérea</td></tr>
</table>

Tabla 1. Frecuencias consideradas y aplicaciones militares más comunes en dichas bandas

2.2. Evaluación de las atenuaciones obtenidas

Aunque los experimentos descritos en [1] y [2] proporcionan multitud de configuraciones, en este artículo nos centraremos en dos casos: pantallas vegetales formadas por árboles aislados, y pantallas vegetales formadas por líneas de árboles (barreras simples y dobles).

La tabla 2 muestra las atenuaciones medianas inducidas por los árboles aislados en las frecuencias consideradas. Se puede observar que la presencia de árboles obstaculizando la línea de visión directa con el blanco genera una atenuación adicional en la potencia recibida para todos los casos considerados. Se puede también comprobar que la atenuación aumenta con la frecuencia. En cuanto a la especie vegetal, se deduce que las pérdidas son proporcionales a la densidad del follaje de la especie, así como con el tamaño y forma de sus hojas [1].

Especie	**Frecuencia**			
	UHF	**L**	**S**	**C**
Ficus	1.5	3.9	-	-
Schefflera	2.4	3.2	5.1	16.5
Calistemo	0.8	3.9	4.2	4.5
Camelia	2.6	7.8	6.9	9.2
Junípero	2.8	4.5	5.7	6.8
Tuya	1.0	1.1	1.1	2.9
Areca	1.0	1.1	1.9	11.9

Tabla 2. Atenuación inducida en diferentes bandas por especímenes aislados (dB/m)

Los resultados para camuflaje basado en barreras vegetales se muestran en las tablas 3 y 4, para barreras simples y dobles. Igual que en el caso anterior, la atenuación aumenta con la frecuencia. Sin embargo, dependiendo de la especie y de la configuración de la barrera, se aprecian ligeras ganancias en la potencia recibida. Esto se debe a que la interacción entre los diferentes dispersores (hojas, ramas) puede llegar a generar interferencias constructivas que incrementen la señal [2] [6].

Especie	**Frecuencia**			
	UHF	**L**	**S**	**C**
Ficus	-1.4	0.1	2.1	5.9
Schefflera	-2.3	-1.0	0.1	1.0
Calistemo	0.0	2.2	3.3	5.4
Camelia	1.4	2.8	5.4	8.2
Junípero	3.9	6.8	9.6	10.1
Tuya	1.2	1.7	3.5	6.2
Areca	-0.9	-1.0	3.2	2.1

Tabla 3. Atenuación inducida en las diferentes bandas de frecuencia para líneas simples de arbustos (dB)

Especie	**Frequency**			
	UHF	**L**	**S**	**C**
Ficus	-2.7	2.7	7.1	9.9
Schefflera	-2.3	0.8	2.5	6.4
Calistemo	1.2	2.4	10.5	14.6
Camelia	1.6	4.5	10.4	13.5
Junípero	5.5	9.8	15.7	19.8
Tuya	3.6	3.4	5.2	8.8
Areca	-1.9	-1.9	2.0	3.8

Tabla 4. Atenuación inducida en las diferentes bandas de frecuencia para líneas dobles de arbustos (dB)

3. Pantallas vegetales como elementos de camuflaje radar

En términos generales, un radar detectará un blanco cuando la potencia recibida exceda un umbral, que viene determinado por la sensibilidad del receptor. La disminución de la señal recibida afectará de forma negativa a la probabilidad de detección del radar.

Como muestra la figura 3, la potencia recibida superará el umbral cuando se detecte un blanco fuerte, o bien cuando se dé un pico fuerte de ruido en el sistema, generando una falsa alarma.

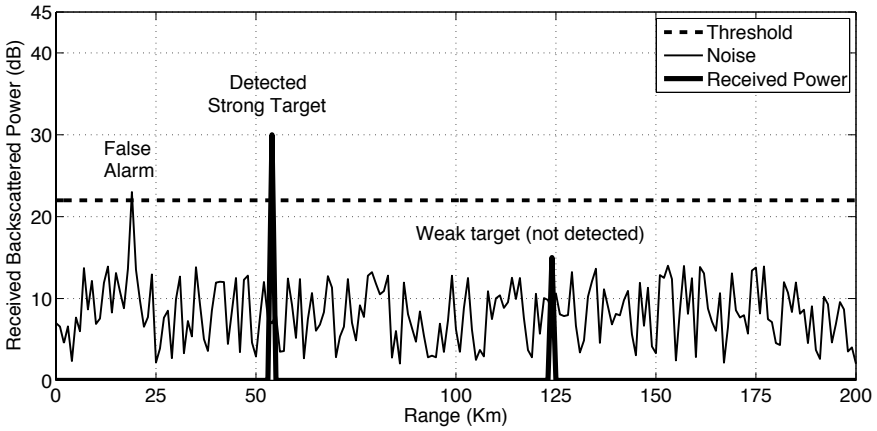


Figura 3. Ejemplo de potencia recibida (dB)

Dos parámetros definen la fiabilidad de un sistema radar: la probabilidad de detección (P_D) y la probabilidad de falsa alarma (P_{fa}). Ambas se relacionan entre sí mediante la relación señal-a-ruido (*SNR*) del detector radar. La relación entre la *SNR*, la P_D y la P_{fa} es difícilmente cuantificable, pero se puede aproximar por la ecuación (1) [7]:

$$P_D = 0.5 \times erfc\left(\sqrt{-ln\left(P_{fa}\right)} - \sqrt{SNR + 0.5}\right) \quad (1)$$

donde *erfc* es la *función de error complementario*, definido por la ecuación (2).

$$\mathrm{erfc(z)} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \mathrm{e}^{-\mathrm{v}^2} \quad (2)$$

La tabla 5 proporciona algunos ejemplos de la *SNR* necesaria para diferentes valores de P_D y P_{fa} , en sistemas monopulso.

La figura 4 muestra la relación entre la *SNR* y la probabilidad de detección, P_D, con la configuración más típica de ambos parámetros: 0.9 para la probabilidad de detección y 10^{-6} para la probabilidad de falsa alarma [4]. Por tanto, como la figura 4 y la tabla 5 muestran, esta relación implica la existencia de una SNR_{min} necesaria en el receptor de 13.3 dB para que un blanco estático (*steady target*) sea detectado.

P_D	P_{fa}									
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
.1	4.00	6.19	7.85	8.95	9.94	10.44	11.12	11.62	12.16	12.65
.2	5.57	7.35	8.75	9.81	10.50	11.19	11.87	12.31	12.85	13.25
.3	6.75	8.25	9.50	10.44	11.10	11.75	12.37	12.81	13.25	13.65
.4	7.87	8.85	10.18	10.87	11.56	12.18	12.75	13.25	13.65	14.00
.5	8.44	9.45	10.62	11.25	11.95	12.60	13.11	13.52	14.00	14.35
.6	8.75	9.95	11.00	11.75	12.37	12.88	13.50	13.87	14.25	16.62
.7	9.56	10.50	11.50	12.31	12.75	13.31	13.87	14.20	15.59	14.95
.8	10.18	11.12	12.05	12.62	13.25	13.75	14.25	14.55	14.87	15.25
.9	10.95	11.85	12.65	**13.31**	13.85	14.25	14.62	15.00	15.45	15.75
.95	11.50	12.40	13.12	13.65	14.25	14.64	15.10	15.45	15.75	16.12
.98	12.18	13.00	13.62	14.25	14.62	15.12	15.47	15.85	16.25	16.50
.99	12.62	13.37	14.05	14.50	15.00	15.38	15.75	16.12	16.47	16.75
.995	12.85	13.65	14.31	14.75	15.25	15.71	16.06	16.37	16.65	17.00
.998	13.31	14.05	14.62	15.06	15.53	16.05	16.37	16.70	16.89	17.25
.999	13.62	14.25	14.88	15.25	15.85	16.13	16.50	16.85	17.12	17.44
.9995	13.84	14.50	15.06	15.55	15.99	16.35	16.70	16.98	17.35	17.55
.9999	14.38	14.94	15.44	16.12	16.50	16.87	17.12	17.35	17.62	**17.87**

Tabla 5. *SNR* (dB) en función de P_D y P_{fa} (sistemas monopulso)

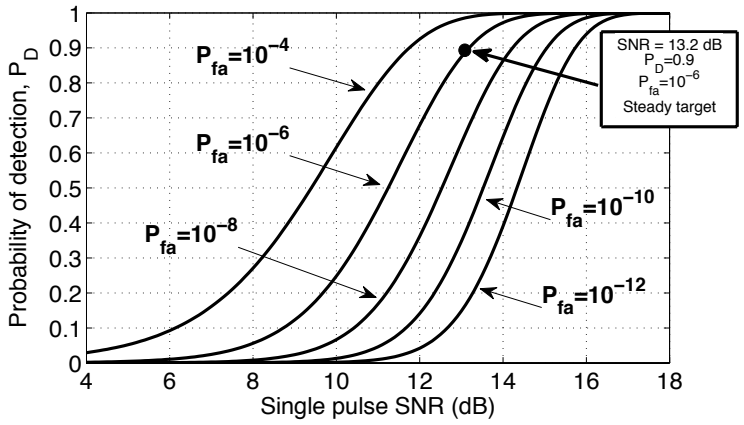


Figura 4. Dependencia de la P_D sobre la *SNR*

Colocar una barrera vegetal alrededor del blanco reducirá la señal recibida en el radar, degradando la *SNR* y por tanto, reduciendo la probabilidad de detección. A modo de ejemplo, la tabla 6 muestra la probabilidad de detección cuando se utiliza una barrera doble, mientras que la tabla 7 muestra el caso de una barrera simple. En ambas situaciones, se han considerados dos casos: El caso 1, consistente en un sistema radar con P_D=0.9, Pfa=10^{-6}, que hace necesaria una SNR_{min} en el receptor de 13.3 dB; y el caso dos, que consiste en un radar con P_D=0.9999, Pfa=10^{-12} y SNR_{min} en el receptor de 17.8 dB. En estas dos tablas podemos observar el importante impacto que tiene la pantalla vegetal en la probabilidad de detección, dado que permanece por debajo de 0.1 en la práctica totalidad de los casos analizados: sólo aquellas especies con copas menos densas no consiguen cumplir esta condición.

Especie	Reducción SNR (dB)	**CASO 1** P_D=0.9 Pfa=10^{-6} SNR_{min}=13.3 dB	**CASO 2** P_D=0.9999 Pfa=10^{-12} SNR_{min}=17.8 dB
		Nueva P_D	*Nueva* P_D
Ficus	-14.2	<0.1	<0.1
Schefflera	-5.0		0.1
Calistemo	-21.0		<0.1
Camelia	-20.8		
Junípero	-31.4		
Tuya	-10.4		
Areca	-4.0	<0.2	0.35

Tabla 6. Reducción de P_D utilizando barreras vegetales dobles, en Banda-S

Especie	Reducción SNR (dB)	**CASO 1** P_D=0.9 Pfa=10^{-6} SNR_{min}=13.3 dB	**CASO 2** P_D=0.9999 Pfa=10^{-12} SNR_{min}=17.8 dB
		P_D	P_D
Ficus	-4.2	0.1	0.3
Schefflera	-0.2	0.8	0.9995
Calistemo	-6.6	<0.1	<0.1
Camelia	-10.8		
Junípero	-19.2		
Tuya	-7.0		
Areca	-6.4		

Tabla 7. Reducción de P_D utilizando barreras vegetales simples, en Banda-S

Incluso aunque sólo dispongamos de un único elemento vegetal obstruyendo la línea de visión directa, el impacto en la probabilidad de detección es importante, independientemente de la frecuencia utilizada, como se muestra en la tabla 8, para P_{fa}=10^{-6} y SNR_{min} de 13.3 dB.

Especie	Banda UHF		Banda-S	
	Reducción SNR (dB)	P_D	Reducción SNR (dB)	P_D
Ficus	-3.0	0.35	-	-
Schefflera	-4.8	<0.1	-10.2	<0.1
Calistemo	-0.8	0.7	-8.4	<0.1
Camelia	-5.0	<0.1	-13.8	<0.1
Junípero	-5.4	<0.1	-11.4	<0.1
Tuya	-1.8	0.6	-2.2	0.6
Areca	-1.8	0.6	-3.6	0.2

Tabla 8. Reducción *SNR* y P_D debida a árboles aislados

En el caso de blancos fluctuantes cuya firma radar (*RCS*) es variable en el tiempo, un descenso en la *SNR* tiene un impacto todavía mayor en la probabilidad de detección. Existen cinco tipos diferentes de blancos fluctuantes dependiendo del tamaño de los dispersores que conforman el blanco y de la correlación temporal de sus ecos recibidos. La clasificación de blancos fluctuantes (denominados *blancos Swerling*) se muestra en la tabla 9 [8].

Tipo de blanco	Ecos correlados en una ráfaga	Ecos incorrelados pulso a pulso
Muchos dispersores comparables	Swerling 1	Swerling 2
Un dispersor dominante y muchos dispersores menores	Swerling 3	Swerling 4
Blancos no fluctuantes (o estáticos)	Swerling 0 o Swerling 5	

Tabla 9. Tipos de blancos Swerling según fluctuación *RCS*

Las variaciones de *RCS* se modelan como una reducción de la señal recibida, por lo que equivale a una atenuación adicional que se añade al sistema, y que se incorpora en la ecuación de alcance radar como un incremento en la SNR_{min} que necesitaría el receptor para detectar el blanco [8]. La figura 5 muestra la dependencia de la probabilidad de detección con el tipo de blanco, para una probabilidad de falsa alarma de 10^{-6}. Se puede comprobar que los requisitos de SNR_{min} con blancos fluctuantes se incrementan en, al menos, 3 dB con respecto al caso de blancos estáticos. Por tanto, incluso en el mejor de los casos de los blancos fluctuantes (blancos *Swerling* 3 y 4), la probabilidad de detección se verá siempre reducida.

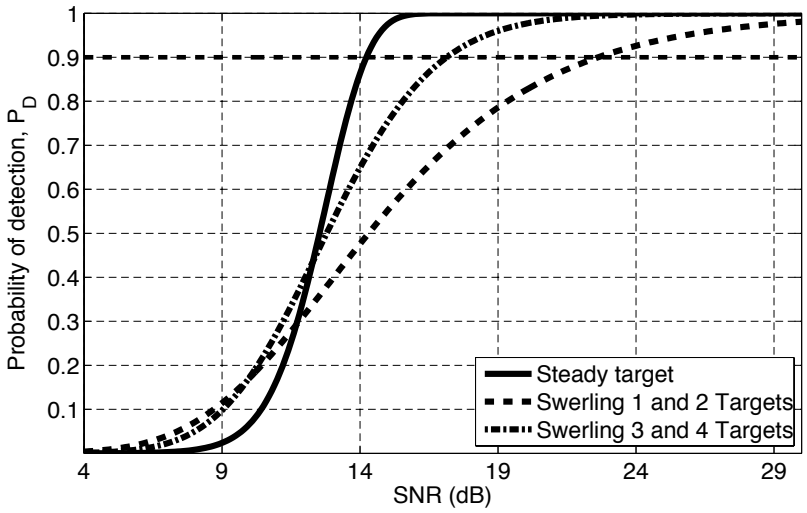


Figura 5. P_D para $P_{fa}=10^{-8}$, y blancos de tipo Swerling

Las tablas 10 y 11 muestran el análisis de la P_D para el caso de árboles aislados, blancos fluctuantes, bandas de frecuencia UHF y Banda-S, respectivamente, cuando la P_{fa} está fijada en 10^{-6} y tenemos una SNR_{min} de 13.3 dB. Los resultados demuestran que la propuesta de utilizar pantallas vegetales, incluso en aquellas especies con las copas menos densas, es suficientemente eficiente para reducir la probabilidad de detección de un sistema radar. En cuanto a la frecuencia, el impacto es más drástico en las bandas de frecuencias altas (Bandas S y C), aunque las bandas bajas (UHF) también se ven fuertemente afectadas. Las especies vegetales con follaje más denso proporcionarán mayores reducciones en la SNR, y por lo tanto, ofrecerán mejor camuflaje a cualquier blanco.

Especie	Reducción *SNR* (dB)	Blanco estático	Blanco Swerling tipo 1 y 2	Blanco Swerling tipo 3 y 4
		P_D	P_D	P_D
Ficus	-3.0	0.35	<0.1	<0.1
Schefflera	-4.8	<0.1		<0.1
Calistemo	-0.8	0.7		0.2
Camelia	-5.0	<0.1		<0.1
Junípero	-5.4	<0.1		<0.1
Tuya	-1.8	0.6		<0.1
Areca	-1.8	0.6		<0.1

Tabla 10. Reducción de la *SNR* y nueva P_D con árboles aislados, blancos fluctuantes en UHF

Especie	Reducción *SNR* (dB)	Blanco estático	Blanco Swerling tipo 1 y 2	Blanco Swerling tipo 3 y 4
		P_D	P_D	P_D
Ficus	-	-	-	-
Schefflera	-10.2	<0.1	<0.1	<0.1
Calistemo	-8.4	<0.1		
Camelia	-13.8	<0.1		
Junípero	-5.4	<0.1		
Tuya	-2.2	0.6		
Areca	-3.6	0.2		

Tabla 11. Reducción de la *SNR* y nueva P_D con árboles aislados, blancos fluctuantes en Banda-S

Los resultados mostrados hasta el momento son aplicables a radares monopulso. En la actualidad, los sistemas radar incorporan técnicas de integración de pulsos para aumentar la *SNR* recibida, sumando todos los ecos provenientes de una misma dirección espacial. Para validar la propuesta de este trabajo, supongamos el mejor caso (en términos de detección, que es el peor en términos de invisibilidad radar): *n* pulsos de la misma *SNR* que sumados de forma perfecta en un integrador coherente [4]. De esta forma, la *SNR* sería exactamente *n* veces la que se tendría en el caso de un radar monopulso. La SNR_{min} necesaria para detectar un blanco se verá por tanto reducida en *n*, como se muestra en (3), donde $SNR_{n\ pulsos}$ se corresponde con la *SNR* necesaria para producir la misma P_D en el caso monopulso.

$$SNR_{n\ pulsos} = \frac{SNR_{1\ pulso}}{n} \tag{3}$$

Estas técnicas tienen sus limitaciones, especialmente en los radares rotatorios, porque los pulsos a integrar deben provenir de la misma dirección. Por tanto, *n* dependerá de la velocidad de rotación (w_r) y del ancho de haz de la antena (θ_H), así como de la frecuencia de repetición de pulsos (*PRF*). La relación entre estas magnitudes se muestra en (4). Como estas antenas suelen tener una velocidad de rotación mínima, el número máximo de pulsos *n* que podremos integrar viene prefijado de fábrica.

$$n = \frac{\theta_B \cdot PRF}{6 \cdot w_r} \tag{4}$$

La mayor parte de los sistemas radar civiles y militares integran un número de pulsos entre 15 y 30. Para un valor dado de *n*, la SNR_{min} necesaria se puede calcular a través de (4), y compararse con el caso de tener una pantalla vegetal, para obtener la nueva P_D. La tabla 12 muestra la nueva probabilidad de detección, en Banda-S, para todas las pantallas vegetales analizadas, tomando como caso de partida un radar estándar con $SNR_{1\ pulso} = 13.3\ dB$ (es decir, una P_D=0.9 y una P_{fa}=10-6).

Al aumentar la sensibilidad del receptor, las barreras vegetales más ligeras, como es el caso de los árboles aislados, no proporcionan camuflaje suficiente para ocultar ningún blanco. Sin embargo, la configuración de barrera doble con especies de follaje denso, como son el calistemon, la camelia o el junípero han demostrado su eficiencia, porque la reducción en la *SNR* proporciona una P_D prácticamente nula.

Pantalla vegetal	**Especie**	$\boldsymbol{SNR_{n\ pulsos}}$	$\boldsymbol{P_D}$ **n = 15** $SNR_{min\ (n\ pulsos)} = 1.53\ dB$	$\boldsymbol{P_D}$ **n = 30** $SNR_{min\ (n\ pulsos)} = -1.47\ dB$
Árboles aislados	Ficus	-	-	-
	Schefflera	3,08	0.995	1
	Calistemo	4,9	1	1
	Camelia	-0,5	0.7	0.98
	Junípero	7,9	1	1
	Tuya	11,1	1	1
	Areca	9,54	1	1
Barrera simple	Ficus	9,1	1	1
	Schefflera	13,1	1	1
	Calistemo	6,7	1	1
	Camelia	2,5	0.98	1
	Junípero	-5,9	**<0.1**	**0.2**
	Tuya	6,3	1	1
	Areca	6,9	1	1
Barrera doble	Ficus	-0,9	0.4	0.95
	Schefflera	8,3	1	1
	Calistemo	-7,7	**<0.1**	**<0.1**
	Camelia	-7,5	**<0.1**	**<0.1**
	Junípero	-18,1	**<0.1**	**<0.1**
	Tuya	2,9	0.995	1
	Areca	9,3	1	1

Tabla 12. Impacto de la pantalla vegetal en la P_D utilizando integración de pulsos, en Banda-S

Los resultados mejorarían en un caso real si tenemos en cuenta que: se han obviado todos los efectos indeseados adicionales de ruido y dispersión que generaría el volumen vegetal; se ha supuesto un receptor ideal sin pérdidas; se ha dado por hecho una eficiencia de integración de pulsos del 100%, entre otras simplificaciones. En la realidad, los radares tienen eficiencias de integración en torno al 80%; la dispersión es un efecto importante cuando se analiza la vegetación, y el patrón de dispersión es fuertemente dependiente de la velocidad y dirección del viento, por citar algunos ejemplos. Todos estos factores, que han sido obviados en aras de simplificar este estudio, contribuirían a reducir aún más la probabilidad de detección con respecto a la tabla 12, reafirmando la propuesta de este trabajo.

4. Conclusiones

Este artículo propone la utilización de elementos vegetales como barrera protectora para camuflar blancos, impidiendo que sean detectados por un radar. Las copas de los árboles absorberán parte de la energía incidente, atenuando la señal en su zona de sombra y reduciendo la energía devuelta en la dirección del radar. Las campañas de medida en diferentes frecuencias y masas vegetales proporcionan los valores de atenuación tanto para árboles aislados como para agrupaciones de árboles en forma de barreras simples y dobles. Con estas atenuaciones, se puede estimar la reducción de potencia que produciría un obstáculo de estas características en el camino de ida-y-vuelta de un sistema radar, y calcular la degradación en la probabilidad de detección.

Incluso cuando las atenuaciones rondan los 2 dB, la reducción en la probabilidad de detección resulta considerable, cayendo a valores por debajo de 0.1, para blancos Swerling y estáticos en sistemas basados en pulso único. Al introducir técnicas de integración de pulsos, la pantalla vegetal proporciona valores peores en términos de probabilidad de detección, pero los árboles con copas más densas son todavía perfectamente capaces de mantener la probabilidad por debajo de 0.1, incluso cuando el número de pulsos integrados es elevado.

Los resultados presentados en este artículo son conservadores. Por ejemplo, no se ha considerado la fluctuación temporal de la atenuación debido a factores como el viento, o el movimiento natural de las hojas, y el propio incremento en el ruido de fondo producido por el *scattering* de la vegetación o el multitrayecto. Todos estos factores contribuirían a reducir aún más la *SNR*. Asímismo, las especies con copas densas y troncos rígidos proporcionarán una atenuación más estable que aquellas con troncos ligeros y poco densas [9], y por lo tanto, son las especies más recomendadas para crear pantallas vegetales.

Todas las pruebas llevadas a cabo confirman que la propuesta de este artículo es viable, y que por tanto, las pantallas vegetales podría proporcionar invisibilidad radar a blancos ocultos en su zona de sombra.

Agradecimientos

Investigación patrocinada por el Ministerio de Economía y Competitividad, Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación, (proyecto TEC2011-28789-C02-02), el Centro de Investigación AtlantTIC y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Referencias

1. P. Gómez, I. Cuiñas, A.V. Alejos, M.G. Sánchez, R.F.S. Caldeirinha, “Shrub-Blown Time Variability in Attenuation and Scattering at Cellular Frequencies”, IET Microwaves, Antennas and Propagation, vol.4, no.4, pp. 526-542, April 2010.
2. P. Gómez, I. Cuiñas, A.V. Alejos, M.G. Sánchez, J.A. Gay-Fernández, “Analysis of the performance of vegetation barriers to reduce electromagnetic pollution”, IET Microwaves, Antennas and Propagation, vol.5, no.6, pp. 651-663, April 2011

3. J.P. Camacho, “Federal Radar Spectrum Requirements”, NTIA Special Publication 00-40, National Telecommunications and Information Administration, US Department of Commerce, May 2000.
4. M.I. Skolnik, “Radar Handbook”, 2nd Edition, McGraw Hill, USA, 1990.
5. N. Friedman, “The Naval Institute Guide to World Naval Weapon Systems, 5th Edition”, Naval Institute Press, Annapolis, Maryland, USA, 2006.
6. J. Acuña, I. Cuiñas, P. Gómez, “Wireless Networks Interference and Security Protection by means of Vegetation Barriers”, Progress In Electromagnetics Research M (PIER M), vol.21, pp. 223-236, November 2011.
7. D. O. North, “An Analysis of the Factors which Determine Signal/Noise Dis- crimination in Pulsed Carrier Systems”, Proceedings of the IEEE, vol. 51, no. 7, pp. 1015-1027, July 1963.
8. P. Swerling, “Probability of detection of fluctuating targets”, IRE Transactions on Information Theory, Vol. 6, No. 2, pp. 269-308, April 1960.
9. I. Cuiñas, P. Gómez, “A Method to Compare the Stability of Electromagnetic Attenuation Induced by Soft Barriers”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 13, pp. 690-693, 2014.

Sesión I-C

Guiado, Energía y Materiales

Nanotecnología en materiales compuestos. Posibilidades de aplicación del grafeno en materiales para Defensa

Gago, Israel[1,*]; Miguel, Beatriz[1]; León, Gerardo[1]; Ibarra, Isidro J.[1] y López-Maestre, Tomás[1]

[1]Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo de Alfonso XIII nº 44, 30203. Cartagena. Spain; Email: beatriz.miguel@upct.es

*****Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: israel.gago@nanocarbonoids.com

Abstract: El grafeno es una de las formas alotrópicas del carbono puro. Estrictamente, el grafeno es una lámina perfectamente cristalina de carbono hexagonal de un único a átomo de espesor y, por tanto, es el material más delgado que puede existir en la naturaleza. Sus propiedades son excelentes, destacando entre ellas sus conductividades térmica y eléctrica, superiores a las de cualquier metal, su rigidez superior a la del diamante, y su elasticidad, superior a la de la fibra de carbono. En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos con láminas delgadas de un material compuesto, preparado a partir de plástico ABS (copolímero de acrilonitrilo, butadieno y estireno) dopado con un 0,5% de grafeno. Los resultados muestran una reducción de la rugosidad (35,7%) y un aumento de la energía de fractura (5%) y de la elongación a rotura (31,6%), sin una modificación significativa de las propiedades ópticas y eléctricas del polímero inicial. Por lo tanto, la adición de grafeno mejora algunas propiedades significativas del material de partida, lo que abre un amplio campo de actuación para su empleo en Defensa y Seguridad.

Keywords: grafeno, nanotecnología, polímeros, ABS

1. Introducción

Desde su descubrimiento en 2004 por Geim y Novoselov [1] en la Universidad de Manchester, galardonado con el premio Nobel de física en 2010, el grafeno ha marcado un antes y un después en el mundo de los materiales en general y de la nanotecnología en particular. Estructuralmente, el grafeno es una lámina plana, de un átomo de espesor, formada por átomos de carbono, con hibridación sp^2, enlazados constituyendo un enrejado cristalino hexagonal, en el que la longitud del enlace C-C es de 1,42 Å [2]. Aunque otros nanomateriales habían sido propuestos, previamente al empleo del grafeno [3], recientemente es éste, el nanomaterial que más interés está generando, debido a sus peculiares propiedades.

Aunque el grafeno destaca sobre todo por las propiedades que le postulan a ser el material por antonomasia en la electrónica y la informática del futuro, cuenta también con propiedades mecánicas sorprendentes [4] y con otras, entre las que se puede destacar aquella que podría definirse como polaridad programable, que le permite imitar la distribución electrónica de carga del líquido en el que es dispersado y conservarla, lo que capacita que pueda presentar comportamiento superhidrófilo o superhidrófobo [5].

Existen numerosos estudios que prueban que la adición de pequeñas cantidades de grafeno, mejora sensiblemente las propiedades mecánicas de diversos polímeros termoestables, termoplásticos o elastómeros [6], de amplia utilización en el sector aeroespacial y de defensa. Este hecho podría redundar en plataformas más resistentes, ligeras, rápidas y económicas que además, serían resistentes a la corrosión. Recientemente se ha comprobado experimentalmente que algunos materiales compuestos basados en polímeros dopados con grafeno poseen propiedades *Stealth* [7] y por tanto las plataformas construidas con ellos tendrían capacidad furtiva.

El ABS o plástico de ingeniería, es el nombre dado a una familia de termoplásticos cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes. Es un copolímero, concretamente un terpolímero, de tres monómeros: acrilonitrilo, butadieno y estireno, cuyas iniciales forman el acrónimo que le da nombre. El acrilonitrilo le proporciona, dureza, resistencia a los ataques químicos y estabilidad a altas temperaturas. El butadieno, que es un elastómero, proporciona tenacidad a cualquier temperatura y el estireno aporta resistencia mecánica y rigidez. Esta sinergia hace que el ABS posea mejores propiedades que la suma de las propiedades individuales de sus monómeros. Tras diversas modificaciones en el proceso productivo de este polímero, actualmente se produce de manera mayoritaria mediante la polimerización del estireno y el acrilonitrilo en presencia de polibutadieno, generándose así una estructura de polibutadieno que contiene cadenas de estireno y acrilonitrilo entrelazadas a ella.

El comportamiento ante el impacto es una de las propiedades más importantes para el diseño de nuevos materiales y también el más difícil de cuantificar. El test de Charpy para materiales es una prueba de impacto que mide la resistencia a la rotura de un material ante una fuerza aplicada de forma instantánea. Esta prueba mide la energía del impacto o la energía absorbida antes de la fractura (resiliencia). Cuando el péndulo de Charpy impacta en la probeta de material polimérico, ésta absorbe la energía y comienza a sufrir deformación. La muestra continua absorbiendo energía hasta que se endurece en la zona del polímero que se encuentra en fase plástica. En el momento, en que la probeta no puede absorber más energía, se produce la fractura. Ante altas tasas de carga aplicadas de forma instantánea, los materiales poliméricos se comportan de manera muy diferente a los metales y por ello, no se pueden utilizar las pruebas de resistencia estática para predecir su comportamiento frente al impacto [8].

En este trabajo presentamos la preparación de un material compuesto, preparado a partir de copolímero ABS, dopado con un 0,5% de grafeno con el propósito de analizar la variación de algunas propiedades del polímero inicial.

2. Materiales y Métodos.

Como materiales se han utilizado ABS comercial y grafeno prístino *few-layer*, sintetizado en nuestro laboratorio y caracterizado por espectroscopía UV-VIS-IRc, FTIR y Raman, y microscopía SEM.

En este trabajo se mide la energía de impacto para probetas de material polimérico, concretamente ABS. Se utiliza el método descrito en la norma ASTM D 6110 con algunas modificaciones, con objeto de estudiar el comportamiento al impacto de probetas de vidrio recubiertas de ABS y compararlas con probetas de vidrio recubiertas de ABS dopado con grafeno. Para ello se prepararon 11 probetas de copolímero ABS, depositado sobre portaobjetos de vidrio para microscopía, que se utilizaron como material de referencia, y 11 probetas preparadas con el mismo copolímero dopado al 0,5%.

La deposición de las láminas delgadas de ABS sobre los portas de vidrio se realizó mediante la técnica de *Langmuir-Blodgett* con algunas modificaciones [9] a una velocidad de 330 μm/s, con el objeto de obtener una película de ABS lo más homogénea posible. Las láminas de ABS dopado se prepararon del mismo modo, habiendo dispersado previamente la cantidad de grafeno necesaria para la obtención de una concentración del 0,5% en peso. Las probetas así obtenidas eran totalmente transparentes como se muestra en la Figura 1.

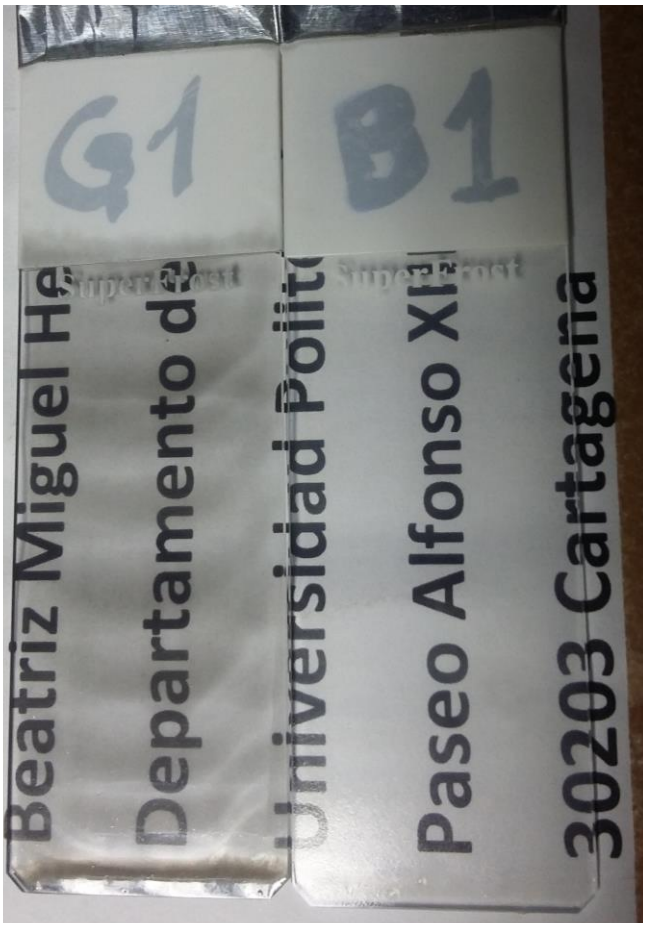


Figura 1. Transparencia comparada de las probetas con láminas delgadas de plástico ABS sin dopar (B1) y dopada con grafeno (G1), depositadas sobre portas de vidrio.

Los ensayos para medir las propiedades mecánicas al impacto se llevaron a cabo mediante un péndulo de Charpy. Las pruebas se realizaron en material compuesto de vidrio y ABS, éste último dopado y sin dopar con grafeno. El equipo de prueba utilizado es un sistema Instron Dynatup Impacto. El Dynatup posee un pequeño péndulo que produce un impacto masivo sobre la muestra con una amplia gama de energías y velocidades ajustables. La muestra se coloca en posición horizontal sobre dos soportes, y se produce el impacto del péndulo sobre la misma dejándolo caer libremente desde una posición elevada.

Para la obtención de los espectros de absorción se utilizó un espectrofotómetro Agilent 8453. La calibración se llevó a cabo midiendo directamente la absorción de las láminas de ABS, utilizando aire como blanco.

Para la determinación de los espesores de las láminas y su rugosidad, así como de la morfología de la fractura producida en el impacto (elongación a rotura y estabilidad estructural), se usó un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo, modelo S-3500N de Hitachi, que funciona a bajo voltaje y permite en el caso de polímeros evitar el pretratamiento de las muestras.

Finalmente, las propiedades eléctricas se determinaron mediante el método de medición a cuatro puntos o método de Kelvin [10].

3. Resultados y Discusión

La caracterización de las láminas delgadas en cuanto a espesor y rugosidad se realizó mediante la medición sobre las imágenes de microscopía electrónica que muestra la Figura 2. En ellas se determinó un espesor para las probetas de ABS de 29,1 µm con una rugosidad de 1,2 µm, mientras que para las probetas de ABS dopado con grafeno el espesor obtenido fue de 29,4 µm con una rugosidad de 0,8 µm. Estos resultados muestran que la adición de grafeno a la matriz del polímero reduce la rugosidad superficial final del laminado en un 35,7%, lo que significa un mejor control del espesor.

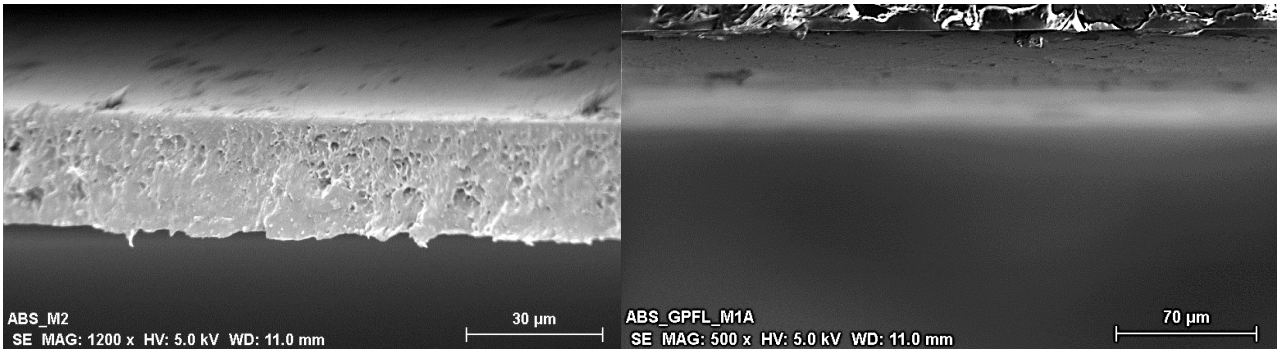


Figura 2. Micrografías electrónicas de láminas delgadas de ABS (izquierda) y ABS dopado con grafeno (derecha).

Los resultados estadísticos obtenidos de la medida de la energía de impacto de las muestras con el péndulo de Charpy se muestran en la Figura 3. Como se comprueba, las desviaciones estándar de las medidas son muy pequeñas en ambos experimentos. Las medias de energía obtenidas son de 0,164 ±

0,016 J para las probetas de vidrio con ABS y de 0,170 ± 0,022 J para las probetas de vidrio con ABS dopado con grafeno. Teniendo en cuenta que 0,127 ± 0,011 J de esa energía corresponde a la ruptura del vidrio utilizado en el soporte y los rozamientos propios del sistema, la adicción de la lámina de ABS aumenta la resiliencia en un 28,7 % y la lámina de ABS dopado en un 33,7 %, lo que supone una mejora relativa de un 5% entre usar ABS dopado o sin dopar para la concentración estudiada.

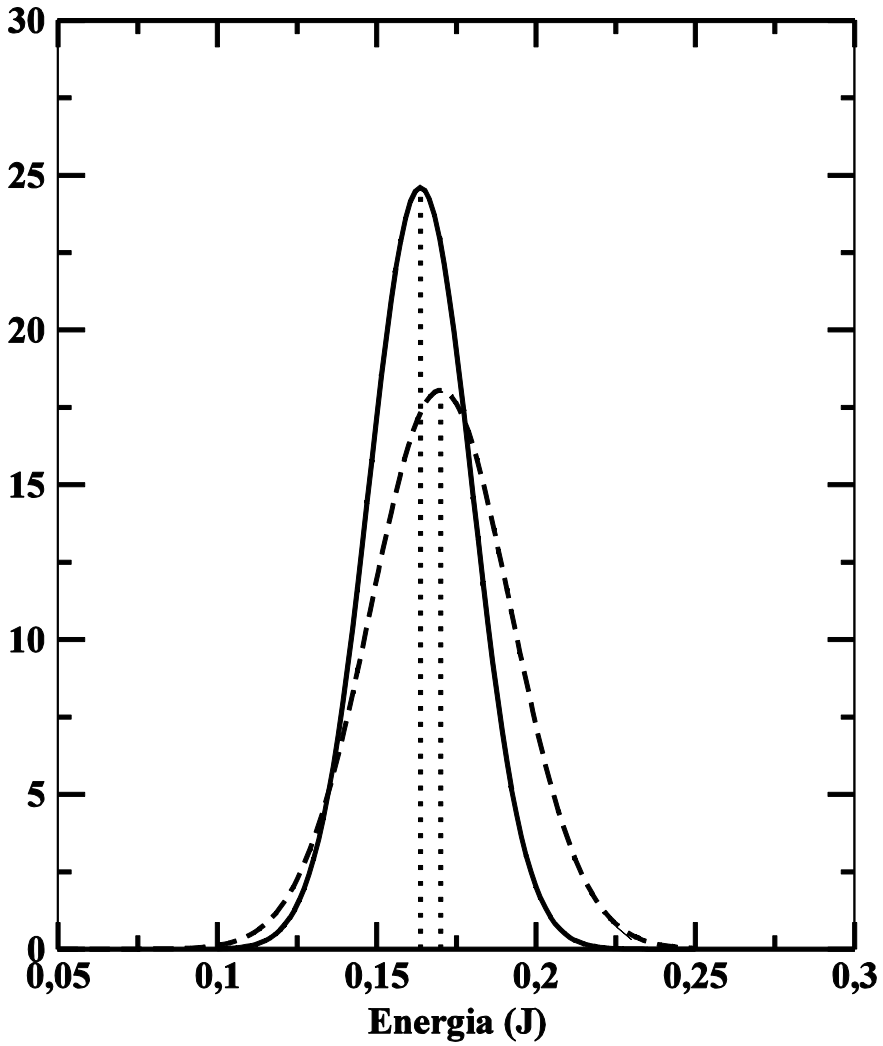


Figura 3. Distribución gaussiana correspondiente a los datos de energía de impacto obtenidos para las láminas de plástico ABS sin dopar (continua) y dopadas con grafeno al 0.5 % en peso (discontinua).

Las imágenes de microscopía electrónica de barrido de las probetas, tras haber recibido el impacto del péndulo de Charpy y haberse fracturado se muestran en la Figura 4. Midiendo sobre ellas, se determinó un incremento en la elongación a rotura del 31,6 % para el caso de las probetas de ABS dopadas con grafeno, respecto a las de ABS sin dopar.

El ABS dopado con grafeno aumenta su resistencia a la fractura, reproduciendo resultados similares a los obtenidos al dopar polímeros epoxi [11], pero además, se aprecia un incremento muy significativo en la elongación a rotura y en la estabilidad estructural de la zona de fractura. El borde de fractura de las probetas de ABS muestra un cambio muy brusco entre la zona que no presenta desgarros (elástica) y la que sí los presenta (plástica), mientras que en el caso del ABS dopado con

grafeno la transición entre ambas zonas es mucho más progresiva y no aparecen desgarros en la matriz del polímero.

En la Figura 5 se muestran los espectros de absorción UV-VIS-IRc de las láminas de ABS y de ABS dopado con grafeno al 0,5 % en peso, en el intervalo de 200 a 1100 nm, los cuales evidencian que la adición de grafeno al polímero prácticamente no modifica las propiedades ópticas de éste, al menos en la concentración estudiada.

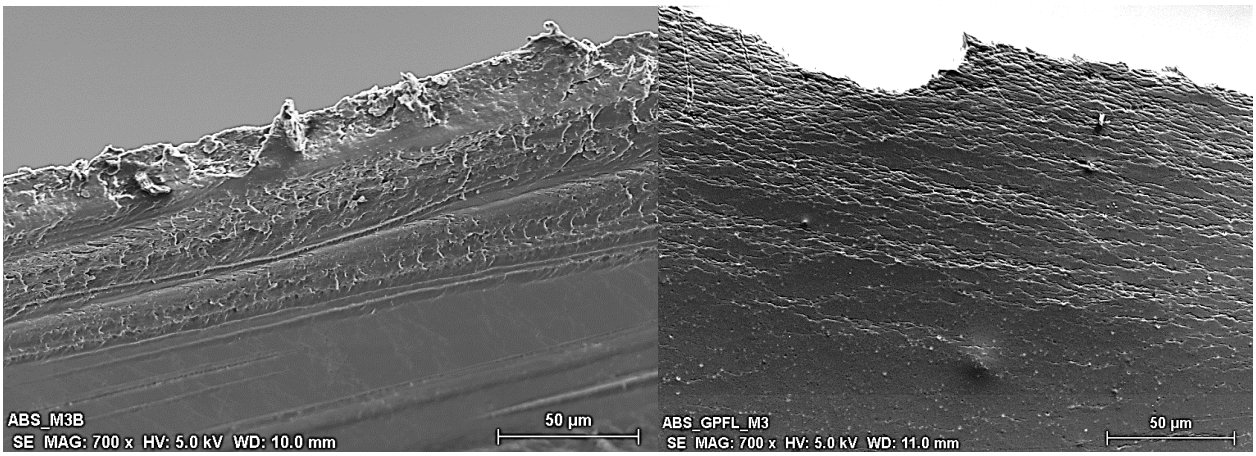


Figura 4. Micrografías electrónicas de los bordes de fractura para las probetas de láminas delgadas de ABS (izquierda) y ABS dopado (derecha).

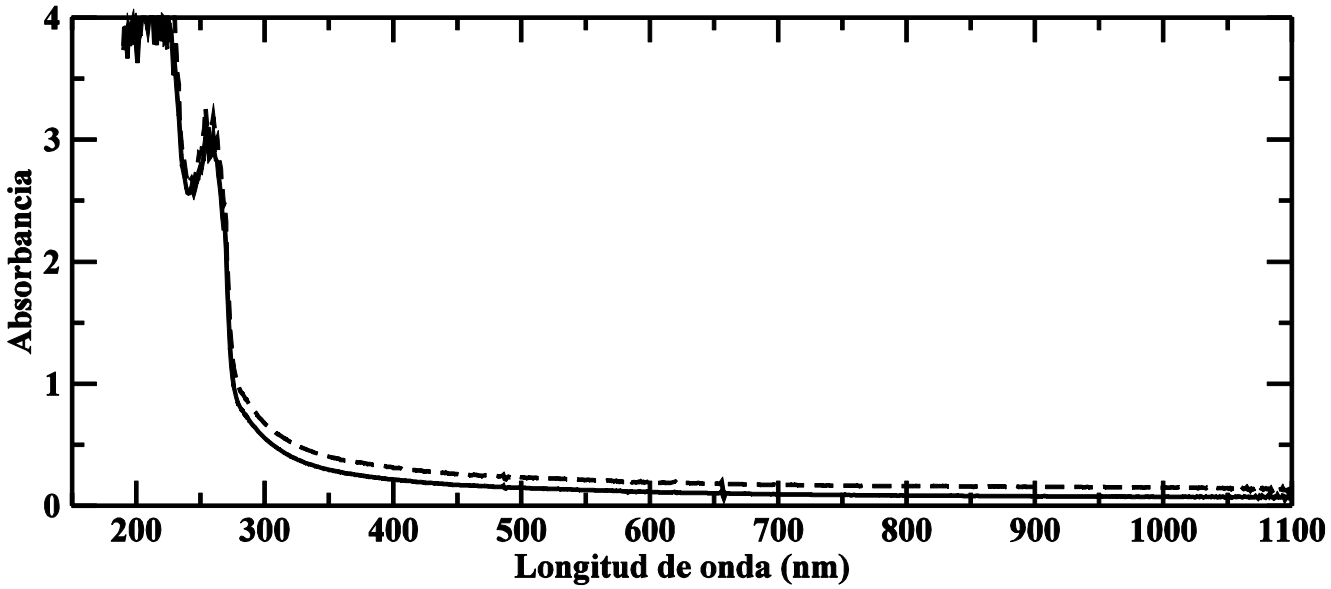


Figura 5. Espectros de absorción UV-VIS-IRc de láminas delgadas de ABS (continua) y ABS dopado con grafeno (discontinua).

Respecto a las propiedades eléctricas, los ensayos demuestran que la adicción de un 0.5 % de grafeno al polímero original no modifica su conductividad eléctrica de un modo lo suficientemente significativo como para ser detectado con el método de análisis empleado, de modo que el polímero dopado también puede considerarse un dieléctrico. Este resultado concuerda con los de otros estudios

en los que se concluye que es necesaria una adición mínima de un 3% de grafeno para lograr comportamiento semiconductor [12].

4. Conclusiones

En este trabajo se han estudiado propiedades del copolímero ABS dopado con grafeno al 0,5% en peso, mediante la preparación y caracterización de láminas delgadas, según la técnica de *Langmuir-Blodgett* modificada. La adición de grafeno mejora el control del espesor y reduce la rugosidad superficial en un 35,7%, lo que puede redundar en una mejora significativa, en términos de resistencia al avance, de plataformas navales revestidas con este material. En términos de resiliencia, se ha demostrado que el ABS dopado con grafeno absorbe un 5% más de energía al impacto que el polímero original, presentando también una superior elongación a rotura (31,6 %) y una morfología de fractura más estable y uniforme. No se han detectado cambios significativos en las propiedades ópticas y eléctricas del material para la concentración estudiada. La mejora de las propiedades mecánicas de polímeros y materiales compuestos mediante nanotecnología abre un amplio campo de actuación, para su aplicación directa en Defensa y Seguridad, debido a que disponer de plataformas y equipos que integren estos nanosistemas implicará mejoras muy significativas en la operatividad táctica, estratégica y logística.

Los chalecos de protección balística actuales, son ineficaces frente a municiones de rifle de alta velocidad y mucho menos si son de tipo perforante. Para subsanar este hecho, varias compañías han desarrollado placas metálicas o cerámicas, pero son gruesas, pesadas y rígidas, limitando sensiblemente la movilidad y el confort del combatiente. Las propiedades mejoradas de nuevos materiales, como el que se describe en este trabajo, permitirán desarrollar en un futuro cercano sistemas de protección balística personal mucho más eficientes contra las amenazas del campo de batalla del futuro, definido por enfrentamientos armados en terreno urbano muy denso, donde en muchas ocasiones los actores son difíciles de distinguir de la población local.

El fenómeno de la “litoralización” de los conflictos es cada vez más patente, debido a que la mayor parte de la población mundial tiende a concentrarse en zonas a menos de 100 kilómetros de la costa. Esta tendencia sugiere que, las plataformas aeronavales y anfibias tendrán cada vez más importancia en las operaciones. El desarrollo de nanomateriales compuestos basados en el grafeno, permitirá la integración en estas plataformas de materiales estructurales más ligeros y revestimientos de resistencia viscosa ultrabaja e inmunes a la corrosión del medio marino, que además aportarán la protección balística necesaria para garantizar su supervivencia en un campo de batalla asimétrico y, a medio plazo, con capacidad furtiva.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte del Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica (SAIT) y al Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT).

Referencias

1. Novoselov, K.S; Geim, A.K.; Morozov, S. V.; Jiang,D.; Zhang, Y.; Dubonos, S.V. ; Grigorieva,I. Firsov, A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science* **2004**, 306, 666-669.
2. Seba S. Varghese, Sunil Lonkar, K.K. Singh, Sundaram Swaminathan, Ahmed Abdala, Recent advances in graphene based gas sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical* **2015**, 218, 160-183.
3. Akash M.; Vijay K.S.; Pulya U.S. Investigation of mechanical properties of alumina nanoparticle-loaded hybrid glass/carbon-fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science* **2014**, 131(1).
4. Lee, C.; Wei, X.; Kysar, J.W.; Hone, J. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science* **2008**, 321(5887), 385-388.
5. Rafiee, J.; Rafiee, M.A.; Yu, Z.Z.; Koratkar, N. Superhydrophobic to superhydrophilic wetting control in graphene films. *Advanced Materials* **2010**, 22, 2151–2154.
6. Mohammad A. R., Javad R., Zhou W., Huaihe S., Zhong-Zhen Y., Nikhil K. Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content. *ACS Nano* **2009**, 3 (12), 3884–3890.
7. Shin, J. H.; Jang, H. K.; Choi, W. H.; Song, T. H.; Kim, C. G.; Lee, W. Y. Design and fabrication of RAS with graphene added Kevlar Fiber reinforcement composite. In *18th International conference on composite materials* **2011**.
8. Arosteguia, A.; Sarrionandiab, M.; Aurrekoetxeab, J.; Urrutibeascoab, I. Effect of dissolution-based recycling on the degradation and the mechanical properties of acrylonitrile–butadiene–styrene copolymer. *Polymer Degradation and Stability* **2006**, 91(11), 2768-2774.
9. Ulman, A. Langmuir-Blodgett Films. In *An introduction to ultrathin organic films*, 3rd ed.; Academic Press Limited: San diego (CA), USA, **1991**; 101–133.
10. Olivier J.; Servet B.; Vergnolle M.; Mosca M.; Garry G. Stability/instability of conductivity and work function changes of ITO thin films, UV-irradiated in air or vacuum: Measurements by the four-probe method and by Kelvin force microscopy. *Synthetic Metals* **2001**, 122 87–89.
11. Rafiee, M. A; Rafiee, J.; Srivastava, I.; Wang, Z.; Song, H.; Yu, Z.; Koratkar, N.,; Fracture and Fatigue in Graphene Nanocomposites. *Small* 2010, 6, 179–183.
12. Hao-Bin Z.; Wen-Ge Z.; Qing Y.; Yong Y.; Ji-Wen W.; Zhao-Hui L.; Guo-Ying J.; Zhong-Zhen Y. Polymer **2010**, 51 1191–1196.

Rapid tooling aplicado a defensa, potenciales usos

Cajal Hernando, Carlos [1],*, Jimenez Pacheco, Roberto [1] , Santolaria Mazo, Jorge [2], Pueo Arteta, Marcos [1] y García García, Miguel Ángel [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa Zaragoza. Email: rjimenez@unizar.es (RJP), mpueo@unizar.es (MPA), magargar@unizar.es (MGG)

[2] Dpto. Ing. Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza; Emails: jsmazo@unizar.es (JSM)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: ccajal@unizar.es (CCH);

Abstract: El uso cada vez más habitual en el ámbito civil de las tecnologías de fabricación aditiva hace recomendable un análisis sobre su utilidad en el ámbito militar. Numerosos países empiezan a utilizar estas tecnologías como parte de sus procedimientos estándar. En el presente artículo se han analizado diferentes casos, gracias a la agrupación de apoyo logístico 41 (AALOG 41) del ejército de tierra. En algunos de estos casos se ha requerido el empleo de técnicas de ingeniería inversa y digitalización. Las tres categorías en las que se divide la fabricación aditiva ; Rapid Manufacturing (RM), Rapid Tooling (RT) y Rapid prototyping (RP), han sido cubiertas, llegando a la conclusión de que incluso con las tecnologías más baratas, basadas en polímeros, se consiguen unos resultados esperanzadores. Todavía quedaría un largo camino puesto que los exigentes requisitos del ámbito militar requieren adecuada validación y certificación, de todos los procedimientos y piezas, hasta incorporarlos a los procedimientos estándar.

Keywords: impresión 3D; digitalización; logística; aditiva; defensa

---

1. Introducción

El grupo de ingeniería de fabricación y metrología avanzada (GIFMA) del institutito de investigación e innovación de Aragon (I3A) de la universidad de Zaragoza lleva ya algunos años desarrollando investigaciones relacionadas con la denominada fabricación por capas o fabricación aditiva, considerada por algunas fuentes como la nueva revolución industrial [1]. La pertenencia de algunos de estos investigadores al Centro Universitario de la Defensa permite orientar estas investigaciones hacia su aplicación en el ámbito de la defensa en general y del ejército de tierra en concreto.

Existen números ejemplos en los que se está utilizando la fabricación aditiva en el ámbito civil [2], como también están apareciendo ejemplos en ámbitos militares en países aliados de España en el contexto de la OTAN [3]. Otro ejemplo ilustrativo del interés incipiente que empiezan a tener las fuerzas armadas en la fabricación aditiva se puede encontrar en reuniones científicas promovidas desde el ministerio de defensa. En el 28 y 29 de abril de 2016, el panel AVT (Applied Vehicle Technology) de la STO organiza en Tallin (Estonia) la reunión de especialistas AVT-258 / RSM-042 sobre el tema "Additive Manufacturing for Military Hardware" [4]. Los temas principales a tratar son los siguientes:

- La fabricación aditiva desde el punto de vista del personal militar desplegado en operaciones
- La fabricación aditiva aplicada a los procesos de reparación
- La fabricación aditiva para la obtención de piezas de repuesto y sustitución de piezas obsoletas

Como temas adicionales de discusión propone:

- Materiales y materias primas
- Procesos de diseño y de optimización
- Rendimiento
- Certificación
- Efectos en la cadena de suministro y mantenimiento
- Beneficio en cuanto a coste
- Contratación

Como consecuencia de todo lo anterior, resulta de interés analizar los usos potenciales que la fabricación aditiva puede tener en unidades del ejército español. La proximidad geográfica y la afinidad tecnológica hacen de la agrupación de apoyo logístico 41 (AALOG41) [5] y en concreto del grupo de mantenimiento VI, la fuente de experiencia y conocimiento fundamental para el análisis de casos concretos en los que aplicar diferentes tecnologías aditivas como mejora de los procesos del ejército de tierra. No se pretende sustituir los actuales métodos de adquisición de piezas y materiales pero si complementarlos con alternativas que en algunos casos puedan resultar más convenientes.

2. Métodos y materiales

Como se ha mencionado previamente en la introducción, el abanico de potenciales usos de la fabricación aditiva es prácticamente infinito, como también lo es la variedad de procesos y tecnologías que están disponibles comercialmente [2]. Estás ultimas aumentando continuamente y cada vez a unos precios más competitivos. En el contexto de este artículo nos vamos a centrar en las más asequibles basadas en materiales polímeros. Al tratarse de una primera aproximación se considera que la utilización de tecnologías económicas, propias de entornos semidomésticos facilita enormemente la adopción de estas metodologías, que pese a estar cada vez más extendidas siguen considerándose incipientes.

No se puede hablar de fabricación aditiva, o fabricación digital, como también se denomina, sin hablar de la ingeniería inversa. La principal característica de la fabricación aditiva es que se parte de un modelo digital en tres dimensiones (3D) el cual es fabricado, sea cual sea la tecnología empleada, de manera automática, secuenciando las capas por la máquina. Este diseño 3D puede ser realizado completamente en alguno de los múltiples software disponibles, o partir de un elemento ya fabricado a través de un proceso de ingeniería inversa [6]. Está ingeniería inversa se puede hacer de maneras muy diversas, desde

una simple medición con cualquier herramienta convencional, de la que veremos un ejemplo, hasta una digitalización de las superficies, bien mediante sondas de triangulación láser o mediante procesos de escaneo por luz estructurada.

2.1. Fabricación aditiva

Pese a que este tipo de tecnologías ya tienen una cierta historia, y son muy conocidos casos de éxito en industrias punteras de la automoción y aeronáutica, todavía siguen siendo una incógnita para muchas industrias y empresas. Como se ha venido comentando, el objetivo principal de este proyecto es una primera toma de contacto con estas tecnologías. Es por ello, de la gama tan amplia de tecnologías disponibles comercialmente, nos vamos a centrar en materiales polímeros, tanto de tipo extrusivo como fotopolimerizado. Estos materiales no tienen las prestaciones de sus alternativas metálicas pero son muchísimo más asequibles y permiten verificar si las particularidades de la fabricación aditiva son compatibles con los procesos que desarrollan algunas de las unidades del ejército de tierra.

2.1.1 Fused deposit modelling (FDM)

Esto tipo de impresoras se basan en la extrusión de material polímero, creando un hilo que se va depositando de manera que se "dibuja" cada capa secuencialmente. Los modelos utilizados no permiten material de soporte, como si lo hacen otras tecnologías, pero sí que permiten estructuras de soporte que pueden ser eliminadas en un simple postproceso de lijado.

La principal razón para usar esta tecnología es que permite, mediante maquinaria muy asequible, fabricar piezas completamente funcionales en plástico. Siendo el poliácido láctico (PLA) el material predominante y permitiendo en algunos casos la utilización de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).

2.1.2 Micro fotopolimerarización

Esta tecnología se basa en el empleo de material fotocurable que es depositado en estado pastoso para posteriormente ser solidificado mediante luz ultravioleta en cada pasada del cabezal.

Si bien este material no tiene las prestaciones del plástico ABS, sí que existe una amplia gama de materiales compatibles con características que van desde la flexibilidad a la biocompatibilidad. La principal ventaja de esta tecnología, a parte de su mayor calidad dimensional, es la utilización de material de soporte. Este material permite crear prácticamente cualquier geometría, sin importar angulaciones o estructuras en voladizo. Este material de soporte es eliminado en un postprocesado por agua a presión con un dispositivo especifico y, en algunos casos, un ataque químico en una solución básica.

2.2. Ingeniería inversa

La principal ventaja de la fabricación aditiva es que resulta competitiva para pequeñas series, siendo la pieza única el ejemplo más extremo. Esta pieza única requiere un diseño tridimensional y en la mayor parte de los casos este diseño ha de ser basado en una pieza existente de la que, o bien no tenemos los datos de su geometría, o estos no corresponden con los valores reales debido a desgaste o rotura.

El ejemplo de ingeniería inversa más básico es la medición de las cotas significativas mediante algún instrumento sencillo como el pie de rey o el flexómetro. En algunos casos medir unas pocas cotas es suficiente, y desde luego, teniendo en cuenta la precisión actual de las máquinas de fabricación aditiva, no merece la pena usar sistemas de alta precisión como puedan se las máquinas de medir por coordenadas o los interferómetros láser. En otros casos, la adquisición mediante digitalización de superficies

completas resulta necesaria. Para estos casos, los sistemas basados en triangulación laser o luz estructurada son los más adecuados. Estos equipos consiguen una nube de puntos que tras un proceso de tratamiento se transforma en un archivo en formato STereo Lithography (STL) que permite que la pieza sea fabricada. Este tratamiento no es trivial y muchas veces requiere ciertas dosis de rediseño en zonas con inadecuada o insuficiente densidad de puntos. Este tipo de mediciones tienen la ventaja que no producen deformaciones ni marcados por contacto en la pieza pero son muy sensibles a cambios de reflectividad en la superficie, requiriendo en los casos más extremos espráis para mejorar la adquisición de las superficies.

3. Resultados y Discusión

En el presente apartado se van a presentar ejemplos preliminares de utilización de técnicas de impresión 3D, combinadas en algunos casos con procesos de ingeniería inversa. Dependiendo del ejemplo concreto, el proceso se encuentra ya en fase de evaluación o en las primeras etapas de análisis. En cualquier caso, todavía queda un largo camino hasta las etapas finales de certificación del componente.

3.1. Rapid manufacturing (RM) (fabricación rápida)

Un caso concreto en el que la fabricación aditiva resulta muy atractiva es el de piezas que ya no se pueden adquirir, bien porque están descatalogadas o porque no se pueden adquirir puesto que el proveedor no la suministra como un elemento independiente. En algunos casos la política de repuestos obliga a adquirir el conjunto completo pese a que solo una mínima, y específica, parte de este conjunto esté dañada.

Como ejemplo concreto de la viabilidad e interés de la fabricación aditiva tenemos esta pequeña sujeción plástica del conjunto elevalunas del vehículo Anibal Santana (ver Figura 1). Pese a tratarse de un vehículo antiguo todavía está en servicio en muchas unidades del ejército de tierra. Es por tanto responsabilidad de las unidades de mantenimiento, la AALOG 41 entre ellas, la reparación del elevalunas mediante la sustitución de la pieza o conjunto.

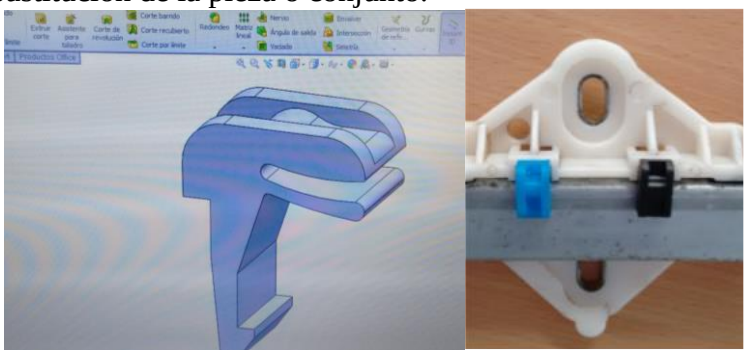


Figura 1. Pieza de sujeción del elevalunas, en azul la impresa en 3D.

El proceso realizado ha sido el siguiente:

Tras comprobarse que, desde el punto de vista logístico, esta avería es de las más comunes que sufren los vehículos, se procede a realizar la ingeniería inversa. Es una pieza de reducidas dimensiones por lo que las cotas más representativas y funcionales son medidas mediante un pie de rey. Posteriormente, la

pieza es diseñada en una aplicación de diseño asistido por ordenador (CAD), concretamente Solid Works. Este diseño es adaptado al formato STL que el software de la impresora, tipo FDM, modelo *BQ PRUSA i3*, se encarga de convertir en capas que secuencialmente son depositadas hasta constituir la pieza final.

Este es quizás el caso más llamativo de los tratados en este artículo puesto que el proveedor no suministra separadamente la pieza que sufre la rotura y es necesario comprar todo el conjunto elevalunas con un precio superior a los 100 €. La utilización de impresión FDM supone para cada pieza, al tratarse de reducidas dimensiones y peso muy pequeño un coste en material inferior a los 3 céntimos de €. Bien es cierto que cada pieza requiere de 20 minutos de fabricación desatendida y el proceso de ingeniería inversa ha llevado una hora de trabajo entre medición y diseño. Este último paso solo hay que realizarlo una única vez, suponiendo un coste fijo por pieza, por lo que con suficiente número de piezas resulta despreciable. Aunque está pieza ya ha sido verificada funcionalmente, todavía no se dispone de datos de durabilidad y fiabilidad en condiciones reales de operación por lo que todavía ha de ser utilizada de manera experimental.

3.2. Rapid tooling (RT)(herramientas rápidas)

Puesto que los procesos de moldeo que son necesarios para la fabricación de piezas metálicas no están disponibles en este proyecto, se ha decidido analizar la fabricación de útiles que se usen en tareas de mantenimiento.

El primer ejemplo es la fabricación de llaves especiales para desmontaje de equipos de radiocomunicaciones como las mostradas en la Figura 2. Estas llaves son difíciles de encontrar, y su pérdida o rotura puede suponer un tremendo retraso en las tareas de mantenimiento. Adicionalmente, al tratarse de herramientas cuyo apriete se realiza con llaves dinamométricas a pocos néwtones la resistencia mecánica está garantizada, pese a fabricarse en materiales plásticos.



Figura 2. Herramientas de desmontaje de equipos de radiocomunicaciones.

El segundo ejemplo es la fabricación de réplicas de la munición que permitan la verificación de armamento sin necesidad de utilizar munición inerte o de fogueo. Actualmente se están utilizando replicas en aluminio, según se puede ver en la Figura 3, pero que tienen la desventaja del coste del material y de que el proceso de fabricación, al utilizar un torno convencional, es laborioso y requiere un operario especializado.

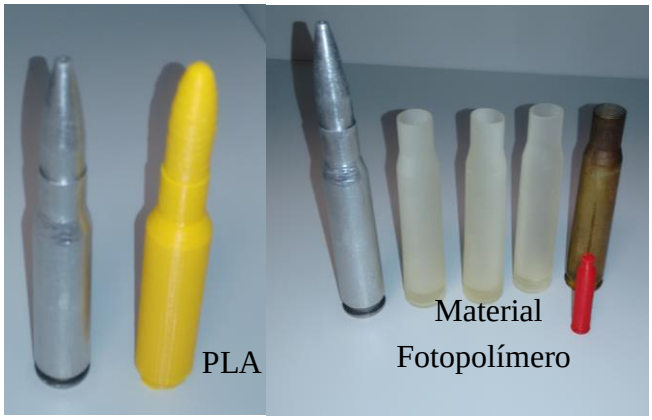


Figura 3. Réplicas de municiones en aluminio mecanizado y en impresión 3D.

Se han construido tanto vainas como proyectiles en diferentes materiales pero todavía no ha sido posible validar su funcionalidad. La parte inferior del cartucho ha de realizarse con un acople de acero puesto que sufre un gran desgaste.

3.3 Rapid prototyping (RP)(prototipado rápido)

En este caso se analiza la capacidad de crear prototipos funcionales de manera sencilla y rápida, para en el caso de demostrar su utilidad, trasladar su fabricación a un proceso convencional como pueda ser el mecanizado o el moldeo por inyección.

3.3.1 Asidero ergonómico

Aunque en el diseño de las armas de asalto se tiene en cuenta la ergonomía como un elemento fundamental, dicha ergonomía puede ser incrementada mediante la personalización de alguno de los elementos del arma para un usuario concreto.



Figura 4. Digitalizado de pistolete y molde empuñadura.

Puesto que el diseño del asidero es propiedad de Heckler & Koch (HK), es necesario realizar una ingeniería inversa para poder digitalizarlo, ver Figura 4 izquierda, y ser capaces de añadirle un acople ergonómico. Mediante una pasta moldeable el asidero es personalizado, en este caso para un usuario cuya mano sea ligeramente más grande que la media, Figura 4 derecha. Esta pasta es a su vez digitalizada, según se muestra en la Figura 5, y combinándola con el asidero original permite crear la pieza necesaria.

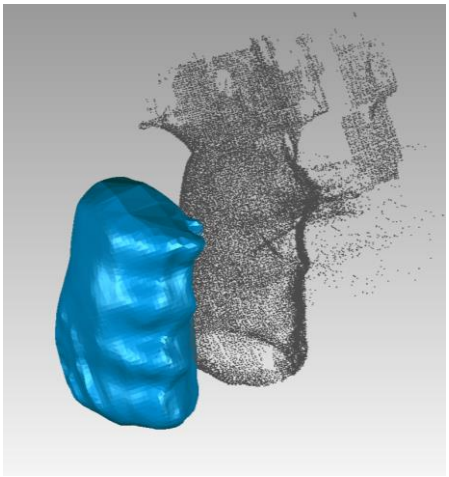


Figura 5. Nube de puntos digitalizada (negro) y STL resultante (azul).

3.3.2 Apoyo del visor del Fusa HK G36 K

Se ha comprobado que la pieza elástica que protege la cavidad ocular del tirador tiene tendencia a romperse, bien por uso o por degradación temporal. Esta pieza no es demasiado crítica puesto que no tiene repercusión en la operatividad del arma. Es más, el bajo retroceso de la munición de bajo calibre la hacen prácticamente innecesaria. Sin embargo, la pieza, al ser de material elástico supone un buen caso de análisis para materiales elásticos en la impresora FDM, donde se pueden materializar diseños que sean menos tendentes a la ruptura en condiciones normales de operación.



Figura 6. Soporte visor con pieza rota y recambio estándar.

4. Conclusiones

En el contexto de mejora continua, en el que todos los sistemas industriales deben desarrollar su actividad, es necesario estar sistemáticamente evaluando nuevas estrategias que permitan un mejor y más eficiente desempeño de las actividades. Es por ello que parece un paso natural la incorporación de sistemas de fabricación novedosos a diferentes aspectos de la actividad industrial del ejército de tierra.

Como se ha podido comprobar en apartados anteriores, esta incorporación no es inmediata ni trivial, y nos atreveríamos a decir que en algunos casos incluso resulta innecesaria. Sin embargo, hay casos en que las distintas unidades no se pueden permitir el lujo de desestimarla por las evidentes mejoras que implica, desde un punto de vista económico, logístico o funcional.

En este artículo se han presentado algunos casos que justifican el seguir investigando en esta línea y añadiendo aspectos tan vitales como son el rendimiento, la certificación o la adquisición que por motivos temporales y de espacio no son tratados.

Agradecimientos

Primeramente agradecer a la agrupación de apoyo logístico 41 de Zaragoza, y en particular al grupo de mantenimiento VI, a cuyo mando se encuentra el TCol Barranco que ha participado activamente en la realización de esta ponencia. La presente ponencia ha sido realizada con el apoyo económico del Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, a través del proyecto *Rapid tooling aplicado a la fabricación de piezas "custom"*.

Referencias

1. Berman, B. 3-D printing: The new industrial revolution. *Business horizons*, **2012**, 55, 2, 155-162.
2. Horn, T.J.; Harryson, O.L. Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications. *Science progress*, **2012**, 95, 3, 255-282.
3. Military Defense Manufacturing, Stratasys, "http://www.stratasys.com/industries/defense".
4. Additive Manufacturing for Military Hardware" (AVT-258), "http://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/en-us/Contenido/Pages/detalleiniciativa.aspx?iniciativaID=223".
5. Agrupación de Apoyo Logístico 41, "http://www.ejercito.mde.es/unidades/Zaragoza/aalog41/".
6. Wang, W. Reverse engineering: technology of reinvention. *CRC Press*, 2010.

Crecimiento y pérdida de adhesión en recubrimientos autorreparables basados en fases expansivas.

Javierre, Etelvina [1,*] **y García-Aznar, José Manuel** [2]

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, Zaragoza; etelvina.javierre@unizar.es (EJ)

[2] Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza; jmgaraz@unizar.es (JMGA)

* Autor responsable del trabajo; etelvina.javierre@unizar.es

Abstract: El mecanismo de recuperación de la función de barrera en recubrimientos basados en fases expansivas se describe mediante una analogía termoelástica. El contacto y la pérdida de adhesión entre el recubrimiento y el sustrato se introduce para analizar la capacidad autorreparadora del recubrimiento.

Keywords: materiales autorreparables; recubrimientos; fases expansivas; contacto; delaminación; modelado matemático; simulación computacional

---

1. Introducción

El diseño y desarrollo de materiales autorreparables (capaces de detectar y reparar fisuras de forma autónoma) constituye un campo de investigación de gran importancia socio-económica debido al elevado número de aplicaciones técnicas, tanto en ámbitos civiles como militares [1], en las que se pueden implantar y debido a la consiguiente reducción de costes de mantenimiento que facilitaría su implantación. Su desarrollo se ha centrado desde una óptica experimental, buscando y analizando conceptos que conduzcan al sellado de grietas y a la recuperación de las propiedades macroscópicas del material. Los avances más notables se han alcanzado en el área de materiales de construcción, área en la que en los últimos años se ha conseguido trasladar los mecanismos estudiados en el laboratorio a la fase de estudio in situ. En el año 2010 se pavimentó un tramo de 400 metros de la autopista A58 holandesa [2] y su seguimiento continua en la actualidad. El uso de aditivos biológicos (como determinados tipos de bacterias [3]) en cementos de construcción también ha demostrado un gran potencial, llegándose a construir en el último año una cabaña en la costa holandesa [4] para analizar

en mayor profundidad la aplicabilidad comercial de dichos compuestos. Otros materiales, como son los recubrimientos (tanto orgánicos como inorgánicos) se caracterizan por un fuerte estudio a nivel experimental y una implementación en materiales que presentan defectos de menor escala.

La característica en común en todos los mecanismos de reparación es que debe conseguirse el sellado de la grieta mediante la acción combinada de la mecanismos de activación (ya sean estos cambios en la microestructura o la reacción con factores externos) y la utilización de recursos tanto extrínsicos como intrínsecos para producir material suficiente que permita sellar la grieta. La grieta podrá ser de mayor o menor tamaño según el material bajo estudio y las cargas a las que este se vea sometido. Los mecanismos de sellado pueden clasificarse según se forme nueva matriz [3,5], se movilice y readapte la matriz todavía existente [2,6] o se expanda volumétricamente la matriz [7,8]. En cualquier caso, la modelización matemática y la simulación por ordenador proporciona una herramienta con un gran potencial de análisis, barata y extrapolable a infinidad de casos.

En este trabajo nos centramos en el estudio de un recubrimiento polimérico utilizado en la protección de estructuras metálicas. El objetivo de este recubrimiento es proteger el sustrato de las condiciones ambientales (humedad). Este tipo de recubrimientos presenta una estructura laminada en la que las distintas capas realizan distintas funciones en función de su posición (desde la más exterior proporcionando aislamiento al entorno y funciones estéticas, como el brillo, hasta la más interior que puede enriquecerse con pigmentos dirigidos a la formación de capas de pasivación en caso de activarse su liberación). Además de las mencionadas capacidades de aislamiento y de inhibición de procesos de oxidación, se busca también que el recubrimiento sea capaz de recuperar su función de barrera en caso daño en su superficie.

Para recuperar la función de barrera es preciso activar y controlar el crecimiento (o formación) de la matriz polimérica. Además, también es preciso evaluar el impacto que dicho crecimiento tiene en las capacidades estructurales del recubrimiento. En este trabajo se acopla un modelo termoelástico de crecimiento de la matriz (activado por la temperatura y humedad del entorno) con un modelo de daño para la adhesión entre capas. Mediante este modelo se consigue una caracterización completa de la respuesta del recubrimiento ante la aparición de una grieta que puede utilizarse para evaluar la funcionalidad de distintas capas (i.e. distintas capacidades de crecimiento) y distintos adhesivos entre las capas.

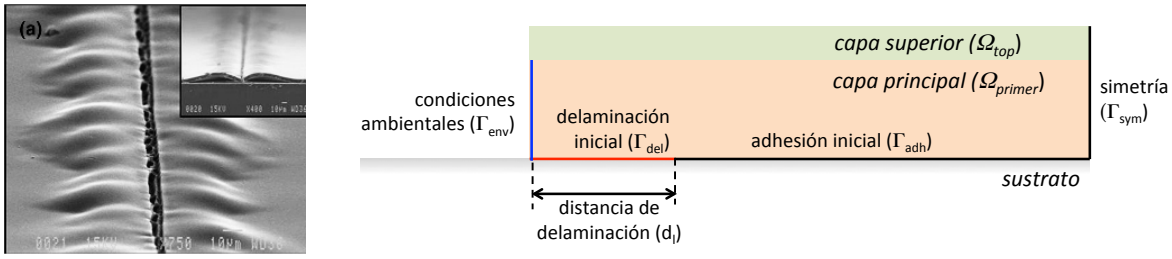
Cabe destacar que el mecanismo de crecimiento estudiado con este modelo se da en sistemas que contienen finas láminas arcillosas (montmorilonitas o bentonitas) o el crecimiento de granos inorgánicos en recubrimientos PPS, e incluso comparte similitudes con el sellado de impactos balísticos en iónomeros o el crecimiento de pinturas ignífugas.

2. Materiales y métodos. Sección Experimental

En lo que resta de trabajo se considerá un recubrimiento bicapa similar al descrito en [8], que consiste en una capa exterior de silicona y una capa interior basada en micro láminas de montmorillonita (una arcilla del tipo de las bentonitas). En la Figura 1 se muestra la geometría del recubrimiento dañado así como la idealización del mismo para su modelado multifísico y su simulación computacional. A continuación se presenta la respuesta del recubrimiento a la ocurrencia de una grieta, analizando

individualmente cada una en cada una de las capas. Para facilitar la presentación del modelo matemático supondremos un comportamiento elástico a cada una de las ellas. La generalización a otras leyes de comportamiento no es una limitación del presente modelo, aunque se omita en la presentación del mismo.

Figura 1. Derecha: imagen SEM del recubrimiento dañado (tomada de [8]) antes del proceso de expansión. Izquierda: diagrama de un recubrimiento bicapa y las condiciones de contorno más significativas en el modelo propuesto.



2.1. Capa superior o fase hidrófoba

La capa superior se modela como un material elástico que no se ve afectado por las condiciones ambientales (temperatura y humedad). Supondremos en todo momento que la adhesión entre las capas del recubriendo es perfecta. De esta forma, el equilibrio mecánico de la capa exterior viene dado por

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}_{top} : \boldsymbol{\varepsilon}, \qquad \text{en} \quad \Omega_{top}$$

donde $\mathbf{C}_{top}$ denota el tensor elástico lineal de cuarto orden que recoge las características de la capa superior. Además, se impiden los desplazamientos en la dirección longitudinal

$$u_x = 0, \qquad \text{en} \quad \Gamma_{sym} \cap \partial\Omega_{top}$$

para garantizar unicidad de solución.

2.2. Capa principal o fase expansiva

La capa interior se comporta como un material permeable y expansivo, por lo que se adopta una analogía con los materiales termo-elásticos para modelar la expansión de la capa interior con la absorción de humedad. Por tanto, el equilibrio mecánido de la capa interior viene dado por

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}_{primer} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \alpha c \mathbf{I}), \qquad \text{en} \quad \Omega_{primer}$$

donde $\mathbf{C}_{primer}$ denota el tensor elástico lineal de cuarto orden que recoge las características de la capa principal, α el coeficiente de expansión de la misma, c denota el contenido de humedad e $\mathbf{I}$ el tensor identidad de segundo orden. Al igual que en la capa superior, impediremos los desplazamientos en la dirección longitudinal

$$u_x = 0, \qquad \text{en} \quad \Gamma_{sym} \cap \partial\Omega_{primer}$$

Por otro lado, la absorción de humedad se rige por una ecuación de difusión

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{D}_{H_2O} \cdot \nabla c), \qquad \text{en} \quad \Omega_{primer}$$

donde $\mathbf{D}_{H_2O}$ denota el tensor de difusión de la humedad a lo largo de la fase expansiva. Este tensor de difusión puede recoger variaciones espaciales (debido a la presencia de clústeres de partículas que dificulten el transporte de humedad) o meramente anisotrópicas debido a la configuración de las láminas expansivas. Supondremos que la capa interior absorbe la humedad a través de la grieta y que no tiene pérdidas por ninguno de sus contornos, lo que nos permite formular las siguientes condiciones de contorno

$$\begin{aligned} c(\mathbf{x}, t) &= c_{env}, \qquad \text{en} \quad \Gamma_{env} \\ \nabla c(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} &= 0, \qquad \text{en} \quad \partial\Omega_{primer} \setminus \Gamma_{env} \end{aligned}$$

donde c_{env} denota la concentración de humedad en el entorno (dependiente de la temperatura y humedad relativas) y $\mathbf{n}$ denota el vector normal apuntando hacia el exterior del dominio en cuestión.

2.3. Sustrato metálico e interfaz recubrimiento-sustrato

El sustrato metálico se caracteriza por tener una rigidez mucho mayor que el recubrimiento. Además, no es objeto de este trabajo analizar el impacto de la grieta en el sustrato o la formación de focos de corrosión. Por lo tanto, el sustrato se modela como un sólido rígido en contacto con el contorno inferior del recubrimiento.

Sin embargo, si es preciso incluir en el modelo el contacto entre el recubrimiento y el sustrato. Se ha observado experimentalmente que la adhesión entre el recubrimiento y el sustrato se pierde parcialmente debido a la grieta (ver Figura 1). Este efecto lo recogemos en el modelo a través de la distancia de delaminación d_l. La superficie inferior de del recubrimiento Γ_{del}, que comienza en la esquina inferior izquierda del recubrimiento y alcanza una longitud de d_l, representa la zona de delaminación del recubrimiento para la que se incluye el contacto con sustrato. Supondremos que el recubrimiento no puede penetrar en el sustrato pero si puede desplazarse sobre el sin fricción, lo que resulta en las siguientes condiciones de contorno para la componente normal de los desplazamientos ($u_n = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$), la tensión normal ($\sigma_n = \boldsymbol{\sigma}\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}$) y la tensión en la dirección tangencial al movimiento ($\boldsymbol{\sigma}_t = \boldsymbol{\sigma}\mathbf{n} - \sigma_n\mathbf{n}$)

$$u_n \leq 0, \quad \sigma_n \leq 0, \quad \sigma_n u_n = 0, \quad \boldsymbol{\sigma}_t = \mathbf{0}, \qquad \text{en} \quad \Gamma_{del}.$$

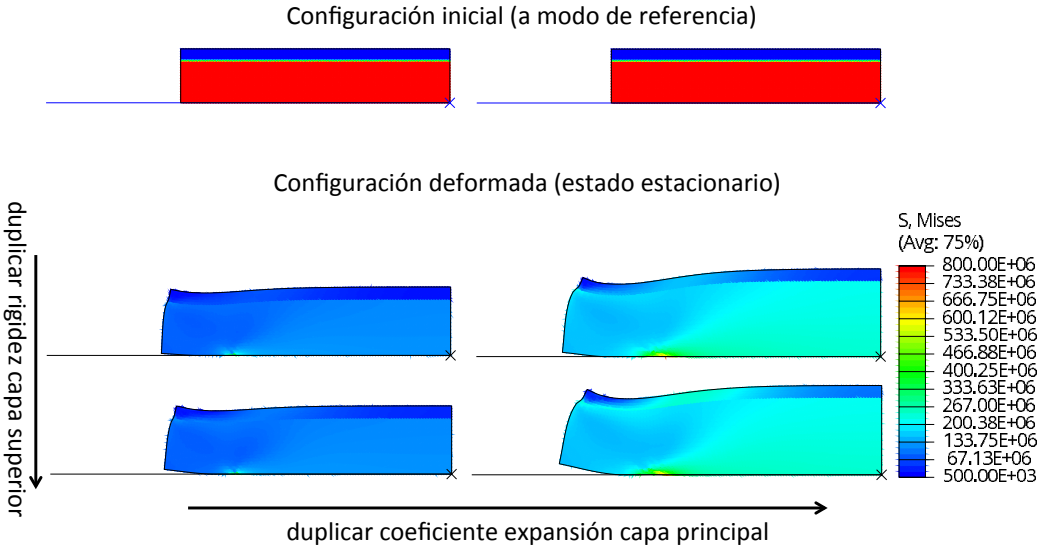
Por otro lado, el resto de superficie inferior del recubrimiento, denotada en el modelo por Γ_{adh}, se encuentra inicialmente adherida al recubrimiento. En este trabajo se busca analizar la respuesta del recubrimiento bajo dos hipótesis diferenciadas. La primera cuando esta adhesión se mantiene intacta en todo el proceso de sellado, lo que nos permitirá analizar la acumulación de tensiones en el interfaz recubrimiento-sustrato. La segunda hipótesis admite la delaminación dinámica de la superficie Γ_{adh}, lo que permitirá analizar de un modo indirecto las propiedades de los adhesivos utilizados en estos materiales.

3. Resultados y Discusión

Trabajos previos han demostrado que el crecimiento de la matriz y la naturaleza laminar del recubrimiento puede llegar a causar la flexión del recubrimiento en las zonas donde se ha perdido la adhesión. Este efecto fue estudiado computacionalmente a través de las rigideces y grosores de las capas del recubrimiento y la distancia de delaminación [9] y recientemente confirmado experimentalmente [10].

Presentamos a continuación un estudio de la respuesta del recubrimiento ante la variación de dos parámeros del modelo: la rigidez de la capa superior E_{top} y el coeficiente de expansión α de la capa principal. Se han escogido estos dos parámetros debido a su impacto tanto en la geometría final del recubrimiento como en la distribución de tensiones a lo largo del mismo. Es preciso notar que el coeficiente de expansión α corresponde, en una situación de deformación no restringida, con un incremento de $\alpha c_{env}\,\%$ el volumen inicial del recubrimiento. Sin pérdida de generalidad consideraremos $c_{env} = 1$ y analizaremos su efecto directamente a través de α. Bajo las condiciones anteriores, duplicar el coeficiente de expansión implica directamente duplicar el crecimiento de la matriz principal respecto a su tamaño inicial.

Figura 2. Parte superior: configuración inicial (en azul capa superior y en rojo capa principal). Parte inferior: tensiones de von Mises y configuración deformada (misma escala que la configuración inicial) en el estado estacionario. De izquierda a derecha se duplica el coeficiente de expansión α de la capa principal (0.15-0.3), mientras que de arriba a abajo se duplica la rigidez de la capa superior (750MPa-1500MPa).



Los resultados obtenidos con este modelo van en línea con las observaciones relativas al aumento de la rigidez de la capa superior. Además, de la Figura 2 se desprende que la capacidad de crecimiento de la matriz (directamente relacionada con el coeficiente α) juega un papel predominante en la distrubución de tensiones a lo largo del recubrimiento, y más concretamente en su concentración en la zona de adhesión con el sustrato. Sin embargo, el efecto de la rigidez del sustrato en la distribución de tensiones es muy pequeño. Lo contrario se observa si atendemos a la configuración final del recubrimiento: aún con una

distribución de tensiones semejante, se obtiene una mayor flexión al aumentar la rigidez de la capa superior.

Sin embargo, si se permite la pérdida de adhesión entre el recubrimiento y el sustrato obtenemos una mayor deformación y una relajación de las tensiones en la capa principal del recubrimiento (Figura 3). La pérdida de adhesión permite un mayor crecimiento en la dirección de la grieta. Sin embargo también permite una mayor flexión de la recubrimiento. Aumentar la capacidad de expansión del recubrimiento incrementa tanto el crecimiento en la dirección de la grieta como la flexión del recubrimiento (Figura 4).

Figura 3. Tensión de von Mises y configuración deformada (misma escala) en el estado estacionario. Izquierda: no admitiendo la pérdida de adhesión en la superficie Γ_{adh}. Derecha: admitiendo la perdida de adhesión en la superficie Γ_{adh}. Misma rigidez de la capa superior (E_{top}=1500MPa) y mismo coeficiente de expansión de la capa principal ($\alpha = 0{,}3$) en ambos casos.

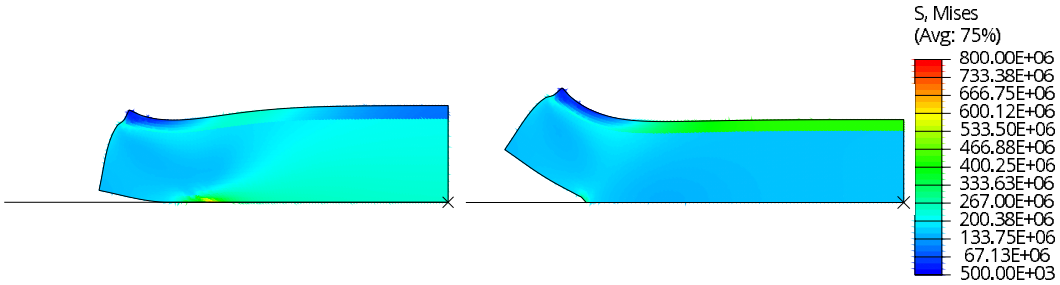
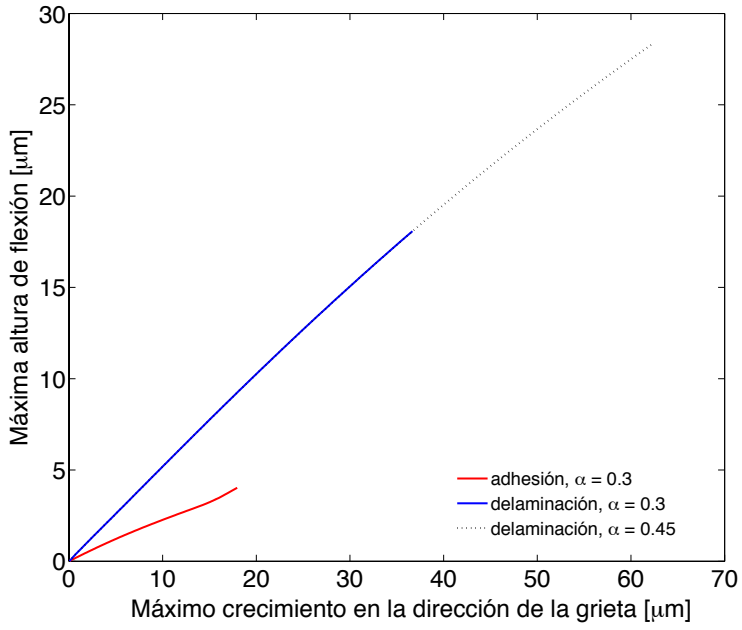


Figura 4. Evolución del desplazamiento de la esquina inferior izquierda del recubrimiento. El desplazamiento en la dirección horizontal determina la anchura máxima de grieta que puede ser sellada. El desplazamiento en la dirección vertical determina la altura máxima de flexión que se obtiene.



4. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un modelo de crecimiento volumétrico y delaminación dinámica para el estudio computacional de un recubrimiento bicapa. Los resultados preliminares del mismo muestran los efectos no asociados de la rigidez de la capa superior y la expansión máxima de la capa principal. Los resultados obtenidos se van a utilizar para calibrar y analizar en profundidad la pérdida de adhesión inducida por la acumulación de tensiones, y a partir de ello la utilización de distintos adhesivos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad su apoyo económico a través del proyecto DPI2012-32880. Este proyecto está parcialmente financiado por la Comisión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional.

Referencias

1. Manchor, J.A.; Bennett, J.M.; Weisenbach, M.R. New concepts in passive fire protection. *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS SDM Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Denver, Colorado* **2002**.
2. Liu, Q.; Schlangen, E.; van de Ven, M. Induction Healing of Porous Asphalt. *Transportation Research Record* **2012**, *2305*, 95-101.
3. Wiktor, V.; Jonkers, H. Quatification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement & Concrete Composites* **2011**, *33*, 763-770.
4. Make Create Innovate, CNN series. *'Living concrete' can heal itself* **2015**, *http://edition.cnn.com/2015/05/14/tech/bioconcrete-delft-jonkers/*
5. Toohey, K.S.; Sottos, N.R.; Lewis, J.A.; Moore, J.S.; White, S.R. Self-healing materials with microvascular networks. *Nature Materials* **2007**, *6*, 581-585.
6. Varley, R.J.; van der Zwaag, S. Towards an understanding of thermally activated self-healing of an ionomer system during ballistic penetration. *Acta Materialia* **2008**, *56*, 5737?5750.
7. Sugama, T.; Gawlik, K. Self-repairing poly(phenylenesulfide) coatings in hydrothermal environments at 200°C. *Mater. Letter.* **2003**, *57*, 4282.
8. Miccichè, F.; Fischer, H.; Varley, R.; van der Zwaag, S. Self-healing barrier coating using an expandable phase. *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials* **2007**, *CD-ROM, paper number 17.*
9. Rey, R.; Javierre, E.; García, S.J.; van der Zwaag, S.; García-Aznar, J.M. Numerical study of the scratch-closing behavior of coatings containing an expansive layer. *Surface & Coatings Technology* **2012**, *Vol. 206*, 2220-2225.
10. Abdolahzadeh, M.; van der Zwaag, S.; Garcia, S.J. Interfacial healing of hybrid sol-gel based polymers containing thermo-reversible tetra-sulphide groups. *Book of Abstracts of the Fifth International Conference on Self Healing Materials* **2015**, *Paper ID: COAT 01 42*.

El grafeno ¿también en la industria militar?

Patiño Cambeiro, Faustino [1]*; Rodríguez Rodríguez, Javier [2]; Patiño Barbeito, Faustino [3] ; Goicoechea Castaño, Itziar [4]; Fenollera Bolívar, María [5];

1 UNIVERSIDADE DE VIGO - Grupo de Investigación de la Universidade de Vigo INARdesign. faustinopc@uvigo.com (PCF)
2 CUD MARÍN-INARdesign. (RRJ)
3 UNIVERSIDADE DE VIGO-INARdesign. fpatino@uvigo.es (PBF)
4 UNIVERSIDADE DE VIGO-INARdesign. igoicoechea@uvigo.es (GCI)
5 UNIVERSIDADE DE VIGO-INARdesign. mariafenollera@yahoo.es (FBM)
6 UNIVERSIDADE DE A CORUÑA. juanprieto.udc@gmail.com (PLJ)

* Autor Principal y responsable del trabajo; faustinopc@uvigo.es (PCF)

Abstract:

Desde INARdesign como grupo de investigación en diseño industrial, pensamos que la financiación que el programa HORIZONTE 2020 posibilita a proyectos innovadores basados en la investigación en nuevos materiales es un buen motivo para una investigación orientada hacia las oportunidades imaginables que un material relativamente reciente como el grafeno puede ofrecer a la industria militar. Este trabajo analiza el estado del arte de las recientes investigaciones aplicadas con este material y propone la posibilidad de considerar su estudio para una posible y positiva incorporación en diversos campos y/o equipos de la industria militar. Aunque los ensayos realizados con grafeno han sido preferentemente en condiciones cuasi estáticas, recientes investigaciones relacionadas con las consecuencias del impacto de proyectiles supersónicos comprueban que estas en espesores de entre 10 y 100 nanómetros tienen una resistencia a ensayos dinámicos de 600 m/s unas 10 veces mayor que la de las usuales chapas de acero macroscópicas. Este hecho, entre otros que desarrollamos en el artículo, pensamos es altamente relevante particularmente en este sector y su validación pragmática posiblemente lo hará imprescindible en el futuro en distintas aplicaciones y equipos. Su excelente conductividad térmica unida a sus propiedades antibacterianas y las otras que este artículo describe son la razón de las aplicaciones que se proponen.

Keywords: Grafeno, Nuevos materiales, Industria militar, Horizonte 2020.

---

1. Introducción

La investigación en nuevos materiales junto a la robótica vinculada a servicios, el desarrollo de la inteligencia artificial –IA- aplicado al big data y la miniaturización de alta tecnología a bajo coste enfocada hacia el fomento de dispositivos wearables y del internet de las cosas –IoT- forma uno de los de los ejes de estas cuatro tendencias macro del plan de apoyo a la innovación -HORIZONTE 2020- que la UE financia con casi 80.000 millones de euros -período 2014-2020- a proyectos innovadores preferentemente así orientados.

En este programa HORIZONTE 2020 pueden participar principalmente las Universidades y sus grupos de investigación, grandes empresas y pymes, asociaciones o agrupaciones de empresas, centros de investigación, centros tecnológicos y la administración pública.

También en este año uno de los ganadores del Concurso Europeo de Tecnologías Futuras y Emergentes (FET) recibirá mil millones de euros para realizar durante un período máximo de 10 años investigaciones sobre las propiedades físico-químicas así como la innovación relativas al grafeno.

Desde INARdesign como grupo de investigación en diseño industrial de la Universidad de Vigo, pensamos que es este un buen motivo para el desarrollo de una investigación orientada hacia las oportunidades imaginables, utópicas incluso, que un material relativamente reciente inventado hace once años, el grafeno, puede ofrecer a la industria militar.

Este artículo investiga en el estado del arte relacionado, por otro lado documentadísimo si tenemos en cuenta que sólo en el año 2014 se han publicado más de 14.000 artículos sobre el grafeno, y seleccionar aquellos con aportaciones que consideramos interesantes de aplicación en la industria militar. Publicaciones relacionadas con el disulfuro de molibdeno (MoS2) y fosforeno, semiconductores planos que en principio parece ser llamados a solucionar las deficiencias semiconductoras del grafeno, crecen también de forma exponencial.

2. Antecedentes

Los experimentos realizados con el grafeno [1] concluyen que es el material más delgado jamás fabricado, los materiales de este tipo se denominan “bidimensionales” 2D , es 100 veces más fuerte que el acero, mejor conductor que el cobre, flexible, altamente transparente por lo que su futuro industrial en aplicaciones relacionadas con estas propiedades parece una consecuencia lógica en un futuro condicionado por la rentabilidad de su fabricación. Empresas como Graphenea en San Sebastián, Graphenano en Alicante, Avanzare en Logroño, Granph Nanotech en Burgos, Graphendis en Alicante o Abengoa en Madrid hacen que España sea uno de los líderes mundiales en la producción de grafeno.

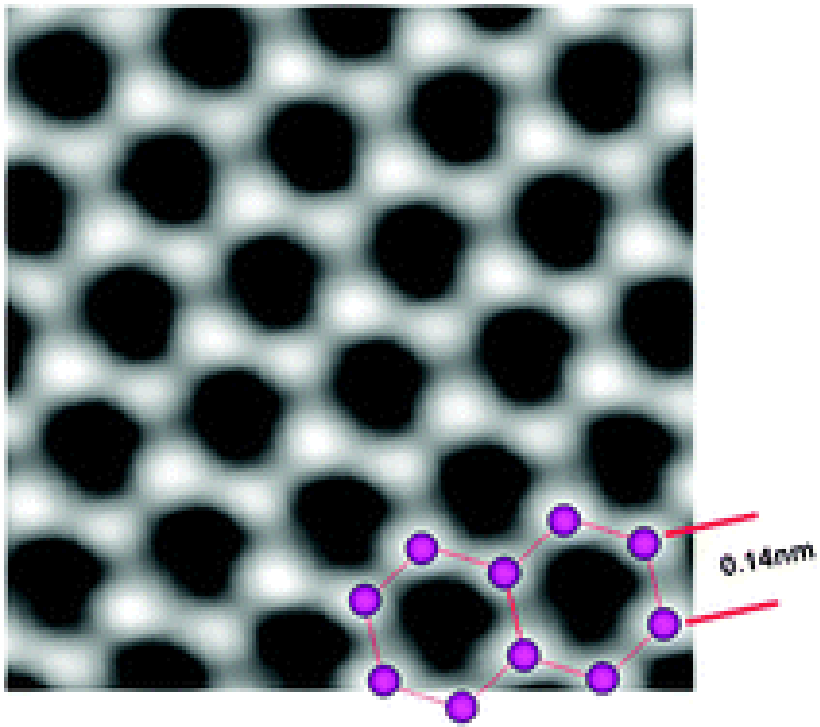
Aunque las investigaciones actuales van más allá del grafeno, bien modificando su estructura hexagonal (pentagrafeno) o en la búsqueda de nuevos materiales de similar concepción con

propiedades complementarias que cubren aquellos parámetros en los que este es deficitario (entre otros su incompleta aportación, así concebido, como semiconductor a la electrónica), pensamos que estos estudios son hasta el momento simulaciones teóricas y de ahí a una producción masiva es evidente que se necesita un largo recorrido investigador. No sucede así con el grafeno ya que aunque su producción no es masiva es ya de importancia y esta se destina a desarrollo y aplicaciones en prototipos principalmente. Su precio empieza a ser asequible, baste señalar que desde el año 2008 en el que el precio de 1 cm2 de grafeno era de 80 millones de euros en la actualidad se reduce a menos 80 euros y el de menor calidad se puede conseguir incluso por 10 euros el gramo. Es por lo que este artículo aún a sabiendas de la posible aparición en el futuro de estos nuevos materiales, se centra exclusivamente en el grafeno y sus posibles aplicaciones en la industria militar.

3. Propiedades. Propuestas de usos

3.1. Resistencia a la tracción

Las láminas, que se utilizan para pruebas a pequeña escala, compuestas de varias capas de grafeno, hasta 300 capas a la vez, tienen un espesor de tan sólo de 10 a 100 nanómetros ya que cada capa tiene en espesor de un átomo de carbono. Estas láminas, de celosías de carbono bidimensionales, en los ensayos soportan disparos de esferas microscópicas a unas velocidades de 3 Km/s. La energía de penetración específica es en este caso 10 veces mayor que los valores asignados a las chapas de acero a 600 m/s. Su módulo de Young en el plano Y de 1,0 TPA unido a su resistencia a la rotura de 42 Nm-1 (12 veces mayor que el Kevlar) hace que el grafeno sea el material más fuerte jamás medido y además muestra que los materiales a nanoescala atómicamente perfectos pueden ser probados mecánicamente a deformaciones mucho más allá del régimen lineal [2].



Además, la estructura hexagonal de sus bandas permite observar que en una lámina de grafeno la distancia interatómica es de 0,14 nm, (50 millones de átomos de carbono / cm de lámina) lo que deja entrever su elevada densidad que no permite que su red sea atravesada ni por los átomos más pequeños conocidos, los de Helio.

Figura nº 1: *Estructura hexagonal de una lámina de grafeno [3]*

Todo ello unido a su ligereza de 0,77 mg/m2, su flexibilidad y su alto poder transpirable y a la vez impermeable hace que se pueda pensar en aplicaciones en la industria militar que se beneficien de estas características mecánicas.

Por ejemplo, en lo relativo a la industria textil y de EPIs se podría desarrollar y adaptar a los usos que ellos se demandan en chalecos antibalas, ropa para agua, zapatos, guantes, cascos o escudos de seguridad. También ropa térmica calefactada o con la facultad de recibir o enviar vía Wireless distinto tipo de información: posición, avisos o constantes vitales.

El futuro para el blindaje de maquinaria y equipos probablemente pasará por la incorporación del grafeno a sus estructuras.

Además en el sector naval las propiedades antes citadas, podría sustituirse los pesados cabos de amarre y la jarcia por otros a base de grafeno más livianos y resistentes. El velamen actual, buques escuela, con velas a base de fibra de carbono con mejores prestaciones que el Kevlar, podrían ser mejoradas ambas con la incorporación de grafeno en lo que respecta a resistencia y ligereza. Además con su alta conductividad y la incorporación de células solares, de mucho menor costo que las convencionales, sensibilizadas a los tejidos las velas podrían ser vehículos de captación de energía al transformar la luz en electricidad y transmisión de datos.

Distintas líneas de investigación han probado que la adicción de grafeno para compuestos epoxi los hace mucho más fuertes y rígidos ya que este une mejor a los polímeros en la resina epoxi. De este modo componentes de esta industria sometidos a esfuerzos, incluso hélices, timones, mechas, palas de helicóptero podrían contemplar en su fabricación la incorporación de grafeno, disminuyendo su peso considerablemente y consecuentemente los consumos energéticos.

3.2. Conductividad, Electrónica Óptica, Almacenamiento energía

Su alta transparencia, transmite el 97,7 % de la luz, su elevada conductividad de 0,96x10^6 Ω.m.^-1, su flexibilidad, unido a sus propiedades conductoras lo hace especialmente útil para la fabricación de pantallas táctiles, de cristal líquido y diodos emisores de luz orgánicos en mejores condiciones que los actuales a base de óxido de indio y estaño (ITO), debido a su bajo consumo de energía además de mejorar la sostenibilidad al ser reciclable ya que elimina el uso de metales.

Estas pantallas tendrán la facilidad de adaptarse a la superficie soporte y ser enrollables con la ventaja de la accesibilidad a la información en cualquier tipo de situación.

La detección de explosivos a base de sensores químicos que contienen hojas de grafeno en forma de espuma que cambia la resistencia en presencia de bajos niveles de vapores de productos químicos [4].

La incorporación de almacenamiento eléctrico a base de baterías o ultracondensadores de grafeno en los equipos militares posiblemente será otro hecho puesto que las pruebas experimentales han

concluido que si en una batería convencional de litio se utiliza grafeno en la superficie de su ánodo el tiempo de recarga es muchísimo más corto, además las pruebas con ultracondensadores, que almacenan electrones en láminas de grafeno aumentando así la potencia eléctrica almacenada en el condensador, han proporcionado mucho mejor rendimiento que las baterías pero con la particularidad que su recarga se hará en minutos.

Un barco distribuye la electricidad como si de una compañía eléctrica se tratase por lo que la U.S Navy adquiere patentes y subvenciona proyectos de investigación del grafeno en aspectos tan relevantes como conductores, almacenamiento de energía, escudos electromagnéticos basados en grafeno para proteger sus antenas estratégicas de posibles tormentas solares. Recientemente botaron un buque experimental totalmente eléctrico: propulsión, maniobra de alta automatización y en el que el grafeno será uno de los actores principales. La sostenibilidad de su aplicación es uno de los factores principales que determinan las investigaciones de esta organización.

3.3. Impermeabilidad

Es esta una de las propiedades de las que la industria militar se servirá en el futuro. El grafeno es altamente impermeable aunque casi "invisible" para el agua lo que añadido a su alta conductividad va a suponer nuevos revestimientos que darán lugar a una nueva clase de superficies estancas de alta conductividad eléctrica.

Además membranas hechas a base de óxido de grafeno son impermeables a todos los gases y líquidos, excepto al agua. Ni tan siquiera lo puede traspasar el helio. Esto supone que chalecos salvavidas, balsas de salvamento, fuerabordas neumáticas se aprovecharán, unido a su ligereza, de estas propiedades para su construcción.

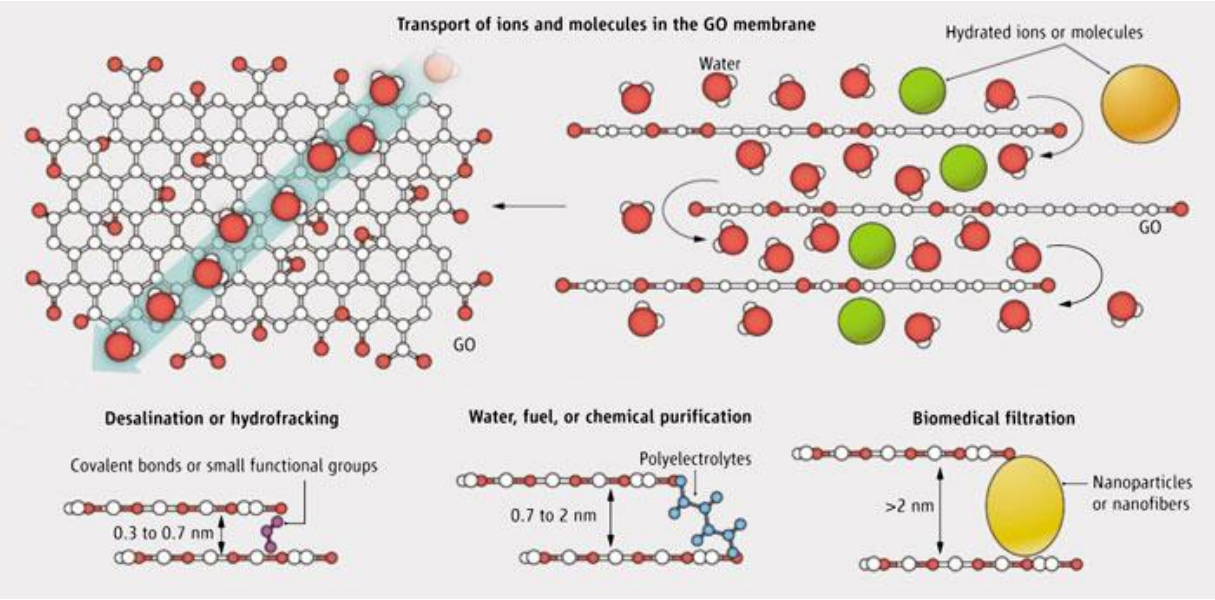


Figura nº 2: *Membrana en la que se observa su permeabilidad al agua y la estanqueidad a otros materiales. (Cortesía: Science).*

Las investigaciones en este último caso [5] apuntan a que estas membranas podrían ser ideales para absorber los derrames de petróleo o como desalinizadoras de agua e incluso podrían llegar a la función de filtro a partir del material base de carbono que permitiría obtener un vaso de agua potable a partir de agua de mar mediante una bomba mecánica manual y con un coste mucho menor que los procesos actuales de ósmosis. Esta sería una aplicación muy interesante para facilitar la vida a bordo.

3.3. Otros usos

Otras aplicaciones de interés son las soluciones que incorporan grafeno: pinturas o morteros que permitirían, valiéndose de su poder de conductividad, las maniobras en ambientes de bajas temperaturas en palas de helicópteros o incluso cascos de buques.

Por último, como refuerzo de la oportunidad y en lo referente a tecnología aeroespacial exponer que recientemente el Pentágono ha asignado tres millones de dólares a la Universidad de Princeton para que desarrolle e investigue con la adicción de diminutas hojas de grafeno al combustible empleado en los motores de los aviones supersónicos. Buscan optimización en su funcionamiento y una reducción en el consumo y la contaminación ambiental. Según los científicos, este desarrollo puede alumbrar el nacimiento de una nueva era en los motores de combustión de las aeronaves. Los aditivos de combustible fabricados con partículas minúsculas de grafeno podrían lograr que los aviones supersónicos vuelen aún más rápido y que sus motores lleguen a contar con mejores condiciones de eficiencia y protección de la sostenibilidad ambiental.

3. Conclusiones

El uso de esta forma alotrópica del carbono en forma de grafeno y sus múltiples propiedades asombrosas actualizándose constantemente hace que este se convierta en uno de los materiales del futuro con más expectativas de aplicación. Este artículo, aún a sabiendas de la existencia de investigaciones actuales en otras modalidades del grafeno o en otros materiales de formación similar que mejoran sus características, opta, aun reconociendo su importancia, por su exclusión centrándose en el grafeno como en un principio fue concebido. La razón principal es que, al estar comercializada su producción a unos precios cada vez más asequibles, se puede aplicar en los trabajos de investigación aplicada.

El campo de la industria militar es excelente y oportuno para proceder en este sentido. Las ventajas que se presumen con ello son múltiples: sostenibilidad, ahorro energético, seguridad, etc. La financiación de proyectos innovadores –programa HORIZONTE 2020- basados en la investigación de nuevos materiales entendemos que es un buen acicate para el desarrollo de proyectos de investigación con el grafeno siguiendo en la línea de los países con industrias militares relevantes.

Referencias

1. Robert F. Service. Beyond Graphene. Science 2015, May 1, 490-492 [DOI :10.1126 /science .348. 6234.490]

2. 2.-C. Lee. X. Wei, W. Kysar, J. Hone. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. (2008).doi:10.1126/science.1157996 pmid:18635798. Science **321**, 385–388.

3. Albert Dato, Zonghoon Lee, Ki-Joon Jeon, Rolf Erni, Velimir Radmilovic, Thomas J. Richardsonc and Michael Frenklach. Clean and highly ordered graphene synthesized in the gas phase. DOI: 10.1039/B911395A (Communication) Chem. Commun., 2009, 6095-6097 .

4. Fazel Yavari, Zongping Chen, Abhay V. Thomas, Wencai Ren, Hui-Ming Cheng, Nikhil Koratkar1. High Sensitivity Gas Detection Using a Macroscopic Three-Dimensional Graphene Foam Network. 23 november 2011. Scientific Reports Volume:1,Article number:166, DOI: doi:10.1038/srep00166.

5. R. K. Joshi, P. Carbone, F. C. Wang, V. G. Kravets, Y. Su, I. V. Grigorieva, H. A. Wu, A. K. Geim, R. R. Nair. Precise and Ultrafast Molecular Sieving Through Graphene Oxide Membranes. Science 14 February 2014: Vol. 343 no. 6172 pp. 752-754. DOI: 10.1126/science.1245711.

Caracterización y simulación energética de tipologías edificatorias prefabricadas de los años 70 en el Ministerio de Defensa.

Rodríguez Soria, Beatriz [1,*], Gracia Ramos, Ángel[1], Guillén Lambea, Silvia [1,2], Navarro Gutiérrez, Carlos [3], Sierra Pérez, Jorge [1,4]

[1] University Center of Defense, Ctra. Huesca s/n, 50090 Zaragoza, Spain. brs@unizar.es (B.R.), agraciar@unizar.es (A.G) sguillen@unizar.es (S.G.) jsierra@unizar.es (J.S.)

[2] Aragón Institute of Engineering Research (I3A), Thermal Engineering and Energy Systems Group, University of Zaragoza, Torres Quevedo Building, C/Maria de Luna 3, 50018 Zaragoza, Spain

[3] B-Haus, Espoz y Mina 19, 50003 Zaragoza, Spain. carlos@buildingplus.es (C.N.)

[4] Sostenipra (ICTA – IRTA - Inèdit Innovació SL) 2014 SGR 1412. Institute of Environmental Science and Technology (ICTA), Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), 08193 – Cerdanyola del Vallès (Bellaterra), Barcelona, Spain

***** Rodríguez Soria, Beatriz; brs @unizar.es (B.R.);

Abstract: Para fomentar la eficiencia energética en los edificios del Ministerio de Defensa del Estado español, a través del Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, se concedió el proyecto de investigación: Desarrollo de un Plan Estratégico de Rehabilitación Energética según metodologías nZEB y ACV para el Ministerio de Defensa. Se ha podido comprobar que entre los edificios donde se ubican las dependencias del Ejército de Tierra, se repite una tipología edificatoria construidos durante los años 70, constituida por paneles de hormigón prefabricados. Estos edificios, poseen un gran potencial de ahorro energético mediante su rehabilitación. El proyecto mencionado se centra en el estudio energético de esta tipología edificatoria con el fin de promover el cumplimiento de parte de las metas estratégicas marcadas en la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID - 2010, así como ayudar a la implantación de los Planes del Ministerio de Defensa en Política Medioambiental. En este artículo se presentarán los resultados de las mediciones de consumo energético, temperaturas, humedades, infiltraciones y transmitancias de un edificio de esta tipología construido en la Academia General Militar de Zaragoza. Con estas medidas ajustará y validará el modelo matemático para la simulación energética del edificio con Design Builder.

Keywords: rehabilitación energética; edificio de paneles prefabricados; nZEB, simulación energética; caracterización térmica;

---

1. Introducción

La Unión Europea (UE) posee actualmente una dependencia energética del exterior próxima al 70% con unos recursos además limitados [1]. El sector de la construcción es responsable del 40% de las emisiones de CO2 y del consumo energético a nivel mundial [2, 3]. Con el fin de disminuir ambos la UE publicó en el año 2010 la Directiva Europea 2010/31/EU. Según esta directiva a partir de 2020 todos los edificios de nueva construcción de la UE (y a partir de 2018 todos los edificios públicos) deberán ser nZEB [4]. Además en el año 2012 se publicó la Directiva 2012/27/UE que obliga a que a partir del año 2014, todos los países de la UE renueven energéticamente cada año el 3% de los edificios de las administraciones públicas [5].

El principal problema para aplicar la Directiva Europea 2010/31/EU es que no da una definición concisa de cómo deben ser los nZEB [6], tomando la Comisión Europea la metodología constructiva Passivhaus desarrollada en Alemania por el Passivhaus-Institute Darmstadt, como referencia [7]. Este mismo instituto ha creado un estándar específico para rehabilitación, denominado ENERPHIT que se encuentra actualmente en proceso de validación [8].

En España los retos planteados en el Horizonte 2020 en eficiencia energética y LCA (análisis de ciclo de vida), quedan recogidos en la Estrategia española de Ciencia y Tecnología y de Innovación, 2013-2020 dentro del objetivo general: Fomento de Actividades de I+D+i Orientadas a los Retos Globales de la Sociedad [9].

El Ministerio de Defensa también posee un Plan General de Medio Ambiente 2007-2021, que persigue como varios de sus objetivos el ahorro energético, el desarrollo de energías alternativas renovables, la reducción en la generación de residuos y la utilización ordenada de los recursos naturales De hecho, en el Informe Ambiental de 2007 especificó que el Ministerio de Defensa reduciría durante los próximos años el consumo de energía de sus dependencias aplicando además criterios ecológicos en la construcción y conservación de los edificios militares [10], que dio lugar en el año 2010 al Plan de Activación de la Eficiencia Energética en los Edificios de la Administración General del Estado. Cabe destacar además que la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID-2010, tiene como una de sus metas (MT 3.3.4.): Disminuir la dependencia de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica en bases y campamentos [11].

Gracias a un proyecto de investigación concedido por el Ministerio de Defensa del Estado español, a través del Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza (CUD 2014/11: Desarrollo de un Plan Estratégico de Rehabilitación Energética según metodologías nZEB y ACV para el Ministerio de Defensa. Caso práctico: Tipología de Edificios prefabricados), se está realizando actualmente un estudio de rehabilitación ENERPHIT para una tipología edificatoria prefabricada cuya construcción se repitió mucho en los años 70. Dentro de sus objetivos se encuentra el de realizar un plan estratégico de rehabilitación energética para los edificios construidos por el Ministerio de Defensa en los años 70 con tipologías edificatorias prefabricadas, bajo criterios de eficiencia energética durante el uso, incluyendo además análisis de ciclo de vida, coste de rehabilitación y mantenimiento. Proyectos similares se han realizado en climas mediterráneos [12, 13]. La combinación de criterios nZEB con metodologías ACV es el siguiente paso a estudiar para la reducción del consumo energético [14, 15]. Otros estudios ya están cuestionando las consecuencias de rehabilitar bajo criterios nZEB [16]. Para caracterizar esta tipología

edificatoria, se ha medido y estudiado un edificio ubicado en la Academia General Militar de Zaragoza, dedicado a uso docente.

En este artículo se muestran los principales resultados obtenidos en las medidas tomadas de consumo energético, temperaturas y humedades relativas interiores, infiltraciones, transmitancias y puentes térmicos en la envolvente del edificio.

Posteriormente se realizará la simulación energética de dicho edificio con el programa Design Builder. Se introducirá el modelo con los datos de transmitancias e infiltraciones medidos. Se compararán los resultados de consumo energético y temperaturas interiores con los obtenidos en las mediciones reales del edificio. De esta forma se validará el modelo matemático simulado con el programa. Una vez validado el modelo, se podrá simular la demanda energética del mismo.

2. Caracterización térmica del edificio tipo

2.1. Descripción del edificio estudiado

El edificio que se ha caracterizado con mediciones reales y que se va a simular en Design Builder fue construido en los años 70 por el Ministerio de Defensa del estado español. Se encuentra ubicado en la Academia General Militar de Zaragoza. Se trata de un edificio de 4033m^2 de superficie construida total distribuido en planta baja y dos plantas alzadas. El edificio está compuesto de aulas docentes, algún despacho para capitanes y un aula magna para actos especiales. La altura entre forjados es de 3,5m en planta baja y de 3,65m en plantas alzadas.

En planta baja los cerramientos de fachada están compuestos de interior a exterior por: enlucido de yeso, hoja de ladrillo doble hueco, cámara de aire para instalaciones con aislamiento de lana mineral, ladrillo gero y baldosa cerámica. En plantas alzadas su composición, también de interior a exterior es de: enlucido de yeso, hoja de ladrillo doble hueco, cámara de aire para instalaciones con 2cm de aislamiento de lana mineral, ladrillo gero, subestructura metálica para sujeción de hoja exterior compuesta por paneles prefabricados de hormigón o acristalamiento sobre perfilería metálica. La solera es de hormigón armado de 20 cm de espesor sin aislar. La cubierta es tipo deck. La carpintería es metálica sin rotura de puente térmico y el vidrio es sencillo de 6mm. La estructura es de hormigón armado. Se adjunta en la figura 1 el modelo introducido en Design Builder para su posterior simulación.

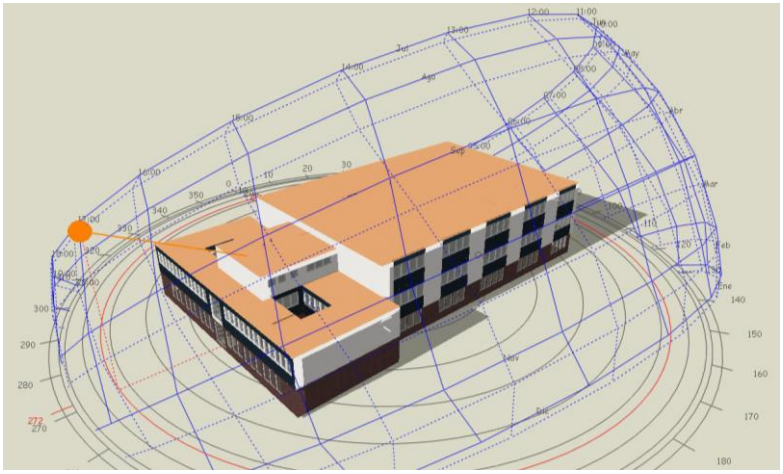


Figura 1. Modelo de simulación del edificio en Design Builder.

2.2. Resultado de las mediciones del edificio. Caracterización del comportamiento térmico.

Para contrastar el estado real de los cerramientos de la envolvente térmica, se realizaron tres tipos de pruebas.

Para caracterizar la estanqueidad del edificio y medir las infiltraciones de aire no deseadas a través de la envolvente, se realizó la prueba de blower-door en cinco recintos tipo del edificio, que contenían todas las tipologías constructivas existentes en el mismo. Las pruebas se realizaron según la norma UNE-EN 13829:02: "Aislamiento térmico. Determinación de la estanquidad al aire en edificios. Método de presurización por medio de ventilador". Los resultados se muestran en la tabla 2, donde n50: son las renovaciones a la hora con una diferencia de presiones de 50Pa, V50, es el volumen de infiltración de aire a la hora para esa misma presión, y LBL LA 4Pa, es la superficie equivalente de grietas en la fachada por donde se producen las infiltraciones a una diferencia de presiones de 4Pa. El deficiente estado del edifico puede observarse en la figura 2. Las infiltraciones se producían principalmente a través de las carpinterías, uniones de elementos de la envolvente térmica, y a través de los pasos de las instalaciones.

Enclosure	n50 (h^{-1})	V50 (m^3/h)	LBL LA 4Pa (cm^2/m^2)
Classroom H8	42,3	11,73	101,9
Classroom H13	28,7	10,15	68,3
Classroom H18	10,6	3,14	51,9
Captains office	93,3	13,47	112,0
Hall	72,6	12,7	101,8

Tabla 1. Infiltraciones obtenidas en recintos con diferentes tipologías de cerramientos.

Realizando mediciones volumétricas del edificio en función del porcentaje de cada tipología de rencinto, la n50 media del edificio es de 46,53 h^{-1}. Estos valores obtenidos son muy superiores a las medias establecidas para edificios de construcciones de los años 70 que ofrece el IDEA (Instituto de Diversificación y Ahorro de Energía), que se encuentran en torno a 10 $h^{-1.}$

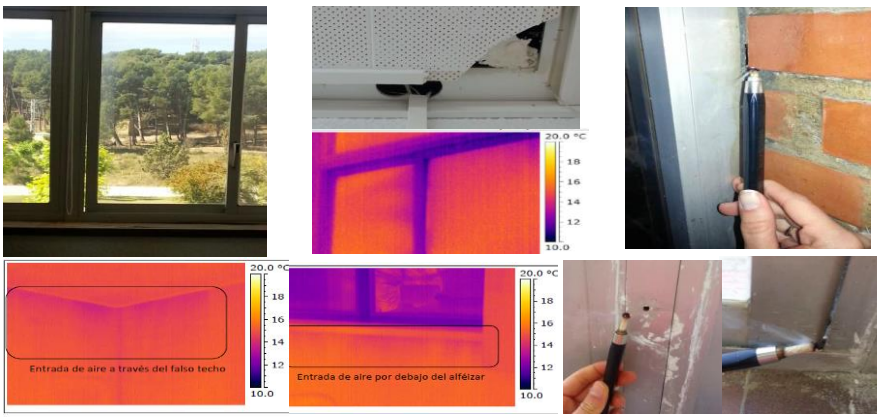


Figura 2. Imágenes de las infiltraciones detectadas durante el test de blower-door.

Se realizaron también termografías exteriores del edificio para detectar los puentes térmicos y la diferencia de temperatura superficial de los mismos con respecto a la envolvente. Las termografías se realizaron según lo indicado en la EN-13187: Prestaciones térmicas de edificios. Detección cualitativa de irregularidades en cerramientos de edificios. Método de infrarrojos.

Algunos resultados se muestran en la figura 3. Las termografías se han utilizado para caracterizar los puentes térmicos del edificio una vez medidas las transmitancias reales de los muros, por la diferencia de temperatura entre superficies exteriores, mediante la ecuación 1 (ec1):

$$U_2 = U_1 + \frac{h \cdot (T_{sext1} - T_{sext2})}{(T_{ext} - T_{int})} \qquad \text{ec1}$$

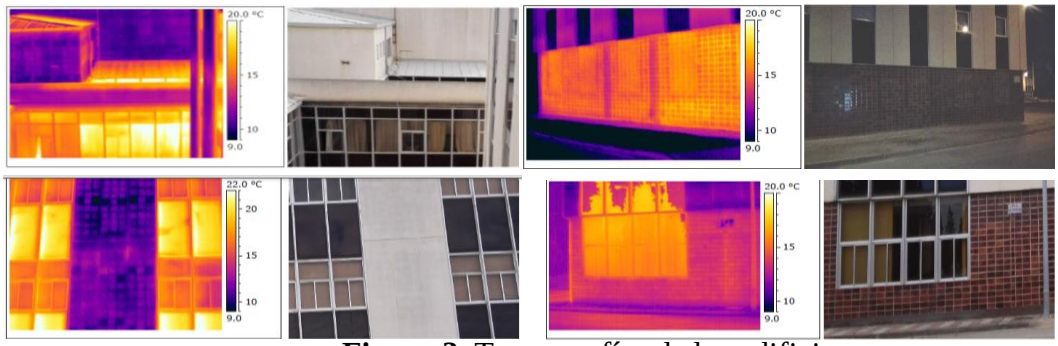


Figura 3. Termografías de los edificios.

Las transmitancias de los cerramientos de la envolvente se midieron con el instrumento calibrado TESTO 435. En la tabla 2 se muestran los resultados de transmitancias calculadas y las transmitancias reales medidas. Se pueden comprobar las desviaciones existentes entre ambas. Los valores de transmitas calculadas en obtienen mediante la ecuación 2 (ec2):

$U = 1/Ri + \sum \lambda i/ei + 1/Re$ ec2

donde λi es la conductividad térmica de cada material en W/(mK), ei es el espesor de cada capa de material en m, y Ri y Re son las resistencias térmicas superficiales del aire interior y exterior, respectivamente, en $m^2 \cdot K/W$.

Tipología de cerramiento	**U real (W/m^2K)**	**U calculada (W/m^2K)**
Fachada ladrillo caravista	0,90	0,76
Fachada panel prefabricado	0.81	0,81
Muro cortina	1,43	0,82
Cristal	6,12	6,10
Marco	5.64	5,70
Solera	3,60[(a)]	2,35
Cubierta	1,7[(a)]	1,1
Pilar	1,46[(a)]	--
Frente de forjado	1,46[(a)]	--
Encuentro de carpintería	1,55[(a)]	--
Puente térmico solera	0,42 [(a)]	--

[(a)] a través de termografía

--: Dato no disponible

Tabla 1. Transmitancias calculadas y transmitancias medidas

Por último también se midieron de forma simultánea tanto el consumo energético del edificio como las temperaturas y humedades relativas interiores y exteriores. El edificio cuenta con un intercambiador de calor cuyo circuito secundario se utiliza para aportar calor al sistema de radiadores del edificio. No cuenta con aire acondicionado. La demanda energética se obtuvo midiendo con termopares la

temperatura a la entrada y a la salida del circuito y recogiendo los datos de la diferencia de presión del mismo. Junto con las características de la bomba, se obtiene la demanda energética de calefacción.

En la figura 4 se incluyen gráficas de estas mediciones para un semana de invierno.

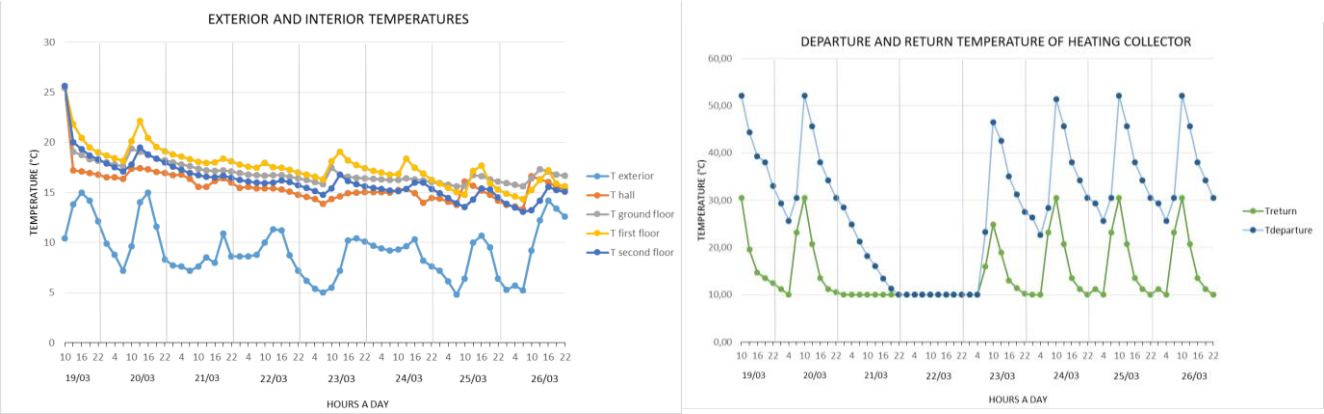


Figura 4. Temperaturas interiores y exteriores del edificio y temperatura de ida y retorno del circuito de calefacción.

3. Simulaciones y resultados

3.1. Validación de resultados.

Para validar los resultados de demanda energética obtenidos con Design Builder, se han ajustado los modelos matemáticos que definen el comportamiento térmico del edificio hasta obtener para una determinada semana del año, los mismos resultados y evolución de temperaturas internas y demandas energéticas, que las medidas durante la caracterización del edificio. De esta forma, se minimizan posibles errores de cálculo debidos a la errónea introducción de parámetros que definen el diseño del edificio y su comportamiento térmico. Esta metodología de validación es muy utilizada en estudios de estas características [17, 18, 19].

3.2. Resultados de la simulación energética.

Se ha simulado energéticamente el edificio a lo largo de un año, incluyendo las características de la actividad y el horario de uso del mismo. Se ha podido comprobar que la mayor parte de las pérdidas energéticas se deben a las infiltraciones del edificio (en torno a un 75%). Por debajo se encuentran las pérdidas energéticas a través de las ventanas del edificio, en torno a un 15%, y por último las debidas al resto de los cerramientos de la envolvente, aproximadamente en la misma proporción, tal y como puede observarse en la figura 5.

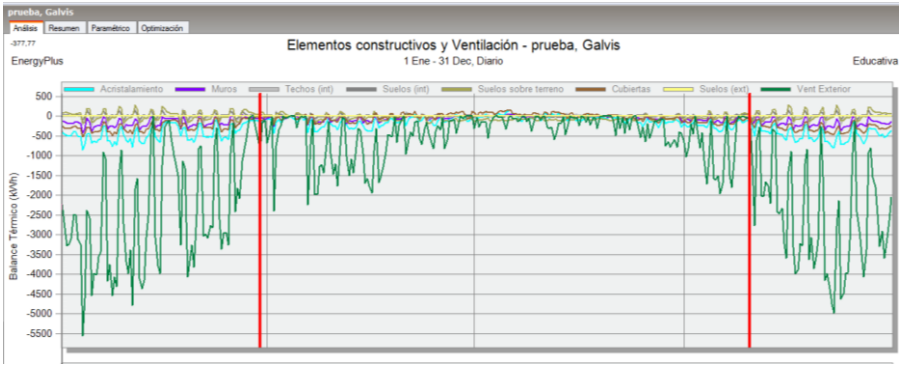


Figura 5. Resultados de pérdidas energéticas del edificio con Design Builder

La demanda anual de calefacción que se ha obtenido es 163.46 kWh/m^{2}año y la demanda anual de refrigeración de 9.33 kWh/m^{2}año, debido a las altas infiltraciones de aire exterior que posee el edificio.

4. Conclusiones

En el artículo se han ofrecido los resultados de las mediciones de un edificio prefabricado de hormigón, característico de las construcciones que se realizaron en los años 70 en las instalaciones del Ejército de Tierra. A través del test de blower-door se ha comprobado que la mayor problemática existente en cuanto al consumo energético del edificio son las altas infiltraciones que posee el edificio, cuatro veces mayor a las estimadas para edificios construidos en edificios de la misma época. Por otra parte, mediante las mediciones de transmitancias y las termografías, se ha constatado la degradación interna del aislamiento de los cerramientos, ya que las transmitancias medidas son mayores que las calculadas con los datos de proyecto. Por tanto, se comprueba la necesidad de testar con medidas reales los datos de partida para las simulaciones, antes de proponer ninguna medida de rehabilitación.

Se comprueba que la actual demanda energética de calefacción del edificio es de 163.46 kWh/m^{2}año, muy superior a los 15 kWh/m^{2}año que exige Passivhaus. La demanda de refrigeración sí que se encuentra por debajo de este valor (9.33 kWh/m^{2}año), debido principalmente a que el edificio no es usado prácticamente en la época estival y por tanto no demanda climatización, cuando mayores temperaturas exteriores se registran, y a que las altas infiltraciones provocan que durante la noche posea refrigeración gratuita. Por último con los valores de demanda energética del edificio obtenidos con Design Builder, se comprueba que la primera medida que debería tomarse para ahorrar energía sería sellar bien el edificio, principalmente con materiales elastoméricos en las juntas y colocando nuevas ventanas mejoradas en el mismo.

Con el modelo de simulación del edificio generado en Design Builder, testado y validado con las mediciones realizadas, se pueden proponer y simular diferentes medidas de rehabilitación energética para esta tipología edificatoria en cualquier ciudad de España.

Agradecimientos

El trabajo desarrollo en este proyecto ha podido realizarse gracias al proyecto de investigación 2014-11: Desarrollo de un Plan Estratégico de Rehabilitación Energética según metodologías nZEB y ACV para el Ministerio de Defensa. Caso práctico. Tipología de Edificios prefabricados, concedido por el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza.

Referencias

1. http://www.codigotecnico.org/cte/export/sites/default/web/galerias/archivos/Distintivos / Documento_divulgativo_DBHE_2013.pdf. Last accessed: may 2014.
2. European Parliament. Directive 2006/32/EC of the European Parliament and of the Council of 5 April 2006 on energy end-use efficiency and energy services and repealing Council Directive 93/76/EEC (Text with EEA relevance). Official Journal, L 114; Strasbourg, 2006; pp. 0064 – 0085.
3. IPPC: Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). IPPC; Geneva, 2008.

4. European Commission. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. Official Journal L153, 18/6/2010; Strasbourg, 2010; pp. 13-35.
5. European Commission. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC. Official Journal of the European Union, L 315/1, 14/11/2012; Strasbourg, 2012; pp. 1-56.
6. European Commission. Energy Efficiency Plan 2011. COM (2011) 109. European Commission, Brussels, 2011.
7. Buildings Performance Institute Europe (BPIE). Principles for Nearly Zero-energy Buildings. Paving the way for effective implementation of policy requirements. Buildings Performance Institute Europe (BPIE) Brussel, 2011.
8. http://europhit.eu/project. Last accessed: jun 2015
9. Ministerio de Economía y Competitividad. Estrategia española de Ciencia y Tecnología y de Innovación, 2013-2020. Gobierno de España, Madrid, 2013.
10. Dirección General de Infraestructura, Secretaria de Estado de Defensa. Plan General de Medio Ambiente 2007-2021. Ministerio de Defensa, Madrid, 2007.
11. Dirección General de Armamento y Material. Subdirección General de Tecnología y Centros. Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID - 2010. Ministerio de Defensa, Madrid, 2010.
12. Di Turi, S.; Stefanizzi, P. Energy analysis and refurbishment proposals for public housing in the city of Bari, Italy. *Energy Policy* **2015**, 79, 58-71.
13. de Santoli, L.; Fraticelli, F.; Fornari, F.; Calice, C. Energy performance assessment and a retrofit strategies in publicschool buildings in Rome. *Energy and Buildings* **2014**, 68, 196-202.
14. Bojic, M.; Miletic, M.; Bojic, L. Optimization of thermal insulation to achieve energy savings in low energy house (refurbishment). *Energy Conversion and Management* **2014**, 84, 681-690.
15. Ferreira, J.; Duarte, M; de Brito, J. Refurbishment decision support tools review—Energy and life cycle as key aspects to sustainable refurbishment projects. *Energy Policy* **2013**, 62, 1453-1460.
16. Beccali, M.; Galatioto, A. ; Leone, G.; Longo, S. Is the NZEB benchmarking approach suitable for assessing energy retrofit design?. *Sustainable Cities Development and Environment Protection* **2013**, 361-363, 402-407.
17. Buratti, C.; Belloni, E.; Palladino, D. Evolutive Housing System: Refurbishment with new technologies and unsteady simulations of energy performance. *Energy and Buildings* **2014**, 74, 173-181.
18. Ascione, F.; Bianco, N; De Masi, R.F.; de'Rossi, F.; Vanoli, G.P. Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the historical value. *Energy and Buildings* **2015**, 95, 172-183.
19. Aste, N.; del Pero, C. Energy retrofit of commercial buildings: case study and applied methodology. *Energy Efficiency* **2013**, 6, 407-423.

Estudio de limpieza ultrasónica aplicada a armamento

Maceiras, Rocío [1,*], Alfonsín, Víctor [1] y Puga, Sergio [2]

[1] Centro Universitario de la Defensa-Marín. Emails: rmaceiras@cud.uvigo.es (R.M.), valfonsin@cud.uvigo.es (V.A)

[2] Escuela Naval Militar; Email: sergiopuga13@gmail.com (S.P.)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: rmaceiras@cud.uvigo.es (R.M.)

Abstract: En este trabajo se pretende validar el uso de un sistema de limpieza por ultrasonidos, que permita alcanzar, en comparación con la limpieza manual, una reducción del tiempo de limpieza y unos resultados de calidad similares con un menor uso de recursos. Para llevar a cabo el estudio se ha realizado en primer lugar la limpieza de armamento de forma manual, teniendo en cuenta el tiempo invertido en el proceso y el resultado final. Posteriormente, se procedió a limpiar el mismo tipo de armamento utilizando una disolución comercial basada en la mezcla de dos productos de diferentes características (ULTRASONIC-A y ULTRASONIC-7) en el baño de ultrasonidos. La toma de decisiones se hizo en base a observaciones visuales de las piezas antes y después del proceso, así como en un microscopio metalográfico para verificar la eliminación de residuos. En base a los resultados obtenidos, se puede concluir que el método de limpieza por ultrasonidos presenta mejores resultados que el método manual, además de un considerable ahorro de tiempo en la limpieza.

Keywords: armamento; ultrasonidos; limpieza; pólvora

1. Introducción

Durante las últimas décadas se han venido desarrollando muchos métodos para realizar una limpieza industrial de materiales, que reduzcan los tiempos de operación y que arrojen resultados de alta calidad y eficiencia. De esta manera se han venido desarrollando durante los últimos años en el campo de la limpieza de objetos, métodos de limpieza mediante el uso de equipos de baño ultrasónicos [1]. Sus ventajas principales radican en una buena capacidad de limpieza de los objetos, aún con las impurezas

más tenaces y dispuestas en cavidades de difícil acceso manual, así como también se elimina el riesgo de accidentes y contaminación por agentes limpiadores agresivos.

El proceso de limpieza, por lo general se realiza mediante la combinación de una acción química (agentes detergentes), y una acción mecánica que puede ser manual o automática (cepillado, lijado, frotación). En el caso de la limpieza por baño ultrasónico, la acción mecánica necesaria para el proceso de limpieza puede ser producida mediante vibraciones u ondas acústicas de fuerte intensidad, que actúan directamente sobre el líquido limpiador, generando así un proceso de limpieza eficaz [2]. Estos equipos producen un efecto conocido como cavitación ultrasónica, que es producida por la acción de ondas sonoras de alta frecuencia (entre 20 y 70 KHz) sobre un medio líquido que actúa como agente limpiador [3].

En el ámbito militar, la limpieza de armamento se lleva realizando desde tiempos remotos de manera manual con motivo de mantener las armas en perfecto estado de uso y conservación, y su verificación se realiza en base a un criterio visual. Se debe entender que el proceso de limpieza se lleva a cabo hasta que el usuario concluye que el arma está lo suficientemente limpia tras haber realizado una limpieza exhaustiva de dicha arma. El tipo de suciedad que presenta el armamento son los restos de inquemados de pólvora, aceite mineral quemado y óxido, que además son las principales causas de fallo del armamento presentes en el armamento moderno. El cuidado y la limpieza de las armas evitan el 65% de sus interrupciones normales. En ello reside la importancia no sólo de implementar un método sencillo que preceptúe las acciones en relación con el cuidado y la limpieza del armamento, sino también de procurar los medios que permitan un adecuado mantenimiento de la armas de una Unidad y optimicen los periodos de tiempo necesarios para ello [4]. Por tanto, debido a las capacidades de limpieza que otorga un equipo de baño ultrasónico, éste se puede considerar idóneo para la limpieza de armamento [5].

Por todo ello, este proyecto tiene como objeto estudiar la validez de uso del método de limpieza de armamento mediante ultrasonidos y comprobar si presenta ciertas mejoras respecto a los métodos manuales tradicionales. Para tal fin, la limpieza de armamento se realizará en un baño ultrasónico tras un previo y posterior análisis visual y en el microscopio metalográfico con el fin de comprobar el grado de limpieza alcanzado. También se ha realizado la limpieza de manera manual con las herramientas disponibles para cualquier alumno Infante de Marina de la Escuela Naval Militar. Es precisamente el tiempo empleado por cualquier usuario para la limpieza de su armamento individual el que se quiere optimizar sustituyendo la limpieza manual por el baño de ultrasonidos.

2. Materiales y Métodos

El equipo utilizado en esta investigación es el aparato de limpieza ultrasónica Elmasonic 300H. El equipo trabaja a una frecuencia fija de 37 KHz y una potencia de 1500 W. Además el equipo cuenta con una cuba de 28 L de capacidad de acero inoxidable resistente a la erosión por cavitación. Cabe destacar que el equipo funciona con una tensión de red de 220 V, tiene un volumen de 0,05 m^3, y un peso de 11 kg.

Para validar el proceso de limpieza ultrasónico se ha utilizado la inspección visual de la pieza objeto de estudio. El análisis visual permite de manera muy intuitiva diferenciar entre los distintos grados de limpieza que se pueden alcanzar. Además los restos presentes en las armas son fácilmente identificables.

La mayoría de los residuos están formados por restos de pólvora y aceite quemado que se quedan adheridos al metal formando pequeños granos de color negro y verdoso que contrastan con el color gris brillante del metal limpio. Con el objetivo de observar la limpieza de manera más profunda se han observado antes y después de cada limpieza en un microscopio metalográfico (Kruss Optronic).

Se ha realizado la limpieza de los conjuntos de cierre de tres fusiles tipo CETME L [6] y 2 pistolas tipo Star Súper B [7]. En el caso de los fusiles CETME se ha seleccionado el conjunto del cierre al ser la parte que más suciedad adquiere durante su uso ya que en sus elementos se acumulan restos de pólvora inquemada y de aceite lubricante. Se ha procedido a limpiar únicamente el conjunto de cierre de los fusiles CETME ya que el resto de partes son demasiado grandes para ser sumergidas en el baño. Esto no ocurre con las pistolas que, debido a su inferior tamaño pueden ser sumergidas totalmente en el baño sin mayor problema.

Las armas han sido disparadas previamente al proceso de limpieza. En el caso de los fusiles CETME L, un cierre estaba en condiciones normales antes de ser usado, otro estaba excesivamente engrasado y el restante además de estar engrasado se mantenía en agua salada con el fin de oxidarlo antes de su limpieza. En el caso de las pistolas, también fueron disparadas antes de cada limpieza, estando una de ellas engrasada.

2.1. Limpieza Manual

Para la limpieza manual se ha empleado aceite lubricante mineral VV-L-800C altamente refinado mezclado con aditivos anti-óxido y con capacidad de desplazar el agua. Además se ha utilizado el Kit de limpieza de usuario del Fusil HK (Figura 1), que es kit reglamentario de limpieza de armamento regularmente empleado por los alumnos de Infantería de Marina, y que además contiene todos los elementos necesarios para la limpieza de un arma. El kit contiene una feminela montable con 3 cabezales intercambiables con cerdas metálicas y sintéticas. La función de este elemento es eliminar por fricción los restos de pólvora acumulados. También incluye una botella de aceite sintético para armas y dos paños de algodón. Por último, un cepillo de cerdas sintéticas que se emplea para limpiar las zonas de más difícil acceso y para eliminar por fricción los restos de óxido y aceites quemados.



Figura 1. Kit de limpieza de armamento.

El proceso de limpieza manual de las armas es el siguiente: se comienza por desmontar el arma, a continuación se engrasan ligeramente todas piezas con un paño de algodón y con la ayuda de la feminela y el cepillo se atacan las zonas con suciedad hasta que ésta desaparezca. Por último, con otro paño de algodón se retiran los restos de suciedad y se engrasan muy ligeramente todas las partes móviles del arma. Con el fin de optimizar el tiempo de limpieza se ha determinado el tiempo invertido en este

proceso. Para la limpieza manual de la pistola se han dedicado 45 minutos y 25 minutos al cierre del CETME, sumando un total de 70 minutos de trabajo.

2.2. Limpieza Ultrasónica

Para la limpieza en el baño de ultrasonidos se han utilizado dos disoluciones comerciales combinadas: ULTRASONIC-7, apta para la limpieza de hierro, acero galvanizado, aluminio y desincrustación de carbonilla, y ULTRASONIC-A, apta para el desengrase de metales férricos. La disolución se ha preparado con base acuosa y con un porcentaje en masa del 3% y del 0,5% de cada producto respectivamente. Las piezas se sumergieron en el interior del baño y dentro de un cestillo especial que las coloca en el punto de cavitación óptimo dentro del baño. El proceso de limpieza se ha llevado a cabo durante 20 minutos y con una temperatura inicial de la disolución en torno a 60º C. La capacidad del baño, permite introducir varias piezas de la pistola Star y del fusil CETME al mismo tiempo (Figura 2).



Figura 2. Distribución de las piezas en el interior del baño.

3. Resultados y Discusión

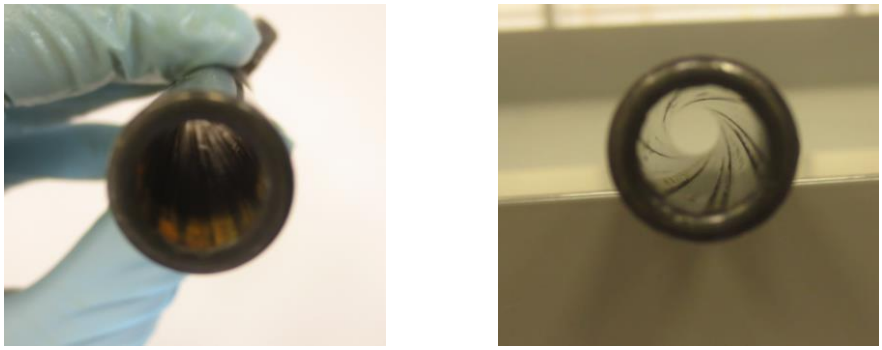
3.1. Limpieza Manual

Para la limpieza manual se han empleado 45 minutos para la pistola y 25 minutos al cierre del CETME. Como se puede comprobar en la Figura 3, la limpieza manual es un método eficaz que elimina la totalidad de los restos recientes en el armamento así como el óxido presente. Los resultados obtenidos muestran la eficacia de este método, aunque la inversión de tiempo es mayor que en la limpieza ultrasónica. Las figuras 3-5 muestran el detalle de las distintas partes de la pistola Star antes y después de la limpieza manual.



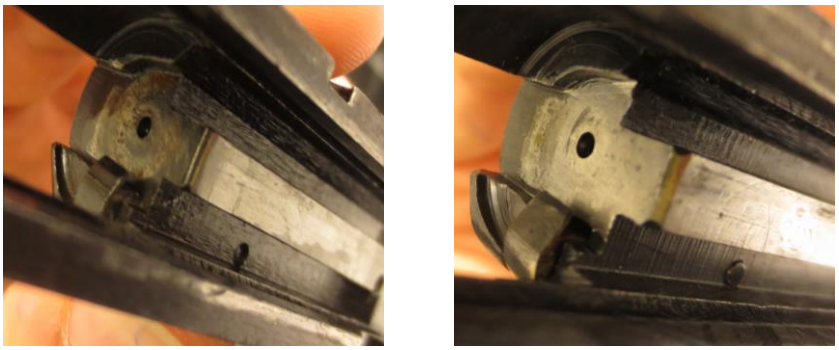
(a) (b)

Figura 3. Comparativa de cuerpo de pistola Star (a) antes y (b) después de la limpieza.



(a) (b)

Figura 4. Comparativa del cañón de pistola Star (a) antes y (b) después de su limpieza.



(a) (b)

Figura 5. Vista de frontal de cierre de la pistola Star (a) antes y (b) después de la limpieza.

Asimismo, se puede comprobar que el cierre del fusil también ha quedado limpio tras el proceso de limpieza manual (Figura 6).



(a) (b)

Figura 6. Vista frontal del cierre de un fusil CETME (a) antes y (b) tras su limpieza.

3.2. Limpieza Ultrasónica

El proceso de limpieza se ha llevado a cabo durante 20 minutos y con una temperatura inicial de la disolución en torno a 60º C. Una vez pasado ese tiempo las piezas se han observado visualmente y en el microscopio metalográfico, obteniendo los siguientes resultados: en el cañón de pistola Star los residuos han desaparecido y sólo han quedado pequeños restos en la recámara, también se puede apreciar que el ánima del cañón ha quedado totalmente limpia (Figura 7). Como se distingue en las imágenes de perfil (a simple vista y en la micrografía), la limpieza no sólo afecta a los restos de pólvora ya que el óxido presente en el cañón también es eliminado.



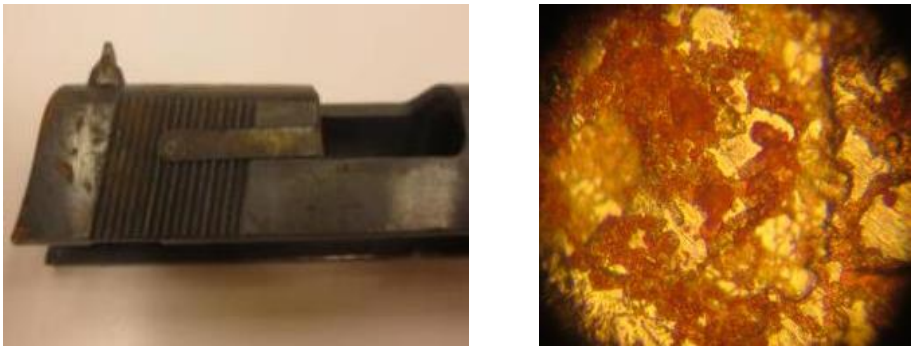
(a)



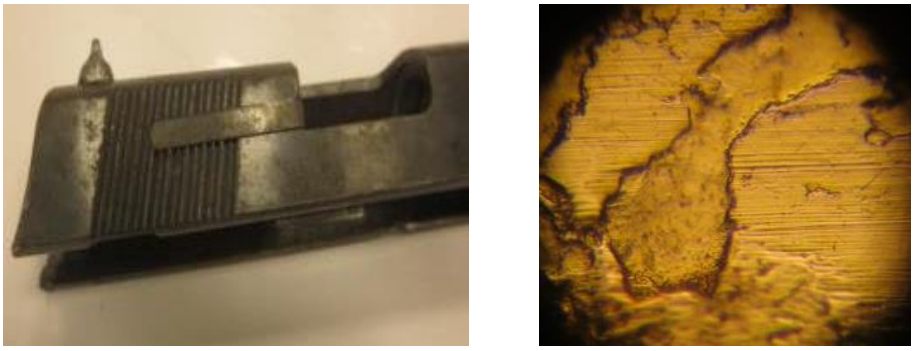
(b)

Figura 7. Cañón de pistola Star (a) antes y (b) después de su limpieza.

En las imágenes de la Figura 8 se muestra como tras el lavado en el baño ultrasónico el óxido presente en la corredera se ha eliminado por completo. Esto se puede distinguir tanto a simple vista como en las micrografías de las zonas afectadas. Por tanto, en este ensayo se ha logrado eliminar el óxido y la suciedad presentes en todas las piezas de la pistola.



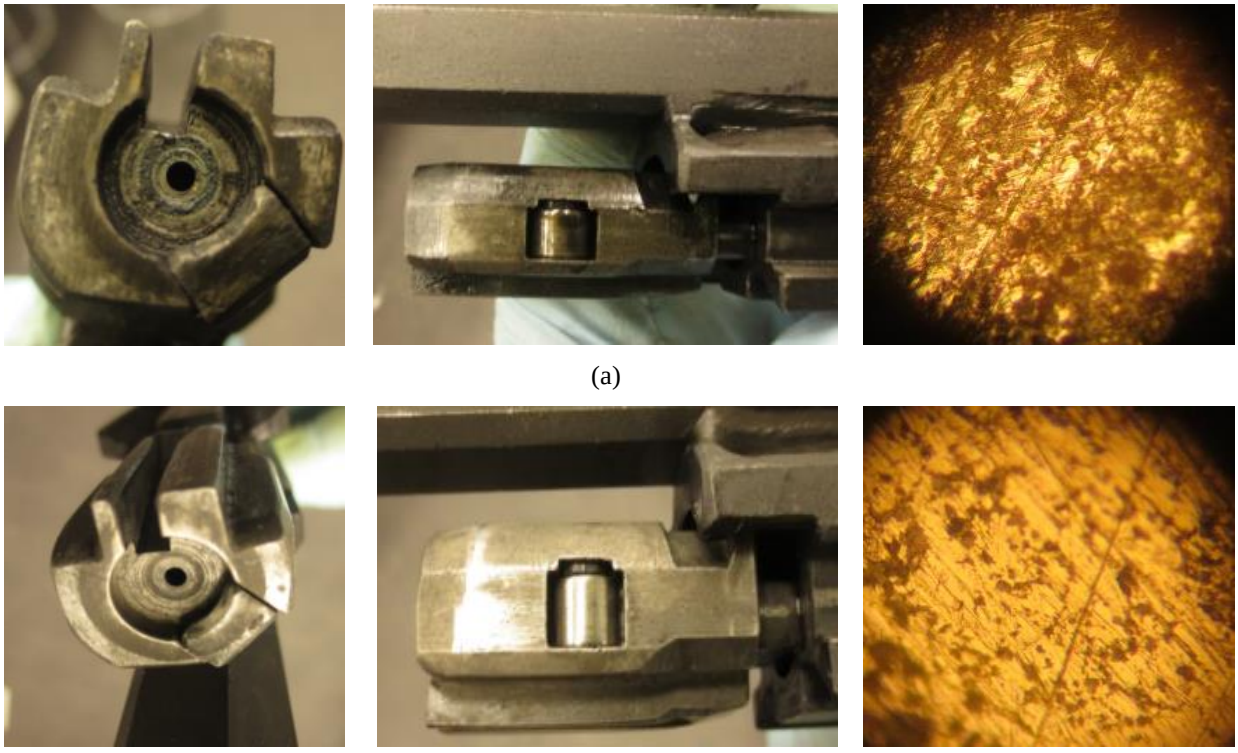
(a)



(b)

Figura 8. Corredera de pistola Star (a) antes y (b) después de su limpieza.

Para comprobar la eficacia del baño de ultrasonidos con los restos de pólvora y aceite, se han introducido en el baño varias piezas. Como se puede observar en la Figura 9, el baño elimina todos los restos de pólvora y aceite alcanzando unos niveles de limpieza más que adecuados. Tanto a simple vista como en las micrografías se puede apreciar el grado de limpieza alcanzado.



(a)

(b)

Figura 9. Cierre de fusil CETME (a) antes y (b) después de su limpieza.

Como se puede apreciar en todas las imágenes comparativas, la diferencia entre el antes y el después de la limpieza ultrasónica resulta más eficaz que la limpieza manual. Los niveles de suciedad eliminada son más altos y el tiempo de operación es menor. Además, cabe destacar que una vez retiradas las piezas del baño, no es necesario secarlas, ya que la disolución se evapora con el consecuente ahorro de tiempo.

3.3. Estudio Económico

Una vez analizada la eficacia de la limpieza ultrasónica se procede a analizar ambos métodos desde un punto de vista económico, que se resume en la tabla 1.

Tabla 1. Tabla resumen gastos mensuales de limpieza.

	Limpieza manual	**Limpieza Ultrasónica**
Coste electricidad	-	2,31 €/mes
Coste agente limpiador	100 €/mes	462 €/mes
Mano de obra	806 €/mes	36,96 €
Total (mensualmente)	**906 €/mes**	**501,27 €/mes**

El método manual consta de los siguientes gastos mensuales:

- *Coste agente limpiador*: reponer los paños de los kits de limpieza y el aceite utilizado. Total: **100 €**.
- *Mano de obra*: una unidad dedica aproximadamente 1 hora a la semana a la limpieza del armamento. Por tanto en un mes, la unidad (120 hombres) dedica un total de 4 horas mensuales. Bajo este supuesto, el coste de la mano de obra (suponiendo un sueldo de 14.531,74 €/año) tiene un valor de 1,68 €/hora. Total: **806 €**.

En el caso de la limpieza ultrasónica podrían limpiarse un máximo de 15 conjuntos de mecanismos de fusiles simultáneamente. Teniendo esto en consideración, serían necesarias 8 limpiezas para completar los 120 fusiles de la Unidad. Si se realizan 4 limpiezas mensuales, se tendrían que realizar 32 limpiezas ultrasónicas al mes. Para la adquisición del baño habría que realizar una inversión inicial de **2886 €** para la adquisición del equipo y asumir los siguientes gastos mensuales:

- *Coste electricidad*: el precio de la electricidad asciende a 0,14 € kWh. Cada limpieza necesita 0,33 horas, lo que hace un total de 11 horas y un consumo de 16500 Wh. Total: **2,31 €**.
- *Coste agente limpiador*: en cada limpieza se utiliza un total de 540 g de Ultrasonics-7 (22,40 €/kg) y 90g de Ultrasonics-A (24,5 €7kg). El coste de cada limpieza asciende a 14,46 €. Total: **462 €**.
- *Mano de obra*: para operar el equipo sólo serían necesarios dos operarios. Bajo las mismas condiciones que la limpieza manual, el coste para las 11 horas sería de 36,96 €/mes. Total: **501,27 €**.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que el método de limpieza de armamento mediante la técnica de baño ultrasónico es eficaz, no ocasiona daños en las piezas, y se logran mejores resultados que en el método manual. En cuanto al coste asociado en el proceso, excluyendo la inversión inicial que sería amortizada en un corto período de tiempo (aproximadamente 7 años), la técnica ultrasónica tiene un menor coste mensual. En cuanto al tiempo de trabajo, si se consigue verificar que una limpieza por baño de ultrasonidos es mucho más breve que una realizada manualmente.

Referencias

1. Sivakumara, V., Chandrasekarana, F., Swaminathana, G., Raob, P.G. Towards cleaner degreasing method in industries: ultrasound-assisted aqueous degreasing process in leather making. Journal of Cleaner Production **2009**, 17, 101–104.
2. Mason, T.J. Ultrasonic cleaning: An historical perspective. Ultrasonics Sonochemistry (in press).
3. Franc, J.P. et al. La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels. Collection Grenoble Sciences. Presses Universitaires de Grenoble 1995.
4. J. d. Reglas, Reglamento de infantería de marina 04-280, San Fernando, 2000.
5. Bilsza, H. M. Cleaning small arms with ultrasonics. *Metal Finishing* **1965**, 63, 76.
6. M. d. D. d. E. d. Tierra, Fúsil Cetme L 5,56, Mando de Doctrina, 1995.
7. M. d. D. d. E. d. Tierra, Pistola Star Súper B, Mando de Doctrina, 1987.

Sesión I-D

Entorno, Sistemas y Modelado

Aerodinámica de buques con operación de aeronaves a bordo

Bardera Mora, Rafael [1,*]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (Mº Defensa). Email: barderar@inta.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: barderar@inta.es

---

Abstract:

El estudio del flujo aerodinámico sobre buques con capacidad para la operación de aeronaves, se ha convertido en una línea de investigación primordial de la aerodinámica experimental, que engloba tanto medidas de viento a bordo de los propios buques como en túneles aerodinámicos sobre maquetas a escala reducida. El flujo aerodinámico que se desarrolla sobre la cubierta de vuelo es no estacionario y altamente turbulento, pues se encuentra en la estela de la superestructura del buque, todo lo cual, se traduce en unas condiciones adversas para la operación de helicópteros en dicha zona del buque, aumentando la carga del piloto durante dichas operaciones, las cuales, se realizan en condiciones de alto riesgo.

La caracterización del flujo por medio de medidas del campo de velocidades permite emitir las Cartas de Viento que constituyen un documento guía para la realización de operaciones de aeronaves sobre el buque en condiciones de seguridad, en función del viento relativo reinante en cada momento.

Keywords: aerodinámica, buques, cubierta de vuelo, helicópteros

---

1. Introducción

El flujo aerodinámico sobre un barco es altamente complejo y se encuentra influenciado por gran número de factores, tales como chimeneas, antenas, radomos y mástiles, que inducen un flujo característico sobre el mismo. Además, dicho flujo discurre de modo que la estela del barco no sólo abarca la región cercana a su superestructura mediante los efectos de campo cercano, sino también a lo largo una distancia del orden de varias veces la longitud del propio barco, a través de los efectos de campo lejano [1].

Las operaciones de helicópteros a bordo de buques se realizan en un ambiente turbulento muy adverso. El viento relativo sobre la cubierta de vuelo puede sobrepasar los requerimientos operacionales forzando a las aeronaves a aterrizar en condiciones muy alejadas de ser las ideales, de modo que las operaciones a bordo de buques conllevan limitaciones adicionales, las cuales no son proporcionadas por el fabricante del helicóptero y dependen en gran medida del tipo de buque y de su entorno.

Las características del flujo aerodinámico que tiene lugar en las sendas de aproximación de aeronaves a la cubierta de vuelo de buques, se estudian sobre un modelo a escala reducida que es ensayado en túnel aerodinámico [2]. Los resultados de estos ensayos proporcionan la envolvente de vuelo que indica las limitaciones de viento, aportando información fundamental para el conocimiento de las Limitaciones Operacionales de un conjunto Barco-Helicóptero, más conocidas como SHOL's (Ship Helicopter Operations Limitations), para condiciones de máxima seguridad, motivo por el que la determinación de dichas limitaciones de viento constituye uno de los aspectos primordiales en la calificación de helicópteros para su operación a bordo de buques.

En este trabajo, se presenta un estudio del flujo aerodinámico sobre una fragata, mostrando los resultados obtenidos a partir de medidas, tanto en túnel aerodinámico como sobre barco real, que han dado lugar a la determinación de la Carta de Vientos preliminar, la cual debe ser posteriormente confirmada por las Autoridades Navales mediante información adicional recogida durante ensayos en vuelo a bordo, así como con la experiencia de los pilotos de las aeronaves.

1.1 Viento Relativo

Cuando un buque se encuentra navegando, se ve sometido tanto a la acción del viento atmosférico como a la de la corriente de aire inducida como consecuencia de su desplazamiento, de modo que el buque "ve" un cierto viento relativo aparente que es la suma de ambos efectos.

En la Figura 1 se muestra un esquema donde se ha representado el buque desplazándose en travesía de crucero con velocidad de avance V_S según su eje longitudinal. Sobre dicho buque incide el viento con velocidad V_W formando un ángulo β con el eje longitudinal del buque. Solidarios al buque, se han dispuesto unos ejes colocados de modo que el eje longitudinal del mismo coincida con el eje x [3].

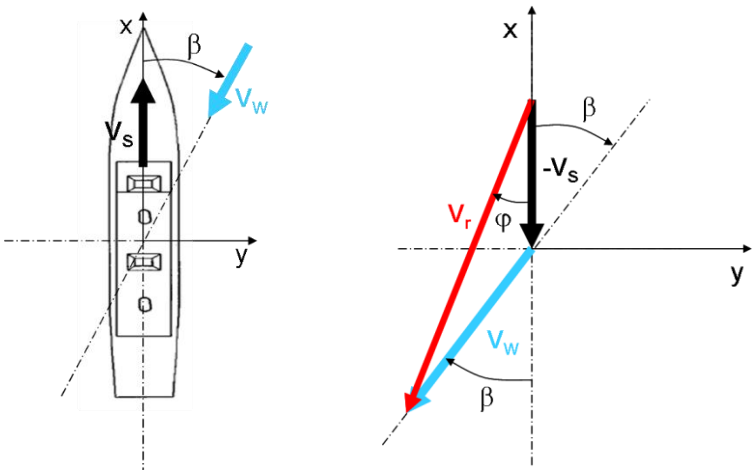


Figura 1. Diagramas de velocidades del buque y de velocidades de vientos.

En la parte derecha de la Figura 1 se ha representado el diagrama de velocidades de viento que tienen lugar sobre un buque en movimiento. El propio movimiento de avance del buque induce una velocidad de viento relativo, de magnitud igual a la velocidad de avance del buque pero de sentido contrario ($-V_S$). La composición vectorial de este viento relativo con la del viento atmosférico proporcionará el viento relativo *Vr*, que en forma vectorial vendrá dado por,

$$\vec{V}_r = \vec{V}_W - \vec{V}_S \tag{1}$$

El ángulo de viento relativo φ es el formado por el viento relativo con el eje longitudinal del barco.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. Túnel aerodinámico

Los ensayos que se presentan en este documento se llevaron a cabo en el Túnel nº 1 del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial situado en la localidad de Torrejón de Ardoz (Madrid). Se trata de un túnel aerodinámico de tipo Prandtl, de circuito cerrado y sección de ensayos abierta con geometría elíptica y dimensiones 3 x 2 m2. La máxima velocidad de viento alcanzable es de 60 m/s para una potencia eléctrica de 450 kW, con una turbulencia de 0,5%. La Figura 2 muestra un esquema de dicho túnel donde se indican sus componentes principales.

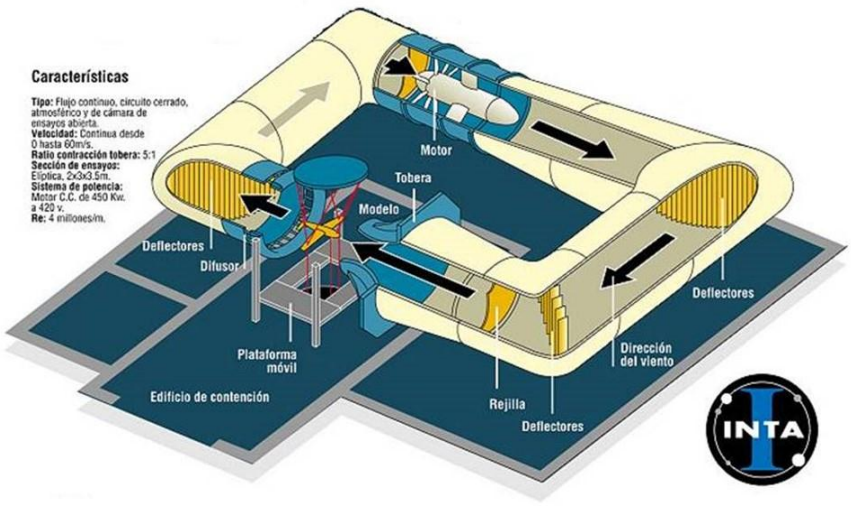


Figura 2. Esquema del Túnel nº 1-INTA.

2.2. Maqueta de ensayos

Una maqueta de fragata a escala reducida 1:50 por encima de la línea de flotación ha sido construida en madera para ser ensayada en el mencionado túnel aerodinámico como se muestra en la Figura 3. La maqueta tiene una longitud de 2 m, una manga de 0,28 m y un hangar de 0,17 m de altura.

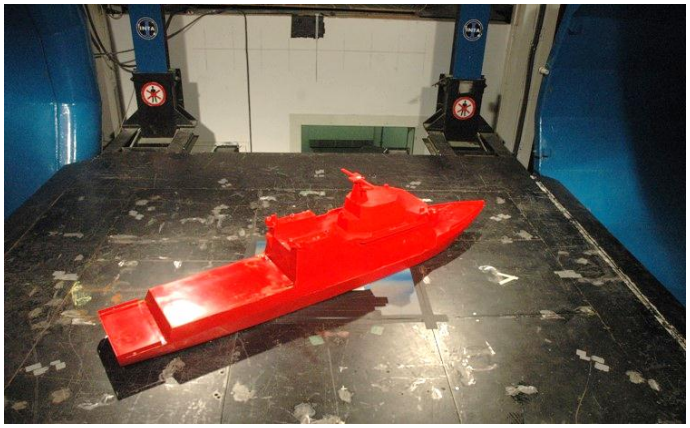


Figura 3. Maqueta de buque en la sección de ensayos del Túnel nº 1-INTA.

Durante los ensayos, la maqueta estaba apoyada sobre un suelo plano en el centro de la sección de ensayos, simulando la superficie marina. Asimismo, la maqueta estaba unida a un sistema de posicionamiento que permitía girarla para obtener diferentes orientaciones frente al viento. La velocidad de viento durante los ensayos fue de 20 m/s correspondiente a un número de Reynolds basado en la manga de 3,9 × 105, por encima del número de Reynolds crítico [4].

2.3. Instrumentación de ensayos

Las medidas de velocidad se llevaron a cabo con un anemómetro láser Doppler (LDA) comercial de marca TSI, Inc. de dos componentes de velocidad, que permitía obtener velocidad local del flujo de forma no intrusiva. La fuente de luz estaba compuesta por un láser continuo Argon-ion modelo INNOVA 70C de 3 w de potencia. Las dos componentes de velocidad fueron medidas simultáneamente usando dos canales independientes con diferentes longitudes de onda. Las partículas trazadoras de aceite de oliva de 1 μm de diámetro producidas por una atomizador de tipo Laskin [5] fueron inyectadas en la cámara de tranquilización del túnel aerodinámico, a una distancia seis metros aguas arriba de la sección de ensayos.

La velocidad de viento fue determinada en un punto situado a una altura de 0,10 m sobre el centro de la cubierta de vuelo de la maqueta del buque. El ángulo de incidencia del viento se varió durante el ensayo con objeto de simular diferentes ángulos de viento relativo. A partir de las medidas del anemómetro láser Doppler, se calcularon las velocidades de viento adimensionales usando las siguientes expresiones,

$$\hat{u} = \frac{u_{lda}}{V_t} \tag{2}$$

$$\hat{v} = \frac{v_{lda}}{V_t} \tag{3}$$

donde u_{lda} y v_{lda} representan las componentes de velocidad promediadas sobre 5.000 muestras medidas con el LDA en el punto crítico de la cubierta de vuelo y V_t es el módulo de la velocidad media de la corriente de aire del túnel.

2.4. Medidas a bordo del buque

Las medidas de velocidad de viento sobre la cubierta de vuelo del propio buque fueron realizadas durante una travesía del mismo, para lo cual se fijaba el rumbo durante 15 minutos y se tomaban las medidas correspondientes a cada ángulo de viento relativo. Posteriormente, el rumbo se iba modificando con incrementos de 10 grados, hasta completar el rango comprendido entre -90º a +90º.

Un anemómetro sónico de 3 componentes marca Metek modelo USA-1 se situó en el centro de la cubierta de vuelo del buque sobre un mástil de 5 m de altura, como se muestra en la Figura 4. La frecuencia de muestreo de este anemómetro es de 1 Hz, de modo que se registraron 900 datos para cada ángulo de viento relativo durante los 15 minutos de adquisición de medidas.

Un segundo anemómetro sónico se instaló en la proa del buque 14 m aguas arriba del puente de mando, con objeto de verificar las medidas de los anemómetros del propio buque.



Figura 4. Anemómetro sónico situado en la cubierta de vuelo.

3. Resultados y Discusión

Las medidas de velocidad de viento se han adimensionalizado con la correspondiente velocidad de la corriente libre, de modo que, las velocidades adimensionales de viento sobre maqueta de túnel y barco real puedan ser comparadas, tal y como se muestra en el gráfico de la Figura 5. Dicho gráfico indica una tendencia muy parecida entre las medidas en túnel y las de barco, observándose ligeras diferencias en algunos puntos.

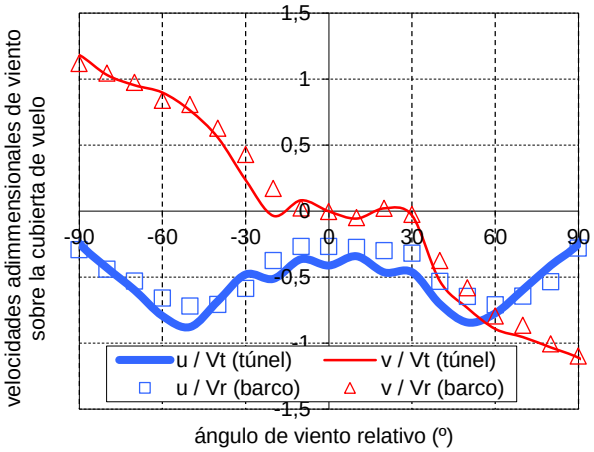


Figura 5. Velocidades de viento sobre la cubierta de vuelo.

El análisis de turbulencia se ha realizado a partir del cálculo de la intensidad de turbulencia del viento, empleando para ello, la expresión habitual, $Ii = \sigma i / V$, donde Ii y σi representan la intensidad de turbulencia y la desviación típica de la componente *"i"* de la velocidad, respectivamente, y V es la velocidad de la corriente libre. En la Figura 6 se ha representado la intensidad de turbulencia de ambas

componentes de velocidad, observándose una tendencia parecida para los datos obtenidos en túnel y sobre barco real. Picos con intensidades de turbulencia del 30% e incluso mayores (37%) se encuentran situados a ángulos de viento relativo de -30º en la rama negativa y de +30 y +40º en la rama positiva.

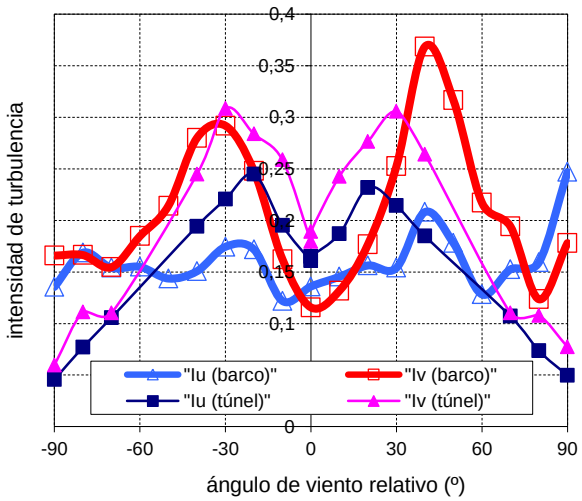


Figura 6. Intensidad de turbulencia sobre la cubierta de vuelo.

En la Figura 7 se muestra una Carta de Vientos típica donde quedan recogidas las operaciones seguras en cuanto a condiciones de viento se refiere y que ha sido obtenida partir de las velocidades de viento medidas y de la turbulencia [6]. La dirección del viento relativo sobre la cubierta de vuelo está representada mediante las líneas radiales y la velocidad de viento relativo por círculos concéntricos.

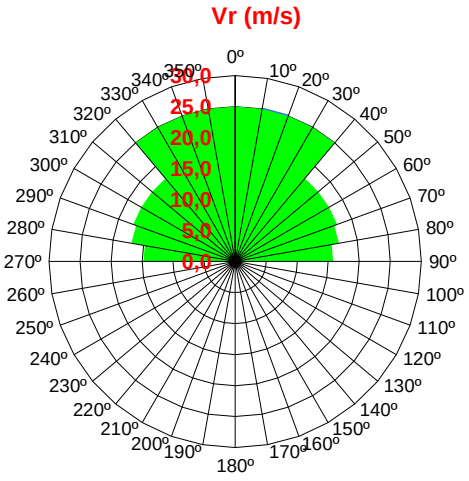


Figura 7. Carta de Vientos típica.

4. Conclusiones

Las operaciones de helicópteros a bordo de aeronaves se realizan en un ambiente muy adverso que aumenta la carga del piloto, pudiendo incluso forzar a las aeronaves a aterrizar en condiciones de bajos niveles de seguridad, todo lo cual, se traduce en limitaciones adicionales que no están contempladas para las operaciones convencionales en tierra.

La investigación del flujo aerodinámico sobre una fragata ha sido llevada a cabo sobre una maqueta de túnel y a bordo del buque a escala real, con objeto de conseguir información y un mejor conocimiento de dicho flujo aerodinámico. Los resultados de las medidas de velocidad y de turbulencia han mostrado una tendencia similar, permitiendo trazar la Carta de Viento del buque que constituye un diagrama para operación segura de aeronaves a bordo de buques frente a condiciones de viento, que permita la certificación de helicópteros para su operación a bordo de buques, cometido primordial de todas las marinas del mundo que actúan con ánimo de reducir la pérdida de aeronaves y tripulaciones.

Referencias

1. Lumsden, R. B. Ship Air-wake Measurement, Prediction, Modelling and Mitigation DSTL/TR06951. *Defence Science and Technology Laboratory UK.* **April, 2003.**
2. Fang, R. & Booij, P. J. A. Helicopter-Ship Qualification Testing. The Dutch Clearance Process. *National Aerospace Laboratory NLR.* Report no.: NLR-TP-**2006**-024.
3. Erm, L. P., A Preliminary Study of the Airwake Model Used in an Existing SH-60B/FFG-7 Helicopter/Ship Simulation Program. DSTO-TR-0015. *Aeronautical and Maritime Research Laboratory*. Australia **1994**.
4. White, F. Dimensional Analysis and Similarity. In *Fluid Mechanics*. Fourth Edition. McGraw-Hill Companies, Inc. **2002**, pp. 298-299.
5. Meyers, J. F., Generation of particles and seeding. NASA Langley Research Center, USA. Optical Velocity Measurements. Selected Special Topics from previous VKI Lecture series. *Von Karman Institute for Fluid Dynamics*. Belgium. **1994**.
6. Geyer, W. P., Long, K. & Carico, D. Helicopter/Ship Qualification. Part 2: American Clearance Process. *RTO AG-300* Vol. 22/SCI-038. RTO/NATO **2003**. ISBN 92-837-1093-2.

Automatización de los sistemas de amarre de los buques. Evolución futura

Villa Caro, Raúl [1,*]

[1] Inspección de buques del Arsenal de Ferrol (ICOFER) / Dr. Ingeniero Naval y Oceánico (Universidad de la Coruña) / Secretario EXPONAV

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: rvilcar@exponav.org

---

Abstract: Los sistemas de propulsión de los buques representan un papel importante en los mismos, pero cuando un buque ocupa su lugar de atraque en un puerto para llevar a cabo las operaciones de carga y descarga, su propulsión queda relegada a un segundo plano, y el barco queda sometido a las condiciones de viento y corriente del muelle en el que se encuentra. El amarre, junto al fondeo, es uno de los sistemas que menos ha evolucionado en los buques. Forma uno de los sistemas más arcaicos de la tecnología naval, pero a diferencia del fondeo, el amarre se debería prestar más a la evolución, ya que un buque no se mueve una vez que ha quedado amarrado. Las operaciones de amarre pueden tener consecuencias graves para el personal involucrado en ellas, y por ello se deben estudiar nuevos y revolucionarios sistemas de amarre, sin el uso de las tradicionales amarras, que puedan ayudar a reducir estos accidentes y a disminuir considerablemente los intervalos de tiempo de las operaciones de amarre, con el consecuente ahorro. Estos nuevos sistemas de unión al muelle estarán basados en sistemas de vacío, o en sistemas mixtos, de nuevos sistemas, combinados con los tradicionales.

Keywords: amarre; buque; automatización; accidente

---

1. Introducción

Durante la estancia del buque atracado, una parte más que importante de los gastos corresponderán a los denominados "Costes de Carga y Descarga (C/D)". Ese tiempo mínimo deseado para la C/D va a estar fijado por los movimientos que experimenten los buques atracados. Si se experimentan movimientos de buques demasiado grandes, las operaciones de manejo de la carga disminuirán su

velocidad o incluso cesarán, pudiéndose llegar a producir daños en los buques y las instalaciones de los puertos.

Los tiempos en puerto de los buques, es decir, sus estadías, han sido poco estudiados en los tiempos modernos. Prácticamente no existe ninguna publicación actual que haya analizado los tiempos que permanecen los buques en puerto. Una de las fuentes más fiables, aunque ya algo desfasada, es la representada en el siguiente cuadro en el que se pueden apreciar los valores típicos de viajes de distintos tipos de buques: [2]

Tipo de buque	Tamaño	Duración viaje (millas)	Escalas por viaje	% estancia en puerto
Bulkcarrier grande	110.000 GT	10000	2	23
Bulkcarrier pequeño	25.000 GT	11000	4	31
Ro-Ro	90 remolques	800	2	33
Portacontenedores	2300 TEU	12000	6	29
Costero	3000 GT	1400	2	45

Tabla 1. Tiempos de estancia en puerto.

(FUENTE: Buxton, Daggitt y King – CARGO ACCESS EQUIPMENT FOR A MERCHANT SHIP)

2. Sistema de amarre por vacío

Existen compañías especializadas en el diseño de amarre automatizado que están revolucionando los sistemas de amarre para buques civiles y militares. Estos sistemas de amarre han sido adoptados por importantes compañías portuarias, debido a su elevado tráfico, entre las que están incluidas algunas que operan en el Puerto de Dover (Reino Unido). En 1999 se instaló por primera vez un sistema llamado "IronSailor" en un buque de pasaje. Después de su puesta en marcha este sistema se ha utilizado de forma segura en 10.000 operaciones de amarre automático sin amarras. [3]

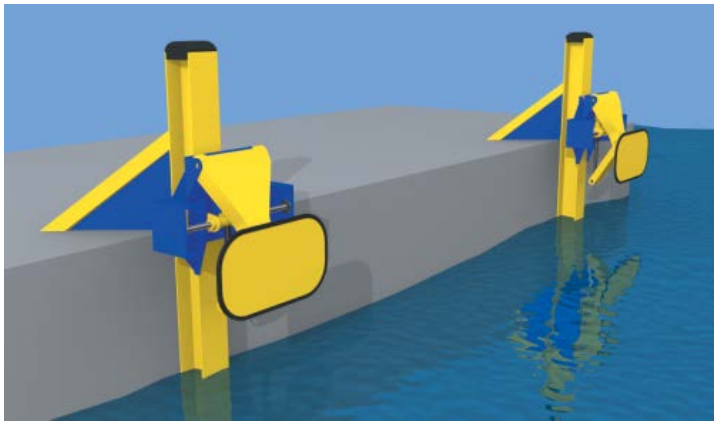


Figura 1. Dispositivos de amarre por vacío (Fuente: www.cavotec.es)

El sistema de amarre por vacío representa un salto importante en la técnica, desde el primer sistema desarrollado en el año 1999, ya que no exige instalaciones específicas en el barco y permite y permitiría adhesión directa al casco de la mayoría de los buques civiles y militares. El modelo, de cara al muelle, tiene la gran ventaja del almacenamiento compacto (retráctil), cuando no esté en uso. Esto permite al sistema el poder permanecer detrás de la línea de defensa para resguardarse del impacto, durante el atraque. Cuando se activa el sistema, la estructura de soporte de la ventosa se extiende hacia el exterior y la conexión de amarre por vacío se establece en unos pocos segundos. Este sistema está diseñado para atender a la mayoría de los buques y cuenta con varias características importantes que incluyen:

- Actuación en tres grados de libertad.
- Posicionamiento de Buques.
- Control mediante monitorización en tiempo real a través de redes informáticas y registro de los datos obtenidos.

La primera serie QuaySailor 40 se instaló en Picton (Nueva Zelanda) en 2002 y desde entonces se han realizado más de 40000 operaciones de amarres seguros.

Se podría decir que nos enfrentamos al desafío de un cambio en el antiguo, tradicional y aceptado sistema de amarre con estachas. Debido a la dinámica y a las cargas inherentes que afectan a los cuerpos grandes, como los barcos, que se mueven en un ámbito fluido, cualquier cambio que se quiera aplicar a esta práctica requerirá una innovación significativa para que los nuevos sistemas sean más rentables y más seguros que sus predecesores.

Automatizar el proceso de amarre representa un nuevo campo en la tecnología marítima. Se trata de un área muy complejo y multidisciplinario, relacionado con el diseño de nuevos productos, por lo que se debe realizar un análisis en profundidad de las condiciones del medio ambiente y las cargas, las formas del casco, los requisitos estructurales, las sociedades de clasificación, y las necesidades de los clientes.

Las terminales de contenedores se han convertido en un eslabón crucial en la actual economía global. A menudo son el centro logístico principal para una amplia región geográfica, que debe garantizar el intercambio fluido de bienes de consumo, materias primas y productos industriales. Las ganancias en eficiencia y productividad debidas a la mejora del interface “buque-tierra” son potencialmente significativas en la cadena logística y pueden tener un profundo impacto en el éxito comercial de los operadores portuarios. Por otro lado los buques portacontenedores son cada vez más grandes y en muchos puertos el tiempo de atraque de estos barcos puede exceder los 30 minutos. Con los nuevos sistemas, estos buques pueden estar amarrados en cuestión de segundos, lo que permitirá comenzar las operaciones de carga y descarga rápidamente.



Figura 2. Dispositivos de amarre por vacío para portacontenedores (Fuente: www.cavotec.es)

3. Resultados y Discusión

Es probable que en un futuro no muy próximo, los puertos empiecen a dotarse de los equipos necesarios para el amarre sin estachas. Hasta ese momento puede que se asienten los sistemas híbridos tipo “shoretension”, que son una situación intermedia, y utilizan los sistemas hidráulicos y las estachas.

Aunque en muelles previstos para tráfico de buques portacontenedores, por ejemplo, tarden más en asentarse estos sistemas, de cara a aquellos puertos que alberguen tráfico de buques de pasaje de línea regular, los dispositivos de “amarre por vacío” seguro que se asientan con mayor celeridad. Estos sistemas de amarre por vacío dan una flexibilidad uniforme a las líneas convencionales, manteniendo una tracción horizontal en el casco del buque. El empuje hacia el muelle es absorbido por unos amortiguadores pasivos o cilindros hidráulicos incorporados en el equipo que sujetan las ventosas en raíles verticales mientras permiten un ligero movimiento de proa a popa. Las ventosas sobrecargadas se deslizan a lo largo del casco y unos sensores que monitorizan el sistema avisan al personal del buque y de tierra ante situaciones no deseables.

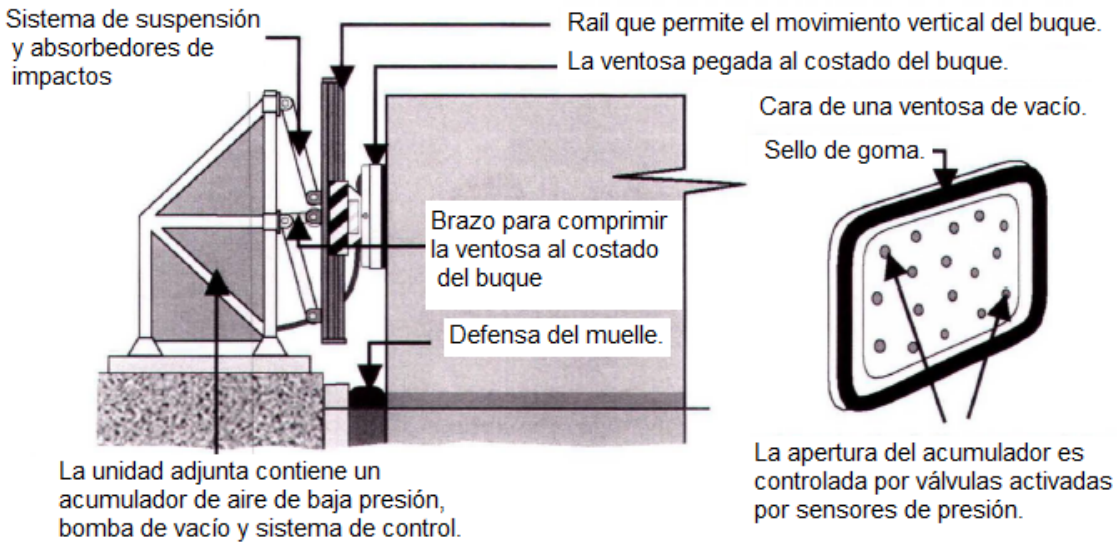


Figura 3. Dispositivos de amarre por vacío

Los sensores continuamente miden la carga en las ventosas mientras estas se encuentran sujetas al buque, por lo que el sistema puede ser monitorizado y operado en remoto, por radio, desde un ordenador con unidades de pantallas situado en el puente de mando y en la sala de control del puerto. El modo en el que las ventosas están montadas en la unidad permite normalmente trincar y afirmar los buques en puertos sujetos a gran oleaje. Sin embargo, el buque con los movimientos de marea y los traslados de carga puede hacer que sus ventosas se deslicen por los raíles verticales. Si las ventosas alcanzan la parte superior o inferior del raíl, el sistema desconecta automáticamente las ventosas, una a una, reposicionándolas arriba o abajo en el casco del buque. El montaje horizontal sobre el que están las ventosas permite un ligero movimiento de proa a popa y puede, en algunas configuraciones, ser usado para ajustar la posición del buque en el muelle. Las ventosas pueden inclinarse ligeramente en el plano vertical para permitir un movimiento de escora, y también pueden rotar en el plano horizontal para ajustarse a regiones del buque que no estén totalmente paralelas al muelle. [1]

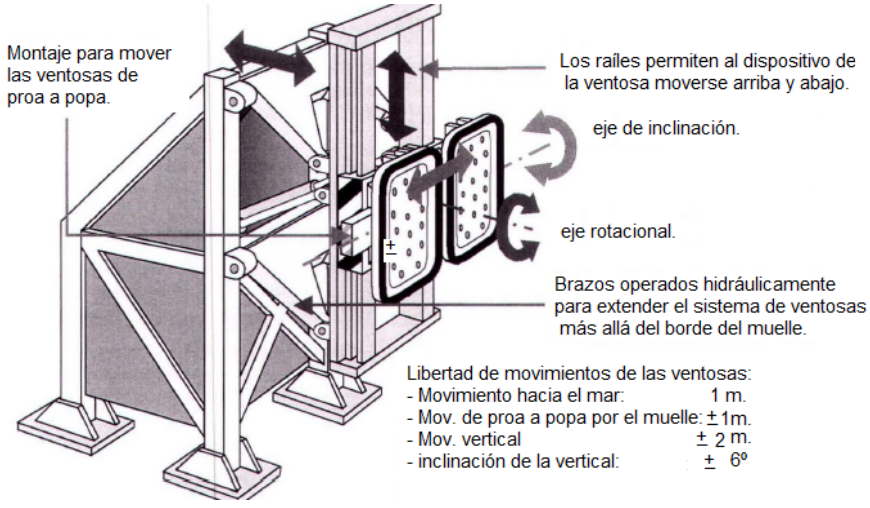


Figura 4. Dispositivos de amarre por vacío

Los remolcadores o las hélices de proa y popa de los propios buques, pueden ser usados para empujar el buque hacia el muelle, donde deben estar dispuestas al menos dos unidades separadas a lo largo del muelle. Los sellos de goma de las ventosas son entonces comprimidos contra el costado del buque por medio de cilindros hidráulicos mientras las válvulas entre el acumulador de baja presión y las ventosas se abren para producir la succión que asegure el buque a las ventosas. La aplicación del vacío a las ventosas lleva unos 15 segundos, que es mucho menos tiempo que el necesario para los amarres convencionales.

Los sellos de goma en las ventosas son muy rígidos, por lo que movimientos ligeros del buque respecto a las ventosas provocan grandes fuerzas de las mismas contra el casco. Por consiguiente, cualquier variación en la fuerza del viento sobre el buque se ve compensada por imperceptibles movimientos del buque contra las ventosas. Sin embargo, las ventosas se mueven con el barco mientras este es sometido a fuerzas alternativas producidas por las olas, aunque el movimiento resultante es muy reducido por el efecto amortiguador de los cilindros hidráulicos en el dispositivo articulado, que sujeta las ventosas y está fijado al muelle. El sistema aguantará al buque sin potencia dado que las ventosas que retienen sus sellos al buque no se soltarán sin previo aviso.

Los fabricantes pueden producir unidades que tienen un rango de capacidad de 20 a 80 toneladas.

Las ventosas de vacío deben sujetar partes del buque que:

1. Consistan en planchas casi planas cercanas a la parte paralela al muelle.
2. Estén libres de hielo y no tengan bultos significativos, tales como remaches u ojos de buey con portillos.
3. Sean suficientemente fuertes para soportar la fuerza de succión de las ventosas. Una diferencia de presión de unas 9 t/m2 doblaría las planchas a las que estén sujetas las ventosas, así como la compresión de los sellos de goma también doblaría las chapas traseras de las ventosas, con lo que cualquier distorsión debe estar entre los límites elásticos de la plancha del casco.

Sin embargo, la diferencia de presión creada por la succión de las ventosas puede ser reducida si la fuerza de succión pudiera producir deformaciones permanentes en el casco del buque con un escantillonado relativamente ligero.

4. Conclusiones

Los tiempos de estancia en puerto de los buques suponen un tanto por ciento muy importante de la vida operativa de los mismos, por lo que se debe estudiar la mejora los sistema de amarre que se utilizan en puerto, apostando por los sistemas de amarre por vacío.

Aunque los costes de instalación y mantenimiento de estos sistemas serán mucho mayores que los de los norays y bolardos a los que el sistema reemplaza, los puertos deberían ser capaces de recuperar esta inversión con la obtención de mayor efectividad en el uso de los muelles por medio de una mayor

rotación y el menor espacio entre buques a lo largo del muelle que este sistema permite. También se producirán menos paradas en el trabajo de carga y descarga debido a movimientos excesivos en puertos expuestos a oleaje. Sin embargo, como cualquier otro sistema de aseguramiento del buque, la capacidad del sistema tiene sus límites y los usuarios deben seguir las recomendaciones e instrucciones de los fabricantes.

Las ventajas que podrá aportar este nuevo sistema de amarre serán, entre otras:

- Reducción del número de accidentes acaecidos en las maniobras por ruptura de las estachas, lo que conlleva intrínsecamente una reducción de los accidentes del personal involucrado en las citadas maniobras, lo que a su vez conlleva a un ahorro en coste (reducción del seguro, de gastos médicos, etc.)
- Incremento de la velocidad de las operaciones de atraque y desatraque, lo que redunda en ahorro de tiempos en las operaciones de carga y descarga.
- Mejora de la maniobrabilidad del buque mientras se realiza el atraque.
- Versatilidad en lo referente a la instalación en muelles.
- Posibilidad de control de las tensiones existentes en las estachas, con funciones de alarma y aviso.
- Estos sistemas ya empiezan a estar certificados por las Sociedades de Clasificación.
- Reducción del tiempo necesario de uso de remolcadores y prácticos.
- Desde el punto de vista del medio ambiente, se obtiene un amarre rápido, lo que implica menor tiempo de funcionamiento de la propulsión del buque y de los remolcadores, lo que significa menores emisiones contaminantes en los puertos.

Referencias

1. Oil Companies International Marine Forum. (2008). *Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition*. Great Britain: OCIMF. ISBN: 978-1-905331-32-1
2. Villa Caro, R., Carral, L., & Fraguela, J. (2011). *Costes portuarios de un buque frigorífico dotado de sistemas propios de transferencia de la carga*. XXII Congreso Panamericano de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo e Ingeniería (págs. 11-12). Buenos Aires: IPIN. ISBN: 978-987-27394-0-9
3. Villa Caro, R. (Abril de 2014). *Revolución en los sistemas de amarre de los buques*. Revista General de Marina, 266(4), 475-490. ISSN: 0034-9569

Centro de Integración de Sistemas en Tierra para las F-110 (CIST). El mayor reto en la integración de Sistemas Navales en España.

Espinal Durán, Francisco José

Navantia S. A. Email: fjespinal@navantia.es

Abstract: El CIST (Centro de Integración de Sistemas en Tierra) será un centro (Situado en San Fernando – Cádiz) dotado de una réplica del Mástil Integrado de la F-110 con un conjunto de sensores y Sistema de Combate SCOMBA (Sistema de Combate para Buques de la Armada), y estará orientado a pruebas de diseño, integración e ingeniería. El CIST servirá como referencia para el desarrollo e integración del Sistema de Combate de las futuras fragatas F-110 para la Armada Española, y apoyará tras la construcción el posterior ciclo de vida de los buques. El CIST es uno de los Programas tecnológicos que se espera firmar en el 2015 como factor fundamental de reducción de riegos del Programa de construcción. El CIST será desarrollado por Navantia S. A.

Keywords: F-110, fragata, Centro de Integración de Sistemas en Tierra, CIST, Sistema de Combate, Sensores, SCOMBA, Navantia, Industria de defensa.

1. Introducción

El Ministerio de Defensa español tiene prevista la construcción de cinco fragatas F-110 como reemplazo de las fragatas FFG (Guided Missile Frigate) tipo Santa María en los primeros años de la década de 2020. El documento REM (Requisitos de Estado Mayor), fue finalizado durante el 2014, así como la Fase de Viabilidad. En estos momentos se trabaja en la Fase de Definición y se espera poder contratar la construcción de los buques en 2017.

Aparte de la necesidad militar de las fragatas F-110 el Programa de adquisición de las mismas posee dos componentes industriales que se podrían catalogar de vitales para un amplio sector de la industria española militar naval.

La primera componente viene determinada por la carga de trabajo derivada del diseño y construcción/fabricación, tanto de la plataforma como de sus diferentes Sistemas. Esta primera componente, que se podría denominar de desarrollo y producción, se puede valorar en función de horas de trabajo, o empleos, para la industria española.

Mientras que la primera componente industrial resulta evidente y fácilmente cuantificable en horas o/y en facturación, la segunda componente industrial es menos evidente pero igualmente vital, y se podría definir como el valor del Programa F-110 como facilitador o capacitador tecnológico y posicionador comercial de la Industria de Defensa Naval Española, sobre todo con vistas a la exportación pero sin olvidar la aplicabilidad de dicha capacitación a futuros Programas navales nacionales de nueva construcción o modernizaciones.

Las fragatas F-110 serán escoltas polivalentes, diseñadas para escenarios de alta intensidad, con una importante capacidad de combate en todas las áreas principales de la guerra, necesaria para desarrollar sus cometidos, especialmente en los perfiles de protección de la fuerza y en el de proyección del poder naval; tanto en el ámbito conjunto como en el combinado y frente a una amenaza convencional y asimétrica cada vez más compleja. Las F-110 también serán muy versátiles para poder desempeñar sus cometidos relacionados con los perfiles de seguridad marítima y de apoyo a autoridades civiles, normalmente en escenarios de baja intensidad. Serán capaces de operar apoyando al BAM o complementando a la F-100 o buques similares, y por ello su ámbito de empleo operativo será muy amplio.

Para que el futuro buque disponga de tecnologías que den respuesta a este concepto es necesario, por una parte, dar continuidad a los trabajos realizados en el marco de ciertos programas de I+D desarrollados en los últimos años por la industria nacional, como el Mástil/Superestructura Integrada (MASTIN) y diversos Programas SCOMBA (Sistema de Combate de Buques de la Armada) y, por otra, acometer proyectos adicionales derivados de los objetivos de reducción de costes de operación y consolidación de sistemas nacionales. De esta manera aparecen los denominados Programas Tecnológicos denominados asociados a las F-110 que se centran en tres áreas:

- Estructura del mástil/superestructura integrada: determinación y pruebas de los materiales a emplear en el mástil / superestructura integrada, opciones de integración física de sensores y

otros elementos, estudios de compatibilidad electromagnética, estudios de diseño para reducción de firma electromagnética, infrarroja, radar, fabricación de un demostrador, etc.

- Elementos del mástil/superestructura integrada: estudios y trabajos encaminados al diseño y desarrollo de sistemas basados en antenas planas (radares, guerra electrónica, y datos tácticos en las bandas tácticas y satélite, IFF – Identification Friend or Foe) y sistemas de detección y seguimiento electro-óptico multiespectro.
- Sistema de Combate de la Armada (SCOMBA): evolución de la arquitectura del SCOMBA para adaptarse a las misiones de la F-110 y para integrar los sensores del mástil / superestructura integrada, así como para integrar los sistemas de armas que monte el buque, UxVs (Unmanned Vehicles) y muy especialmente el Sistema antiaéreo (AAW – Anti Air Warfare) por su mayor complejidad.

Durante los años 2014 y 2015 se desarrollaron las tres áreas tecnológicas anteriores en una serie de Posibles Programas de I+D (Investigación + Desarrollo), de manera que finalmente se concretaron dichos Programas en la lista siguiente:

1. **Evolución de SCOMBA**
2. **Demostrador CIST**
3. **Radar de Barrido Electrónico de Banda S**
4. **ESM (Electronic Support Measures) Banda Radar**
5. **ECM (Electronic Counter Measures) Banda Radar, apuntamiento electrónico**
6. **Guerra Electrónica (EW) de comunicaciones**
7. **IFF (Identification Friend or Foe - Identificador Amigo/Enemigo) y antena circular**
8. **Amplificador de Alta Potencia (HPA – High Power Amplifier) para Link 16**
9. **Radar de Banda X, arrays planos**
10. Sistema de control y actuación de misiles
11. Sistema electroóptico IRST (Infrared Search and Track)
12. Definición y diseño de la plataforma F-110

Para el desarrollo del grupo formado por los nueve primeros programas de la lista (marcados en negrita), Navantia e Indra tienen la intención de constituir una UTE (Unión Temporal de empresas), que se ha denominado PROTEC 110.

El concepto de los PROTEC 110 es el siguiente:

- Durante los años 2016 a 2019 se desarrollarán y fabricarán una serie de sensores (Radar, Guerra electrónica, comunicaciones tácticas) prototipo de ingeniería.

- También durante dicho período se desarrollarán nuevas funcionalidades y se dotará de nueva infraestructura al Sistema de Combate SCOMBA.
- Durante el 2020 los prototipos de ingeniería y nuevos desarrollos se instalarán en el CIST, donde serán sometidos a integración y pruebas finales antes de su traslado e instalación a bordo de la quinta fragata F-110.

2. Descripción del CIST

El Demostrador CIST surge de la necesidad de mitigar los riesgos derivados de la realización de un Mástil Integrado y de la integración en la F-110 de elementos de I+D y por tanto integra una serie de actividades de investigación y desarrollo tecnológico orientadas a la definición, diseño y construcción del MI (Mástil Integrado) F-110 y a la validación, integración y pruebas en un entorno marino de los sensores procedentes de otros PROTEC 110.

El Demostrador CIST permitirá:

- Validar la integración física de los sensores en el Mástil Integrado.
- Probar y verificar en un entorno marítimo los sensores desarrollados dentro de los PROTEC 110.
- Realizar pruebas de Compatibilidad Electromagnética.
- Realizar pruebas de integración de dichos sensores con SCOMBA F110.
- Probar el comportamiento del sistema al completo en un ambiente marino.
- Complementar al LBTS (Land Based Test Site) de SCOMBA F-110 con pruebas de sensores y blancos reales.

El Demostrador CIST reducirá el riesgo de:

- El proceso de integración de los sensores procedentes de PROTEC 110 en el Mástil Integrado, permitiendo la ejecución de pruebas de integración y prestaciones del Software/Hardware de los elementos críticos tanto de los segmentos AAW/ASuW (Anti Air Warfare/Anti Surface Warfare) del Sistema de Combate como del Segmento EW.

  En este sentido, se realizarán en el CIST las Pruebas CET (CIST Evaluation Test) de la suite de Sensores de PROTEC del Mástil Integrado.

- El proceso de integración de sensores con SCOMBA F-110.
- El posterior proceso de instalación, integración y pruebas en Astillero, ya que las lecciones aprendidas serán trasladadas a los protocolos de SI&T (Ship Integration and Test) en los buques.

Adicionalmente, el Demostrador CIST servirá de posterior apoyo a:

- La validación y desarrollo de protocolos de SI&T.
- Las pruebas de calificación operativa.
- Validación y certificación de actualizaciones software de los sensores instalados y de SCOMBA como paso previo a su instalación a bordo.
- Potencialmente centro de adiestramiento, sobre todo para la primera dotación

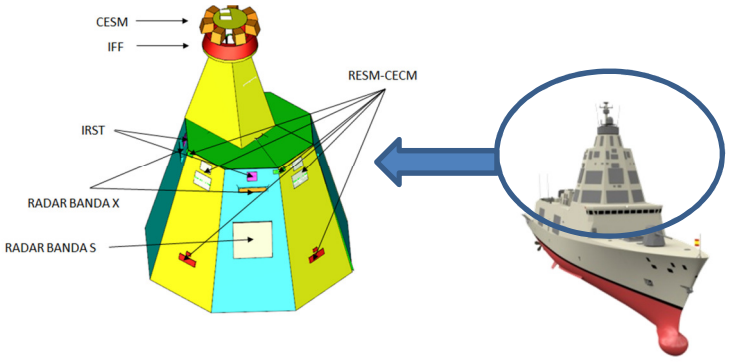


Figura 1. Visión general del CIST y fragata F-110



Figura 2. Futuro emplazamiento del CIST, entre Cádiz y San Fernando (Polígono militar Torregorda)

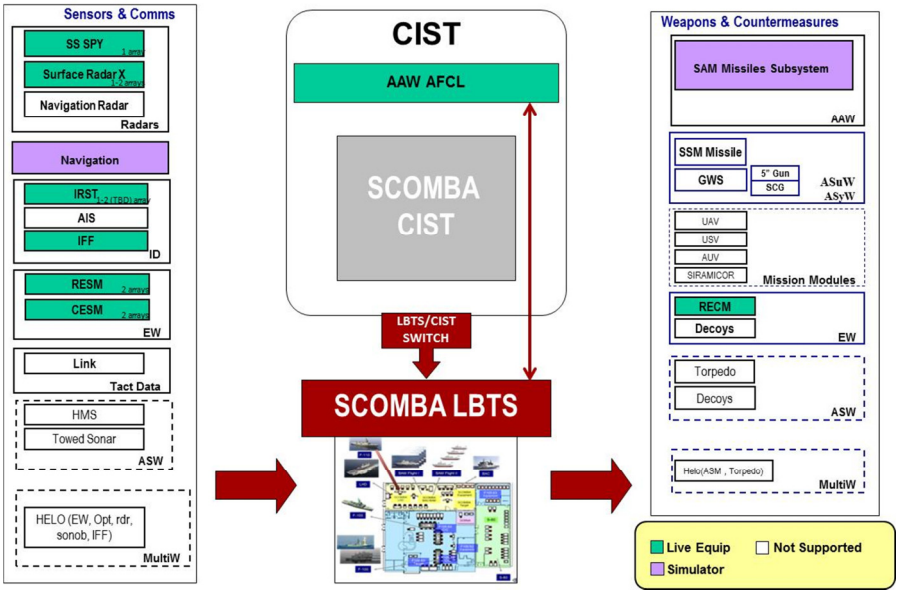


Figura 3 Arquitectura del CIST en configuración remota

3. Importancia de los Programas tecnológicos y del CIST en lo relativo a la capacitación tecnológica de la industria nacional

El mercado mundial de Sistemas Navales se caracteriza por una serie de condiciones que las empresas productoras deben satisfacer necesariamente, de manera que el grado de cumplimiento de dichas condiciones es el que va a determinar en gran medida el éxito de cada empresa. Dichas condiciones son:

- **Disponibilidad de Productos.** El mercado de Sistemas navales es, en numerosas ocasiones, paradójico de manera que suele demandar Sistemas de alta tecnología "state of the art" pero a su vez sistemas que estén ya desarrollados y operativos, por tanto sistemas que estarían en el punto más alto de la escala de TRL (Technology Readiness Levels, siendo el TRL 9 el más alto), es decir, Sistemas que hayan sido ya probados y validados en condiciones operativas. Por ejemplo se suele utilizar con frecuencia el concepto de MOTS (Military Off the Shelf) para referirse a este tipo de sistemas. La razón fundamental de esa condición del mercado es evitar los riesgos inherentes a cualquier desarrollo. Por tanto una empresa dispondrá de más posibilidades de éxito en tanto en cuanto disponga de un mayor número de Productos ya cualificados. El Programa F-110, en cuyo éxito colaborará de forma esencial el Programa CIST, permitirá alcanzar el TRL 9 para todos sus Sistemas.
- **Productos operativos en la Marina del país de la empresa.** Además de la necesidad de disponer de productos operativos es muy importante que dichos productos se encuentren en servicio en buques de la Marina del país original de la empresa. Es muy frecuente que los países con Marinas de mayor nivel sean a su vez países con un tejido industrial de defensa

naval importante, de manera que el que una Marina de prestigio posea un Sistema es una etiqueta de garantía de la calidad del mismo y su valor militar, y viceversa, que la propia Marina del país de origen de la empresa no utilice un sistema genera desconfianza de manera inmediata en el potencial comprador e imposibilita de facto la exportabilidad del mismo. De manera que no es sólo necesario que la industria española disponga de producto, el producto debe estar en servicio en la Armada Española para poder ser comercializado fuera de España. Esta imposición del mercado se satisfacería en la industria española gracias al Programa F-110 y al desarrollo de los Programas Tecnológicos asociados.

- **Producto tecnológicamente avanzado.** Cada vez más las necesidades militares requieren la utilización de la más alta tecnología en un número de campos diferentes, Sensores, Mando y Control y Comunicaciones y Armas. A su vez la rápida evolución de la tecnología y de las propias necesidades hace necesario que la tecnología esté integrada de una forma flexible y escalable, utilizando arquitecturas abiertas en la mayoría de los casos. El Programa F-110 impondrá requisitos, y dotaría de recursos, a la industria española para el desarrollo de tecnología en los próximos años.
- **Cumplimiento de requisitos.** Esta condición está ligada a varias de las anteriores, en definitiva se trata de que los productos desarrollados tengan un valor militar real. Esto es conseguido únicamente si la definición, desarrollo y pruebas ha sido realizado teniendo a una Marina de primer nivel como la Armada como el stakeholder principal, este sería el caso que se daría en el Programa F-110.
- **Apoyo institucional.** Tanto el volumen de negocio como las connotaciones estratégicas y políticas de las operaciones comerciales en la industria de defensa hacen cada vez más necesario un importante apoyo institucional en todas las operaciones comerciales internacionales. Este apoyo institucional sólo se pueden conseguir si el sistema se encuentra en servicio en la propia Marina y si el producto en cuestión posee un alto porcentaje de nacionalización.
- **Factor de cohesión entre las industrias españolas de defensa.** La industria defensa europea se caracteriza, en el sector naval, por la asociación de empresas con vistas a conseguir una organización industrial vertical, es decir, un grupo de empresas normalmente con relación accionarial que son capaces de ofrecer una solución completa de Buque y la mayoría de sus Sistemas. En el caso de España la F-110 serviría como potenciador de las relaciones entre las empresas de defensa, en particular entre Navantia e Indra, cuyas capacidades y productos son complementarios. Estrechar la relación entre ambas empresas mejoraría considerablemente la posición en el mercado de soluciones españolas para nuevas construcciones y modernizaciones, eliminando dependencias de terceros que resultan un lastre ya sea por limitaciones de exportación o de estrategia comercial de la competencia. Por último el posicionamiento de la industria española en el mercado en estos momentos es, si cabe, más importante de cara a la reestructuración de la industria europea en el marco de la política de defensa y seguridad común.
- **Precio y plazo competitivo.** En un escenario muy generalizado de crisis económica a nivel mundial, pero a vez de amenazas cambiantes y en ocasiones emergentes, la competencia entre empresas de defensa naval es realmente intensa, de manera que los precios y los plazos deben

adecuarse a dicho escenario. El desarrollo y capacitación de la industria española lograda gracias del Programa F-110 permitiría acortar los plazos y adaptarse a los precios que requiere el mercado.

- **Mantenimiento de masa crítica de ingeniería de desarrollo**. La capacidad tecnológica de una empresa viene determinada por la disponibilidad de recursos humanos y materiales en número y con la cualificación necesaria para afrontar los retos de investigación, desarrollo y fabricación de sus productos. La capacidad tecnológica necesaria en la industria de defensa naval se caracteriza, sobre todo en aquellos aspectos más relacionados a las primeras fases de desarrollo de un producto y su gestión, por necesitar de una alta cualificación y experiencia, además la necesaria y exigente metodología de Ingeniería de Sistemas actual hace necesario disponer de grupos multidisciplinares y muy especializados sobre todo en el área de Sistemas de Armas complejos de última generación. Lo anterior da como consecuencia inmediata que la capacidad tecnológica no es escalable, sino que es necesario mantener una masa crítica de conocimiento y experiencia que, complementada con recursos adicionales según dicte el mercado, pueda servir de núcleo al menos para el mantenimiento de la capacidad crítica de la organización. El desarrollo de la fragata F-110 y sus Programas tecnológicos asociados será el vehículo fundamental para el mantenimiento o incluso potenciación de los recursos humanos de la industria naval de defensa de al menos el próximo decenio.

Los PROTEC 110 objeto de este informe facilitarán de forma decisiva el cumplimiento por parte de Navantia e Indra de las condiciones descritas.

4. Conclusiones

El desarrollo de los PROTEC 110, que convergen en el Programa "Demostrador CIST" objeto de este artículo, constituirá la primera vez que en España se aborda el problema de desarrollo e integración de sensores mediante la construcción en tierra de la infraestructura necesaria para la instalación y prueba de los mismos en un entorno de costa y su integración con el Mando y Control del Sistema de Combate. Estas actividades son necesarias cuando se aborda un Programa tecnológicamente muy avanzado y de alto contenido nacional como es la F-110, pero también aportará la experiencia, producto y metodología esenciales para poder abordar soluciones similares o escaladas para buques de exportación con Sistemas españoles.

Referencias

1. Estado Mayor de la Armada – Ministerio de Defensa de España; REM (Requisitos de Estado Mayor) de las fragatas F-110. 2014.

Ensayos hidrodinámicos con propulsión POD: Ejecución y extrapolación para predecir la velocidad del buque

García Gómez, Amadeo [1], Prieto Estévez, Mª Eugenia[2], Gutiérrez Revilla, César[3], Ponce Gómez, Juan Manuel[4].

[1] Dr. Ingeniero Naval. Jefe Área de Proyectos (*): amadeo@cehipar.es

[2] Ingeniero Naval. Jefe Servicio de Ensayos (*): meprieto@cehipar.es

[3] Ingeniero de Minas. Jefe Servicio de CFD (*): cesar.gutierrez@cehipar.es

[4] Dr. Ingeniero Naval. Jefe Unidad Experimentación (*): juanponce@cehipar.es

(*) INTA – CEHIPAR

Resumen:

Los ensayos con modelos propulsados por POD se prevé que experimenten una notable demanda en los próximos años, dadas las ventajas que este tipo de propulsión presenta para una amplia gama de buques, tanto civiles como militares.

El método de ensayo habrá de ser el adecuado para garantizar la fiabilidad de los datos registrados y su extrapolación a escala real, deberá tener la coherencia teórica necesaria para asegurar la validez de las predicciones para el buque real.

Este trabajo trata del enfoque dado en el CEHIPAR, para prestar una atención adecuada a la demanda de trabajo en este campo del conocimiento hidrodinámico.

Se exponen los procedimientos de ensayo para Aguas Libres y Autopropulsión y se analizan distintas alternativas de extrapolación de resultados.

A día de hoy este es un tema abierto por parte de la comunidad internacional, que en la literatura técnica presenta distintas propuestas pero que, no obstante haber creado un comité específico en este tema, la propia ITTC no ha llegado a conclusiones definitivas.

Palabras clave: POD, Ensayos, Extrapolación, Experimentación, CFD

1. Introducción

La utilización de POD en la propulsión de buques está experimentado un notorio desarrollo. Esta tecnología no sólo tiene aplicación como sistema propulsivo de buques por si solo sino también en combinación con otros sistemas propulsivos. El actual Buque de Proyección Estratégica de la Armada española, Juan Carlos I, ya fue en su momento ensayado por el CEHIPAR, primera ocasión de enfrentase a una propulsión mediante dos POD, de 11MW cada uno, para alcanzar una velocidad superior a los 21 nudos en operaciones aéreas. Posteriormente se han llevado a cabo ensayos comerciales para cruceros, de 75.000 t de desplazamiento, con 2x20 MW y velocidades en torno a los 23 nudos, así como para prototipos de buques de suministro y salvamento.

En el año 2013 se concluyó el programa de investigación TRIPOD realizado dentro del 7º Programa Marco de la UE llevado a cabo por empresas españolas, danesas y finlandesas; en el

que se investigó la utilización de la propulsión CRPP (Contra-Rotating Poded Propeller), siendo el CEHIPAR responsable de la experimentación.

La experiencia acumulada en estos años y la lógica preocupación de utilizar el mejor procedimiento posible en la experimentación hidrodinámica obligan establecer el procedimiento más adecuado para obtener resultados con la máxima fiabilidad.

Este es un tema abierto por parte de la comunidad internacional, la propia ITTC (International Towing Tank Conference) no ha llegado a conclusiones definitivas, no obstante haber creado comités específicos para este tema, debido a la escasez de datos de buques reales

Se utilizará la notación con subíndice M para valores del modelo y con subíndice S para valores del buque real.

2. Ensayos

Para poder predecir la velocidad de un buque, en base a resultados de ensayos llevados a cabo con modelos a escala, utilizando un procedimiento de extrapolación tipo 3D, como es por ejemplo el procedimiento ITTC'78 desarrollado para buques con propulsión convencional, es preciso disponer de los resultados de remolque, propulsor aislado y autopropulsión.

Dado que el cuerpo del POD tiene una entidad importante, tanto por dimensiones geométricas como por desplazamiento y superficie mojada y que está sometido al flujo de la hélice (principalmente en el caso de POD de tracción, que será el objeto de este trabajo) no debe de ser considerado un apéndice del buque sino que se considera el conjunto cuerpo del POD-hélice como la unidad propulsora del buque.

De acuerdo con lo dicho en el ensayo de remolque de la carena podrán estar presentes todo tipo de apéndices como quillas de balance, altas, orificios, etc. pero no el cuerpo del POD. Siempre que la presencia de apéndices sea significativa, para evaluar correctamente el incremento de resistencia debida a los mismos será preciso realizar también ensayos de remolque con la carena desnuda.

El ensayo de propulsor aislado se realizará con el conjunto hélice-cuerpo del POD. Evidentemente el comportamiento de la hélice en presencia del POD no es igual que la el de la hélice sola y por otra parte el cuerpo del POD presenta una resistencia añadida que depende de su geometría y del flujo inducido sobre él por la hélice, lo que tiene una influencia clara en el rendimiento del POD como unidad propulsora.

En el ensayo de autopropulsión se obtendrán los valores de par, empuje y revoluciones de cada uno de los PODs presentes en el ensayo. Teniendo en cuenta que en este caso, al igual que en el ensayo de propulsor aislado, también hay una resistencia del cuerpo del POD y por tanto se pueden definir dos empujes: el propio de la hélice y el de la unidad POD.

3. Extrapolación

3.1. Extrapolación del ensayo de remolque: Se realizará de acuerdo con el procedimiento de extrapolación ITTC'78 [1] sin más cuidado que determinar el factor de forma k_{AP} para la carena con apéndices en base a identificar la resistencia por formación de olas de la carena con y sin apéndices para números de Froude menores de 0.4. De donde resulta:

$$\Delta C_{TS} = \Delta C_{TM} \cdot \frac{C_{FS}}{C_{FM}} \quad \Rightarrow \quad k_{AP} - k_{FD} + {}^{\Delta C_{TS}}/_{\Delta C_{TM}}$$

3.2. Extrapolación del ensayo de propulsor aislado: Este ensayo se lleva a cabo realizando medidas a distintas velocidades ***VM*** y con revoluciones constantes ***NM*** y se registran las medidas del empuje de la hélice ***TMH***, del par absorbido por la hélice ***QM*** y de la resistencia de la carcasa del POD, ***TMPOD***.

El empuje neto de la unidad propulsiva será por tanto ***TMUNIT = TMH – TMPOD***.

Los valores de **TMPOD** pueden tomarse directamente del ensayo y realizar un fairing con ellos o bien utilizarse para determinar un factor de forma del POD mediante la expresión:

$$C_{TMPOD} = \frac{T_{MPOD}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_M \cdot S_{MPOD} \cdot V_{MPOD}^2} = (1 + k_{POD}) \cdot C_{FMPOD}$$

La velocidad axial del flujo acelerado por la hélice sobre la carcasa del POD se puede determinar mediante, la expresión propuesta en la referencia [2]:

$$V_{MPOD} = \left(a \cdot (N_M \cdot H_M)^2 + (1 - a) \cdot V_M^2\right)^{0.5}$$

Con *a* = 0.8 para POD's tractores y *a* = 0.25 para POD's empujadores.

La extrapolación a plena escala se realizará como para un propulsor convencional aplicando los valores de ΔK_T y ΔK_Q propuestos por la ITTC.

El valor de *CTMPOD* se extrapolará a plena escala mediante la expresión

$$C_{TSPOD} = C_{TMPOD} \cdot \frac{C_{FSPOD}}{C_{FMPOD}}$$

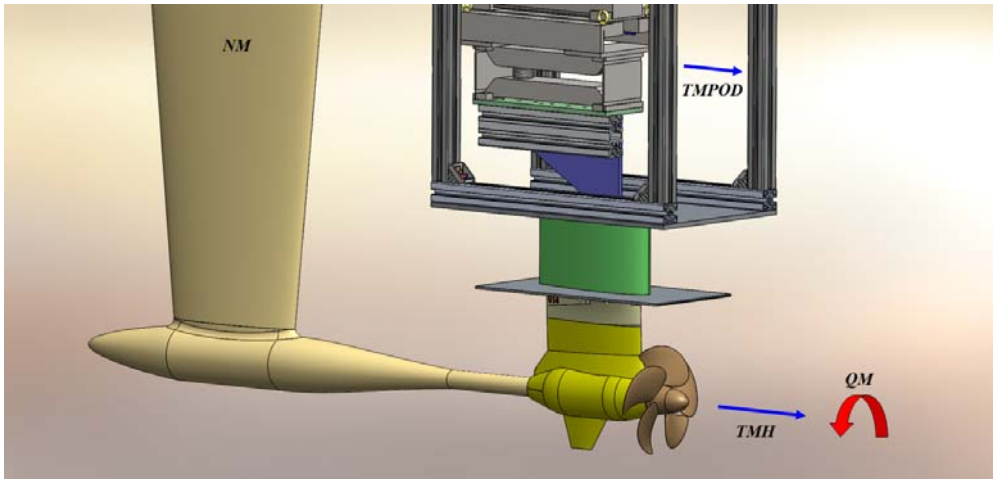


Fig. 1.- Montaje del POD en el ensayo de propulsor aislado

3.3. Extrapolación del ensayo de autopropulsión: En el ensayo de autopropulsión se registran los valores de ***VM, NM, THM, QM y TUNITM***.

Para cada velocidad se aplican tres valores distintos de la deducción de fricción *FD* de modo que abarquillen los valores de *FD* previamente calculados de acuerdo con la expresión:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_M \cdot V_M^2 \cdot S_{MSAP} \cdot [(1 + k) \cdot (C_{FM} - C_{FS}) - \Delta C_F - C_{AA}] \quad + \left(1 - \frac{C_{FS}}{C_{FM}}\right) \cdot (R_{TMC}$$

para la gama de velocidades V_M que se desea ensayar. C_{FS} y C_{FM} son los coeficientes de fricción calculados para la carena, con la línea básica de correlación ITTC'57 y ***k*** es el factor de forma de la carena.

El valor de R_{TMCAP} no incluirá la resistencia del cuerpo del POD como se ha indicado anteriormente.

La extrapolación se realizará utilizando el procedimiento ITTC'78 determinando para ello el coeficiente de succión mediante:

$$t = \frac{\Sigma T_{UNITM} + F_D - R_{TMCAP}}{\Sigma T_{UNITM}}$$

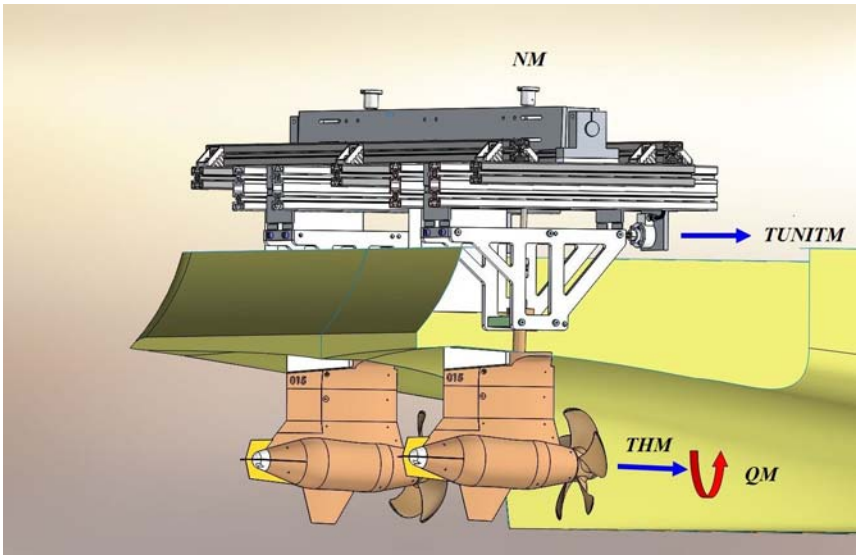


Fig. 2.- Disposición de POD's en el ensayo de autopropulsión

4. Caso práctico

4.1 Comparación del valor de propulsor aislado ensayado y calculado mediante CFD

También se han realizado cálculos de CFD con el programa CFX de Ansys, para determinar los valores de par y empuje para distintos grados de avance en propulsor aislado.

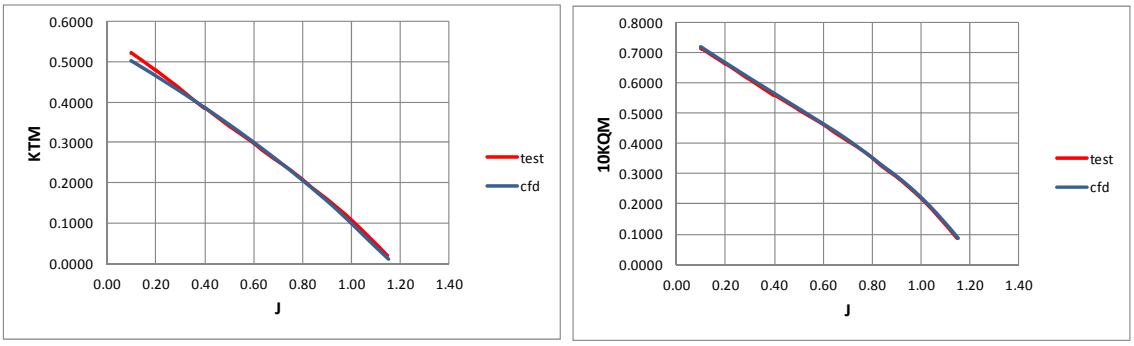


Fig 3.- Propulsor aislado medido y calculado con CFD

Comparando los valores de K_T y K_Q calculados mediante CFD y medidos en el ensayo, se puede determinar la precisión del cálculo realizado. En la figura 3 se presentan ambos resultados

En la siguiente figura se muestran las distribuciones de presiones sobre hélice y cuerpo del POD, obtenida en el cálculo de CFD.

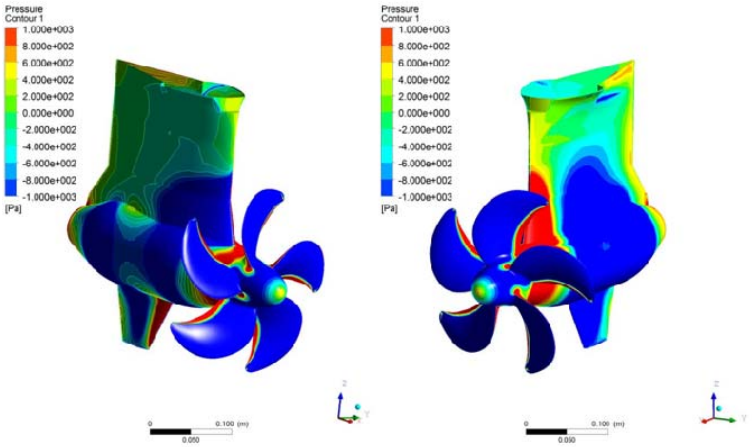


Fig 4.- Distribución de presiones calculada con CFD

De el ensayo de propulsor aislado del conjunto hélice-POD se obtiene el valor de $1+k_{POD}$ = 2.735 que coincide prácticamente con el de $1+k_{POD}$ = 2.800 obtenido en ensayos llevados a cabo, para el mismo buque, en otro canal de experimentación.

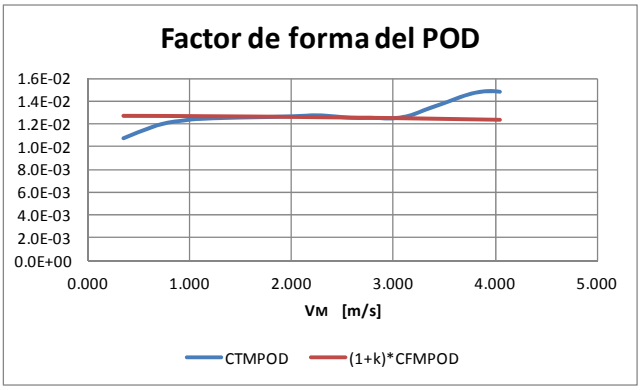


Fig 5.- Aproximación entre valores medidos y calculados

En la figura 5 se aprecia como para valores de V_M entre 1.0 y 3.0 m/s, es decir, en la zona de velocidades significativas para el ensayo de autopropulsión, el valor de T_{MPOD} determinado mediante k_{POD} se ajusta perfectamente a los valores experimentales.

4.2. Influencia del número de Reynolds del ensayo de P.A. en el cálculo de $1+k_{POD}$: Se ha estudiado la influencia de las rps a las que se realiza el ensayo de propulsor aislado y en consecuencia del número de Reynolds, en el cálculo del factor de forma del POD.

La variación de T_{MPOD} con la velocidad en el ensayo de propulsor aislado para el caso estudiado, se muestra en la figura 6

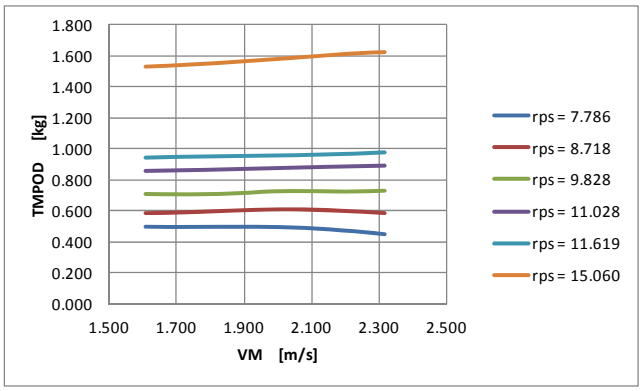


Fig 6.- Variación del DRAG del POD al variar la VM para distintas rps del ensayo de P.A.

Realizando para cada caso, el cálculo del $1+k_{POD}$ se obtiene el gráfico de la figura 7

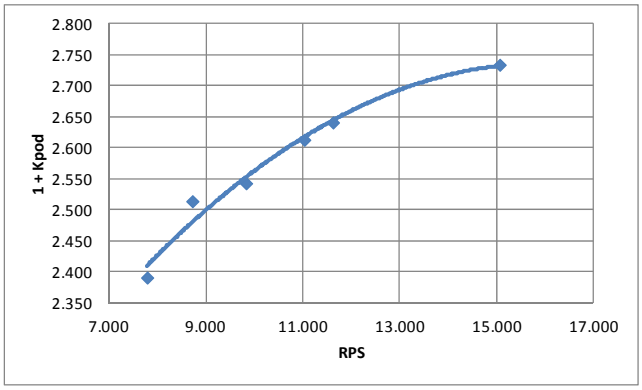


Fig 7.- Variación $1+k_{POD}$ al variar las rps del ensayo de P.A.

4.3. Resultados de autopropulsión: Se han realizado tres extrapolaciones. La primera tomando el empuje del POD en su conjunto, esto es, T_{UNITM} y considerando el valor de

$$T_{MPOD} = T_{HM} - T_{UNITM}$$ obtenido experimentalmente.

La segunda igual que en la anterior, con T_{UNITM} pero utilizando $T_{MPOD} = (1+k_{POD}) \cdot C_{FMPOD}$ con el valor de k_{POD} determinado en el ensayo de propulsor aislado.

La tercera utilizando los valores de T_{HM} y con el valor de T_{MPOD} calculado mediante el factor de forma de k_{POD}.

Para el valor de MCR = 40.000 CV las predicciones obtenidas en cada extrapolación, son las siguientes:

METODO	VELOCIDAD	RPM
	nudos	rad/s
CON TUNIT Y DRAG MEDIDO	22.78	131.3
CON TUNIT YDRAG CALCULADO	22.80	131.4
CON TH Y DRAG CALCULADO	22.96	131.7

Tabla 1.- Predicción de velocidad y RPM para MCR

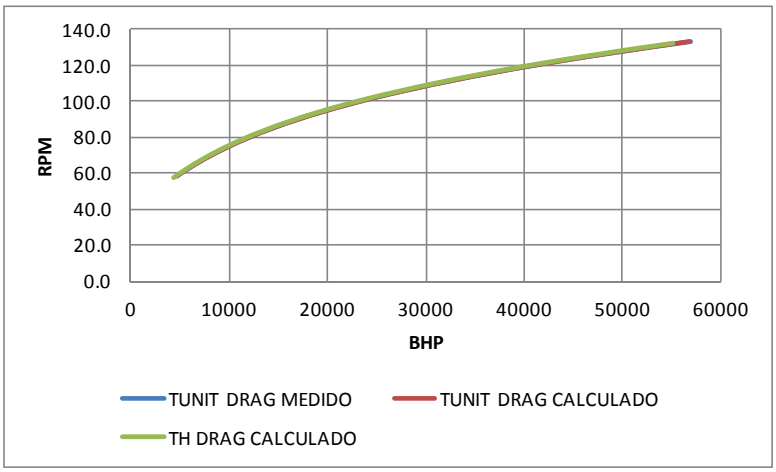


Fig 8.- Ajuste del propulsor al variar el método de extrapolación

5. Análisis de Resultados

En las siguientes figuras se muestra la variación que, al aplicar uno u otro método, experimentan los valores de los coeficientes de succión y de estela, así como los rendimientos propulsivos, de carena, rotativo relativo y del propulsor en aguas libres.

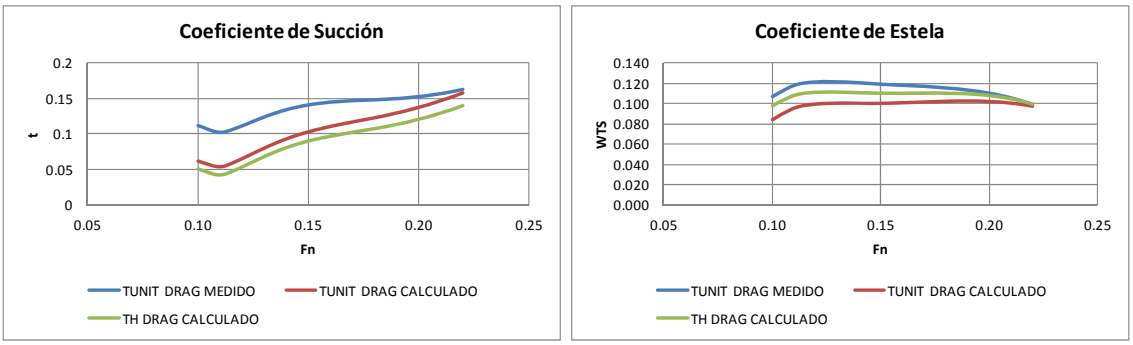


Fig 9.- Gráficos comparativos: Coeficientes de estela y succión para $0.1 \leq Fn \leq 0.22$

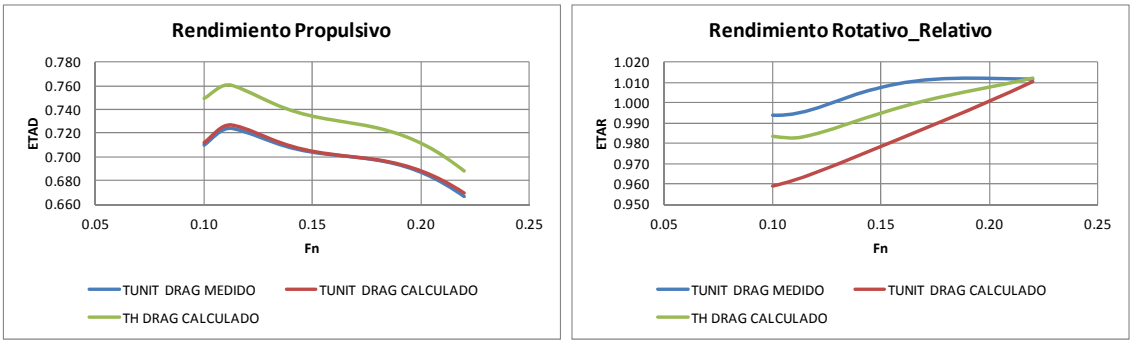


Fig 10.- Gráficos comparativos: Rendimiento propulsivo y rotativo-relativo para $0.1 \leq Fn \leq 0.22$

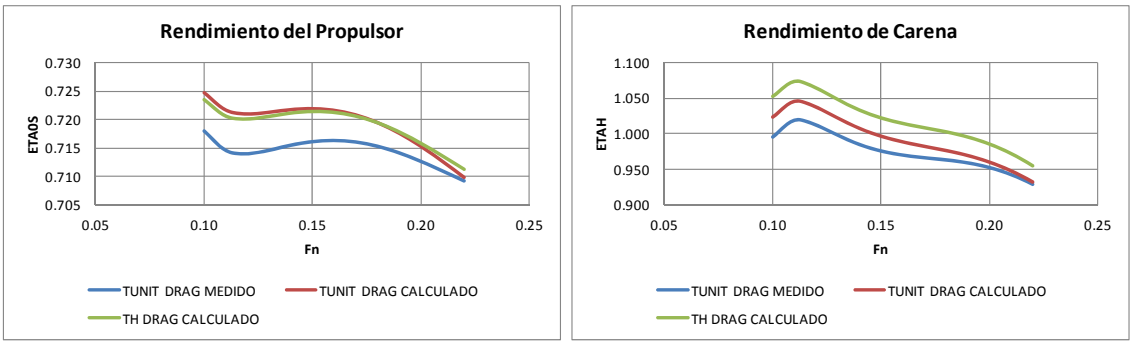


Fig 11.- Gráficos comparativos: Rendimientos de propulsor y carena para $0.1 \leq Fn \leq 0.22$

El valor del coeficiente de estela varía en un margen de 2 centésimas según el procedimiento de extrapolación utilizado teniendo un valor aceptable en todos ellos si bien, teniendo en cuenta que se trata de un buque de dos hélices, el valor menos deseable es el del TUNIT-DRAG MEDIDO. El coeficiente de succión obtenido con TH-DRAG CALCULADO es el que presenta unos valores más acordes con lo que cabría esperar, por el contrario los valores obtenidos al utilizar TUNIT-DRAG MEDIDO son excesivamente altos. Por lo que respecta a los rendimientos, excepto en el rotativo relativo, los valores más altos corresponden al procedimiento TH-DRAG CALCULADO, lo que se ha traducido en una décima y media de nudo de incremento en el valor de la velocidad predicha para el buque real. En general, los rendimientos experimentan poca variación cuando utilizando TUNIT, el DRAG se obtiene bien por medida directa o por cálculo con factor de forma.

6. Conclusiones

El cuerpo del POD no debe de considerarse nunca un apéndice de la carena, ya que el flujo sobre el mismo depende en gran medida del efecto de la hélice.

La determinación del factor de forma del cuerpo del POD permite realizar un cálculo preciso del DRAG en el flujo de la hélice y evita discrepancias que, en buques multi-hélices, puedan presentarse en las medidas de los T_{UNIT} de cada uno de los ejes en el ensayo de autopropulsión, si bien debe de comprobarse la posible discrepancia entre medida y cálculo.

Si bien la variación del factor de forma del POD con el número de Reynolds es relativamente pequeña, la tendencia de la curva que se muestra en la figura 7, indica la conveniencia de realizar el ensayo de propulsor aislado a las rps más altas posibles.

El procedimiento TH - DRAG CALCULADO resulta ser el más consistente en cuanto a los coeficientes y rendimientos que se obtienen y, además, utiliza las medidas más fiables, como es el empuje de la hélice y homogeniza el cálculo del T_{POD} al utilizar el factor de forma k_{POD} determinado en el ensayo de propulsor aislado que, a su vez, se utiliza en la extrapolación del ensayo de autopropulsión.

7. Referencias

[1] International Towing Tank Conference. Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-03-02.1. http://ittc.info/download/archiveofrecommendedprocedures

[2] International Towing Tank Conference. Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-03-01.3. http://ittc.info/download/archiveofrecommendedprocedures

PROYECTO I+D PHANTER: Propulsor de Hélice Anular en Túnel de Elevado Rendimiento

Alonso Pardo, Bienvenido [1,*]

[1] Hidrodinámica. Diseño General de Submarinos. NAVANTIA S.A. Email: balonso@navantia.es (BAP)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; Email: balonso@navantia.es (BAP)

Resumen: En este artículo se explica el concepto de propulsor naval con motor en anillo, y se describe el proyecto de I+D de Navantia S.A. PHANTER que persigue desarrollar la tecnología necesaria y resolver los problemas que plantea su utilización para aplicarlo a propulsión o maniobra de submarinos.

Palabras clave: submarinos, hidrodinámica, propulsores, rim-driven propellers.

---

1. Introducción

Un motor eléctrico en anillo consiste en un rotor con forma de anillo plano formado por un imán permanente y un rotor, también con forma de anillo plano circunscrito al anillo del rotor, donde se dispone de bobinados específicos que, mediante electrónica de potencia, es posible conseguir la generación de un campo magnético giratorio, con velocidad de rotación variable a deseo del operador.

Esta configuración proporciona un motor eléctrico muy compacto. La tecnología se encuentra totalmente desarrollada para el entorno "seco".

También es una tecnología consolidada la aplicación del concepto a motores sumergidos a poca profundidad. Aunque la electrónica de potencia debe permanecer aislada en entorno seco, el estator se hace sumergible y se ha desarrollado la tecnología que permite que los entrehierros entre rotor y estator puedan estar ocupados por agua de mar en vez de por aire.

Era sólo cuestión de tiempo que se pensara en este tipo de motores para su aplicación a hélices marinas. Esta aplicación es más reciente y tiene ya un cierto desarrollo para buques de superficie.

En esencia, acoplar una hélice al rotor de un motor en anillo tiene que superar dos retos principales. El primero es de tipo mecánico. La hélice generará una fuerza axial (empuje) debido a la sustentación de las palas para la que se debe encontrar la forma de transmisión a la estructura que soporta el motor para mover el buque. La solución consiste, actualmente, en el uso de cojinetes troncocónicos sobre los que gira el rotor y que transmiten la fuerza axial a la carcasa que alberga el estator. Dicha carcasa transmite el empuje a la estructura del buque, actuando como chumacera.

El problema en el uso de este mecanismo es que afecta a los entrehierros del motor, que deben ser diseñados cuidadosamente para no perder rendimiento eléctrico. Por otro lado, el rozamiento de los cojinetes debe ser lubricado y refrigerado, para evitar pérdidas de potencia y sobrecalentamientos del sistema. Esto se está realizando a día de hoy con cojinetes de materiales especiales autolubricados por la misma agua salada del entorno. El uso de esta tecnología es el verdadero factor limitante en el rango de potencias, revoluciones y cotas (profundidades) a las que este tipo de propulsor es capaz de funcionar.

El segundo reto a resolver es el hidrodinámico. Se dispone de una tecnología de muchos años en el desarrollo y estudio de propulsores convencionales, esto es, palas unidas a un núcleo central movido por un eje. Se conoce bien el proceso por el cual el flujo de agua, al incidir en los perfiles hidrodinámicos en los que se puede considerar formada cada pala al intersectarla por cilindros concéntricos al eje de giro, genera una fuerza de sustentación, que es aprovechada para generar el empuje. Se puede prever con mucha confianza el paso variable con el radio de la pala y adaptarlo al vector velocidad de flujo variable aguas arriba del propulsor, de forma que se maximice el rendimiento energético del sistema.

Sin embargo, un propulsor en anillo tiene las palas unidas al rotor por sus extremos, y en el centro no hay núcleo. O si lo hay, no va unido a ningún eje. Por lo tanto, la hidrodinámica, aunque se asume que será parecida, está mucho menos estudiada que la de un propulsor convencional.

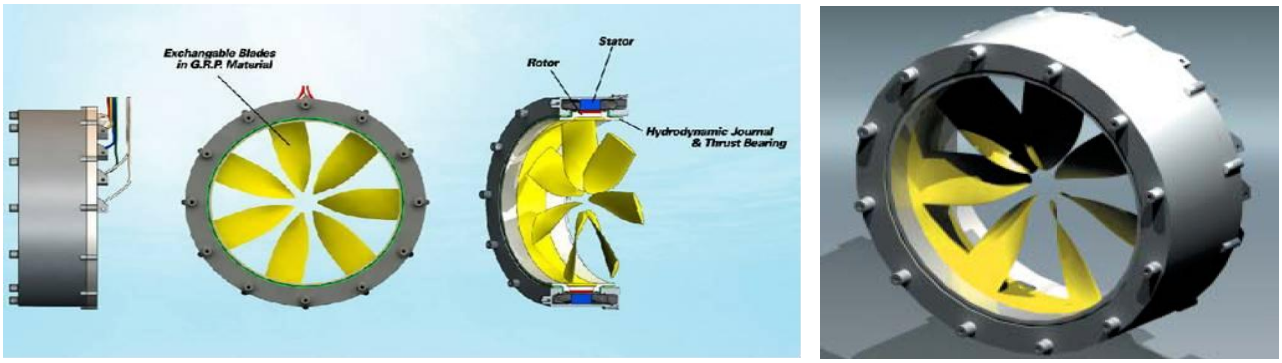


Figura 1. Ejemplo de un diseño de propulsor anular para auxilio de la maniobra en yates

Los principales fabricantes de propulsores marinos ya cuentan con prototipos en sus catálogos, llegando a potencias de 1000 kW. El uso al que se está proponiendo la aplicación de este concepto es el de hélices de maniobra en proa para buques de medio y gran porte y sólo se propone aplicarlo como propulsión principal en buques pequeños debido a la limitación de potencia comentada.

2. Desarrollo del proyecto de I+D. Objetivos

En el diseño de la propulsión y maniobra de submarinos militares todavía no se ha aplicado el uso de los motores en anillo y hélices sin núcleo. A las dificultades anteriormente mencionadas sobre la hidrodinámica y el rango de potencias se unen otras dos: las condiciones ambientales límites debidas a la profundidad de trabajo y los elevados requerimientos hidroacústicos, esto es, el necesario silencio al que debe trabajar el submarino para mantener su indetectabilidad sonar.

En este contexto, Navantia, como diseñador de submarinos, se ha planteado el desarrollo de un sistema de propulsión y/o maniobra basado en un "rim-driven propeller".

El Objetivo general del proyecto de I+D PHANTER es conseguir dotar a Navantia del "know-how" necesario para diseñar o al menos poder especificar y evaluar el diseño de propulsores anulares aplicados como propulsión auxiliar para velocidad de patrulla, o bien a la maniobra (incluida la de vuelta a casa) en submarinos. Esta solución plantea hélices de maniobra compactas, de baja discreción acústica y alto rendimiento, con el motor integrado en un propulsor sumergido resistente a máxima cota operativa.

Su configuración permitiría situarlas en los espacios de libre circulación de submarinos, sin consumir volumen ni peso dentro del casco resistente como hélices auxiliares conectadas por un eje y paso de casco a un motor eléctrico en su interior. La flexibilidad de disposición del propulsor, ya sea en los espacios de proa, popa, superestructura e incluso la vela (en estos espacios buscando soluciones abatibles o escamoteables) es uno de los aspectos a desarrollar en el proyecto.

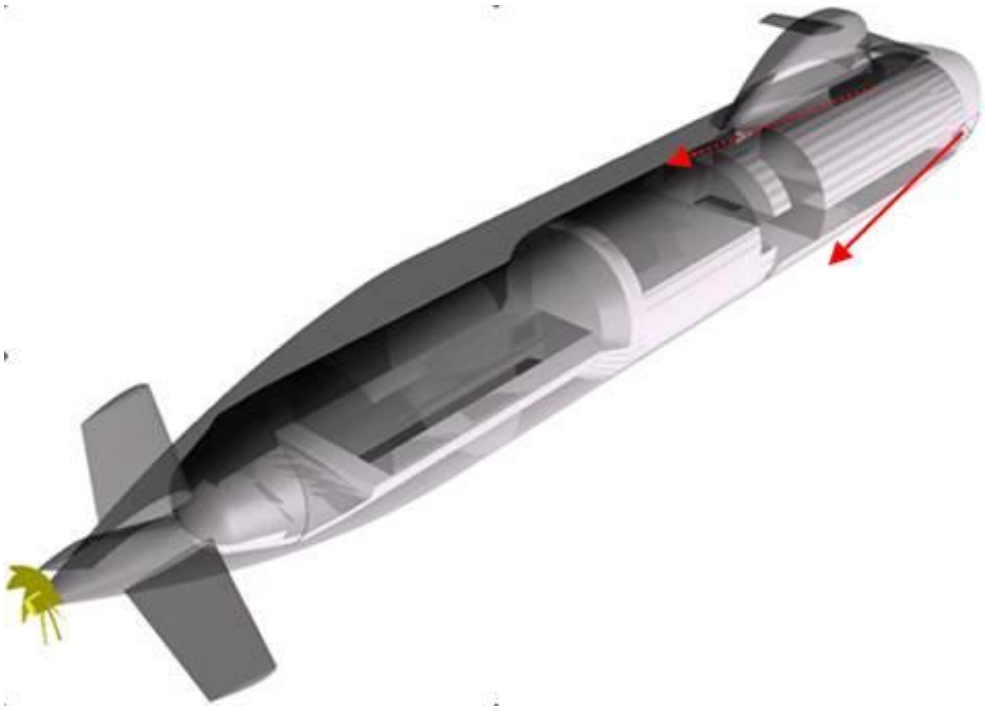


Figura 2. Disposición en proa con capacidad de propulsión silenciosa, "vuelta a casa" y auxilio en maniobra

El requisito de disponer de un propulsor auxiliar para la situación de patrulla (silenciosa, a baja velocidad) que pueda ser utilizado también en caso de fallo del principal (propulsor de "vuelta a casa") e incluso como hélice de maniobra para mantener la posición en operaciones estáticas empieza a ser habitual en las peticiones de clientes potenciales. Disponer de un sistema que permite instalar esa propulsión sin afectar a la disposición de espacios dentro del casco resistente es significativamente ventajoso en complejidad del diseño, coste del equipo e instalación, mantenimiento y reparación. Fundamentalmente supone una ventaja tecnológica importante frente a los competidores, en especial si se tiene en cuenta que es un demostrador tecnológico del futuro a medio plazo de los propulsores principales de submarinos (ver Figura 3, concepto del DARPA, US Navy sobre el "submarino del 2020").

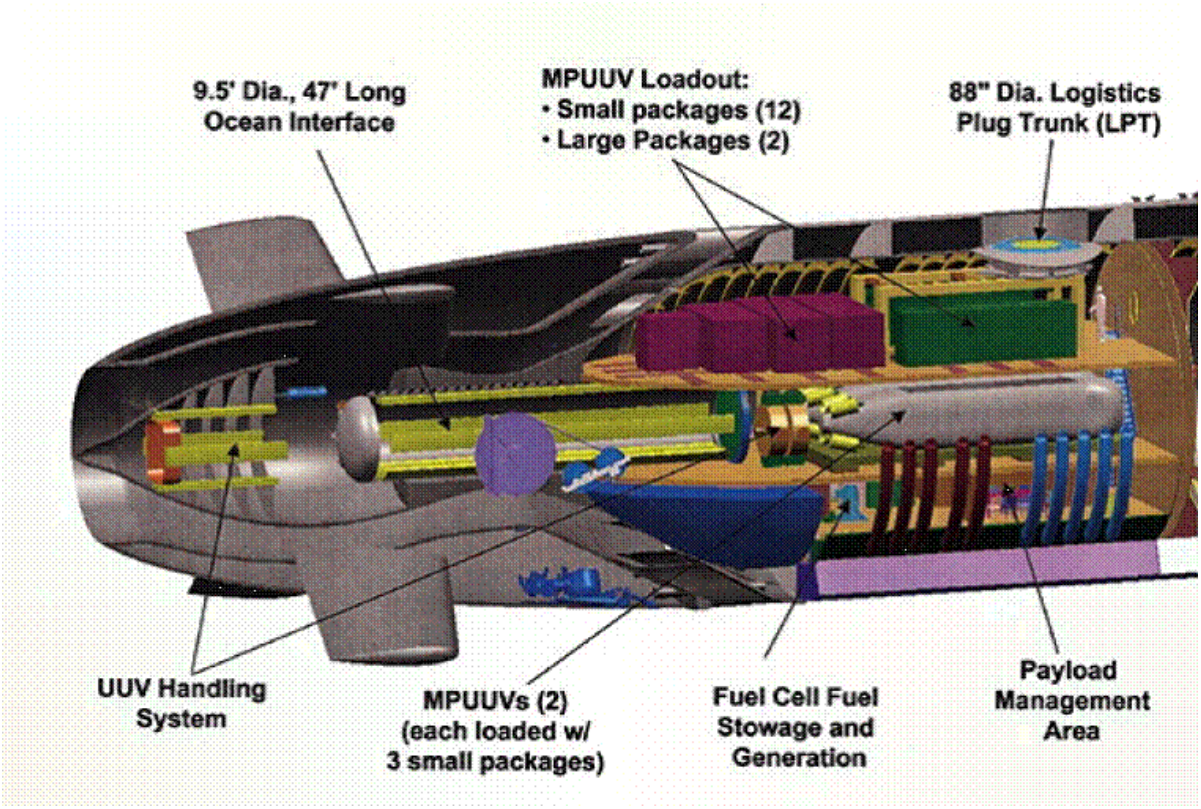


Figura 3. Disposición en popa de la propulsión principal con disposición anular de las palas y, rotor y estator del motor eléctrico de imanes permanentes integrados en la entrada en túnel

Los Objetivos técnicos específicos del proyecto son los siguientes:

- Desarrollo de la modelización física y teoría de funcionamiento del propulsor de palas encastradas en anillo.
- Definición y diseño del modelo, tanto de propulsor-hélice anular como de motor de imanes permanentes con chumacera de empuje integrada en el soportado del rotor.
- Construcción y ensayos del modelo conjunto propulsor-motor, para su análisis y validación de la modelización física.

3. Desarrollo del proyecto de I+D. Descripción técnica.

La base de un propulsor anular específico para su aplicación a submarinos debe consistir en aprovechar la tecnología existente de motores eléctricos en anillo. En paralelo, se pretenden plantear dos fases del proyecto.

La primera fase, de desarrollo del concepto de motor eléctrico en anillo, sumergible y funcional a cota máxima operativa del submarino, capaz de desarrollar la potencia y par, así como transmitir el empuje necesario a la estructura para mantener la velocidad de patrulla, se prevé realizar junto a un fabricante especialista.

Es previsible tener que resolver los siguientes problemas:

- Lubricación con agua salada
- Corrosión
- Mantenimiento de entrehierros al deformar el sistema por la presión exterior
- Transmisión de la fuerza axial a la carcasa sin perder rendimiento ni producir vibraciones ni ruido significativo.

La segunda fase está previsto que sea de desarrollo del concepto de hélice anular fijada al rotor por sus extremos, en principio sin núcleo. Aunque se debe notar que poner un núcleo con una función estructural, de estabilización del flujo, de reducción de vibraciones, o simplemente para eliminar los torbellinos de punta de pala no debe descartarse a priori. De hecho algún diseñador como Rolls Royce ya lo usa.

En este desarrollo conceptual está previsto comenzar el proyecto con el establecimiento de una nueva modelización física del problema, o la adaptación de las existentes (lifting line, NTI, etc.) a las peculiaridades de este tipo de propulsor, que permita mediante ensayos en canal validar las propuestas o modificarlas, y finalmente, obtener un diseño válido que cumpla requisitos de posibles clientes, sobre todo en cuanto a firma acústica y rendimiento.

Se debe notar que este es uno de los principales campos de innovación de este I+D, pues la hidrodinámica de este tipo de unión de las palas no está estudiada todavía con el rigor de otros conceptos propulsores. Los diseños de hélices anulares que actualmente hay en el mercado están basados en las series sistemáticas de hélices en tobera con pequeñas modificaciones en los extremos de las palas, ahora en el centro del propulsor. La hidroacústica de este tipo de propulsores, simplemente no está estudiada a día de hoy, que se sepa.

4. Desarrollo del proyecto de I+D. Planificación.

Las etapas del proyecto, dentro de las dos fases, "hidrodinámica" y "eléctrica" serán las siguientes:

1. Fase de Desarrollo y Análisis: En la cual se marcarán los objetivos iniciales del proyecto y se desarrollará el modelo matemático y físico junto a una herramienta de análisis computacional sencilla que permita variar diseños y estimar los parámetros para analizar variantes en el propulsor. En la parte eléctrica se recogerá el estado del arte actual y las líneas de adecuación de los diseños existentes para adaptarlos a los problemas de soportado de la cota, lubricación en el empuje máximo, mantenimiento, rendimiento y ruido específicos del entorno submarino.
2. Fase de Experimentación: Se estudiarán los resultados del análisis computacional y se iniciará la fase experimental del proyecto realizando pruebas en un Canal de Ensayos al menos sobre un modelo a escala. En la parte eléctrica se desarrollará un demostrador, bien a escala o real.

3. Fase de Validación-revisión de la modelización: Con los resultados experimentales se realizará el análisis y propuestas de modificación de la modelización. Se presentarán las conclusiones del proyecto.

A continuación se presenta un cronograma con el desglose de etapas anterior en paquetes de trabajo. Las etapas del proyecto, dentro de las dos fases antes comentadas, "hidrodinámica" y "eléctrica" serían las siguientes:

				AÑO 1		AÑO 2		AÑO 3	
				S1	S2	S1	S2	S1	S2
FASE 1. DESARROLLO DEL PROPULSOR ANULAR	1.1. ANÁLISIS-DESARROLLO	PT1	DESARROLLO MODELIZACIÓN HIDRODINÁMICA						
		PT2	DEFINICIÓN Y DISEÑO DEL MODELO PROPULSOR						
	1.2. EXPERIMENTACIÓN	PT3	CONSTRUCCIÓN Y ENSAYOS DEL MODELO						
	1.3. VALIDACIÓN-REVISIÓN	PT4	ANÁLISIS INFORMES DE ENSAYOS						
		PT5	CORRECCIÓN MODELIZACIÓN FÍSICA						
		PT6	MEMORIA FINAL FASE 1						
FASE 2. DESARROLLO DEL MOTOR ELÉCTRICO EN ANILLO	2.1. ANÁLISIS-DESARROLLO	PT7	DEFINICIÓN Y DISEÑO DEL MOTOR						
	2.2. EXPERIMENTACIÓN	PT8	CONSTRUCCIÓN Y ENSAYOS						
	2.3. VALIDACIÓN-REVISIÓN	PT9	ANÁLISIS INFORMES DE ENSAYOS						
		PT10	MEMORIA FINAL DEL PROYECTO						

Figura 2. Cronograma del proyecto I+D PHANTER

5. Conclusiones

Son evidentes las ventajas que el desarrollo de la tecnología de propulsores anulares puede aportar a la propulsión auxiliar y maniobra en submarinos. Motor y propulsor compactos, sumergibles, escamoteables en zonas de libre circulación sin ocupar empacho en el casco resistente, para maniobrar o propulsar el submarino a velocidad de patrulla. Se han descrito los retos técnicos que habría que superar para desarrollarlo y la planificación de un I+D promovido por Navantia para conseguir resolver dichos retos en tres años.

Referencias

1. VOITH. Voith Inline thruster/Voith Inline Propulsor. In *www.voithturbo.com*
2. VOITH. Voith Inline thruster for Skeg Installation. In *www.voithturbo.com*
3. BRUNVOLL. Brunvoll presents a "Rim driven thruster" (RDT). In *www.brunvoll.no*
4. Paul M. Tuohy. Ph. D. Thesis: Development of Canned Line-start Rim-driven Electric Machines. *University of Manchester*, **2011**.
5. Pashias, C.; Turnock, S. R. Hydrodynamic design of a bi-directional. Rim-driven ducted thruster suitable for underwater vehicles. *University of Southampton. Ship Science Report No. 128*, **2003**.
6. M. Lea et al., "Scale model testing of a commercial rim-driven propulsor pod" in *Journal of Ship Production*, May 2003, Vol. 19, N°2, pp.121-130.
7. Carlton, J. S., *Marine propellers & propulsion*, Butterworth Heinemann, Oxford, United Kingdom, 1994, pp. 85-86.
8. Yakovlev, A.; Sokolov, M. A.; Marinich, N. V. Numerical Design and Experimental Verification of a RIM-Driven Thruster. *Second International Symposium on Marine Propulsors* **2011**.

Influencia de condiciones exteriores en la demanda energética del buque de vela Juan Sebastián de Elcano

Carrascal Villar, Francisco Manuel [1,*], Arce Fariña, María Elena [2,*] , Ulloa Sande, Carlos [2], y Cacabelos Reyes, Antón [2]

[1] Armada Española; Email: fcarvi1@fn.mde.es (F.M.C.V.)

[2] Centro Universitario de la Defensa (CUD), Escuela Naval Militar (ENM), Plaza de España 2, 36920, Marín. Emails: elena.arce@cud.uvigo.es (M.E.A.F.), carlos.ulloa@cud.uvigo.es (C.U.S.), acacabelos@cud.uvigo.es (A.C.R.)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: elena.arce@cud.uvigo.es

---

Abstract: Las demandas energéticas de una edificación vienen determinadas, entre otros factores, por las características de sus cerramientos y la finalidad de la misma. Además, cada construcción se diseña para unas condiciones exteriores determinadas, por lo que la ubicación y orientación cobran gran importancia. A diferencia de en un edificio, en un buque, las condiciones de contorno varían en mayor medida debido, principalmente, a la orientación y condiciones atmosféricas, lo que repercute en las necesidades de consumo de energía. Bajo estas premisas, el presente trabajo se enfoca al análisis de las necesidades energéticas del buque Juan Sebastián de Elcano en diferentes ubicaciones y orientaciones, lo que conlleva situaciones climatológicas cambiantes. Las conclusiones de este trabajo se basan en la construcción y análisis de un modelo para el estudio de la demanda consumida en puerto. Una de las principales utilidades que se pueden obtener de este modelo, es poder planificar los datos de demanda de frío y de calor en puerto y, conociendo el consumo de las diferentes instalaciones de HVAC (i.e. caldera, sistema de aire acondicionado), estimar un coste económico del mismo. Asimismo, es importante destacar la influencia que tiene la ubicación en la demanda energética, pudiendo llegar a suponer un incremento de más de un 10% en la demanda energética del buque.

Keywords: simulación de sistemas transitorios; demandas térmicas; buque; puerto.

---

1. Introducción

Desde mediados de la década de 1970, la simulación de edificaciones (SE) ha surgido como un intento de emular la realidad [1, 2] y mejorar los métodos manuales tradicionales para estudiar y optimizar la eficiencia energética de edificios y sistemas. La SE se ha empleado en todo el proceso de diseño, desde las primeras etapas hasta la fase de construcción. Aunque en ciertos países (e.g. Holanda, Italia, Estados Unidos) hay un gran número de casas flotantes, la literatura existente de SE aplicada al análisis de las necesidades de climatización de buques es escasa [3-5]. A diferencia de las investigaciones existentes, en este trabajo se analizan las demandas térmicas bajo la premisa de que la fuente de calor o frío, según necesidad, es ilimitada.

Desde un punto de vista de confort térmico y de consumo energético, un buque, al tener capacidad de movilidad, tiene mayores posibilidades de eficiencia que una construcción. Por este motivo, el atraque de un buque en un puerto, se podría seleccionar en función de su orientación en dicho puerto o de la contribución de la sombra del dique sobre el casco del buque. La radiación solar es un factor crítico en las ganancias térmicas de una construcción, ya que la cantidad de calor por radiación solar suele llegar al 50 % de las ganancias totales de calor [6].

La realización de modelos energéticos en la edificación normalmente requiere el manejo de diferentes herramientas de simulación que facilitan la incorporación de las distintas características geométricas, condiciones de contorno y parámetros de funcionamiento. Dentro de las diferentes opciones existentes en el ámbito de las simulaciones térmicas de edificios (i.e. DOE-2, DesignBuilder, TRNSYS, EnergyPlus), para este estudio se seleccionó el entorno de simulación TRNSYS (TRaNsient System Simulation). La motivación de esta elección viene determinada porque TRNSYS, además, de estar diseñado para resolver sistemas energéticos complejos, permite el desarrollo de herramientas propias, lo que facilita su adaptabilidad a cualquier entorno [7, 8]. Para llevar a cabo las simulaciones, además del software TRNSYS, fue necesaria la utilización de Google Sketchup, para la definición de la geometría, Meteonorm [9], para las condiciones climatológicas y Panoply, para gestionar datos de temperatura del agua. El software de simulación TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation) es una herramienta que permite resolver sistemas energéticos complejos [7]. Además, la estructura modular del programa facilita la definición de nuevos componentes, lo que posibilita una fácil adaptación al sistema concreto de estudio [3].

En el presente trabajo se realizó una SE para el Buque Escuela Juan Sebastián Elcano (1.927). Se trata de un buque a vela de la Armada Española de 94,1 metros de eslora, 13 de manga y 9 de puntal. Aunque navega de media unos 170 días cada año [10], una parte del año se encuentra atracado en su puerto base (Arsenal de la Carraca, San Fernando, Cádiz, España). Además, durante las navegaciones hace estancias en puerto que, en media, suponen unos 50 días [10]. Si se suman todos los días que el buque permanece en puerto durante los últimos 10 años, se observa que más de la mitad del año está atracado. Por ello, el estudio de los consumos durante los periodos que está parado el buque resulta trascendental de cara a reducir los mismos.

2. Metodología

2.1. Entorno de simulación. Software empleado

En la SE se emplearon cuatro programas: SketchUp, Meteonorm, Panoply y TRNSYS. SketchUp se utilizó para la definición de la geometría y de las superficies de sombra. El buque se dividió en un total de 21 zonas térmicas (Figura 1). Para el desarrollo de este trabajo se seleccionaron dos compartimentos (Figura 2), uno de ellos por encima de la línea de flotación (Alojamiento) y otro por debajo (Máquinas principales), lo que permitió analizar la influencia del fluido que rodea la envolvente del buque en la demanda térmica. La zona térmica Alojamiento recibe radiación solar directa sobre una parte de su envolvente. Los laterales y la cubierta superior de esta zona térmica están en contacto con el exterior, por lo que reciben radiación solar directa, mientras que los mamparos que están mirando a proa y a popa del buque se encuentran en contacto con otras zonas térmicas. Además, esta zona cuenta con tambuchos (ventanas), por lo que de influir el efecto de la sombra del dique sobre la construcción debería notarse en mayor medida sobre esta zona térmica. En concreto, un total de 6 tambuchos de 0.25m de diámetro cada uno, lo que equivale a una superficie de 2.35 m^2. Si se compara esta superficie con la total del compartimento resulta despreciable; sin embargo, al ser las ventanas las que permiten la incidencia directa de los rayos solares en el interior del compartimento el efecto de la sombra del dique sobre la construcción se percibe en mayor grado en las zonas térmicas que cuentan con tambuchos. La superficie total de la zona de Alojamiento es de 137.65 m^2. La zona térmica Máquinas principales cuenta con una superficie de 140.3 m^2, muy similar a la de Alojamiento, lo que facilita la comparación de los resultados obtenidos. En lo concerniente a los cerramientos, señalar que el casco del buque es de acero naval y que las cubiertas, así como gran parte de los elementos del barco, son de madera.

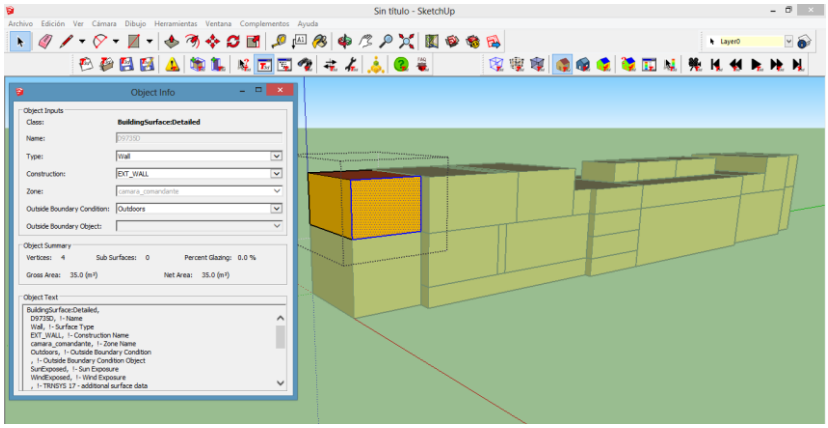


Figura 1 Modelo del buque simplificado en Sketchup. Señalado mamparo exterior de la obra muerta

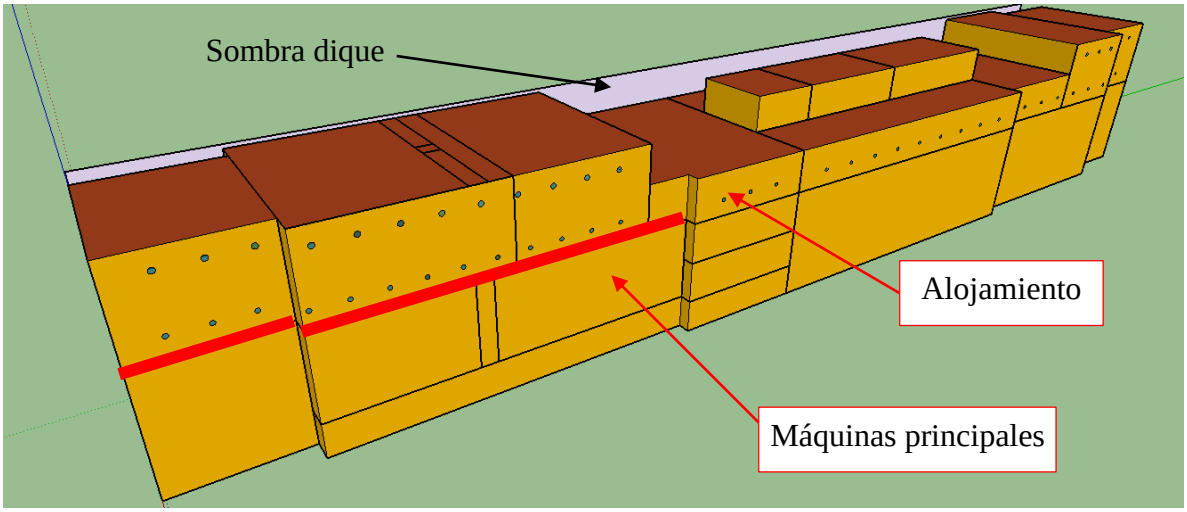


Figura 2 Zonas térmicas objeto de estudio en el modelo en SketchUp del Buque Escuela Juan Sebastián Elcano.

La base de datos de Meteonorm (versión 7) permitió obtener las condiciones meteorológicas en el puerto base del buque. Las condiciones de contorno, la temperatura del agua, se determinaron empleando el software Panoply.

El programa de simulación de sistemas transitorios (TRNSYS) fue utilizado para analizar el buque en su conjunto. Para poder realizar las simulaciones fue necesario definir la composición de los cerramientos del buque, para lo cual se han considerado datos de embarcaciones de similares características. En la Figura 3 se muestra el entorno de simulación con los diferentes componentes utilizados.

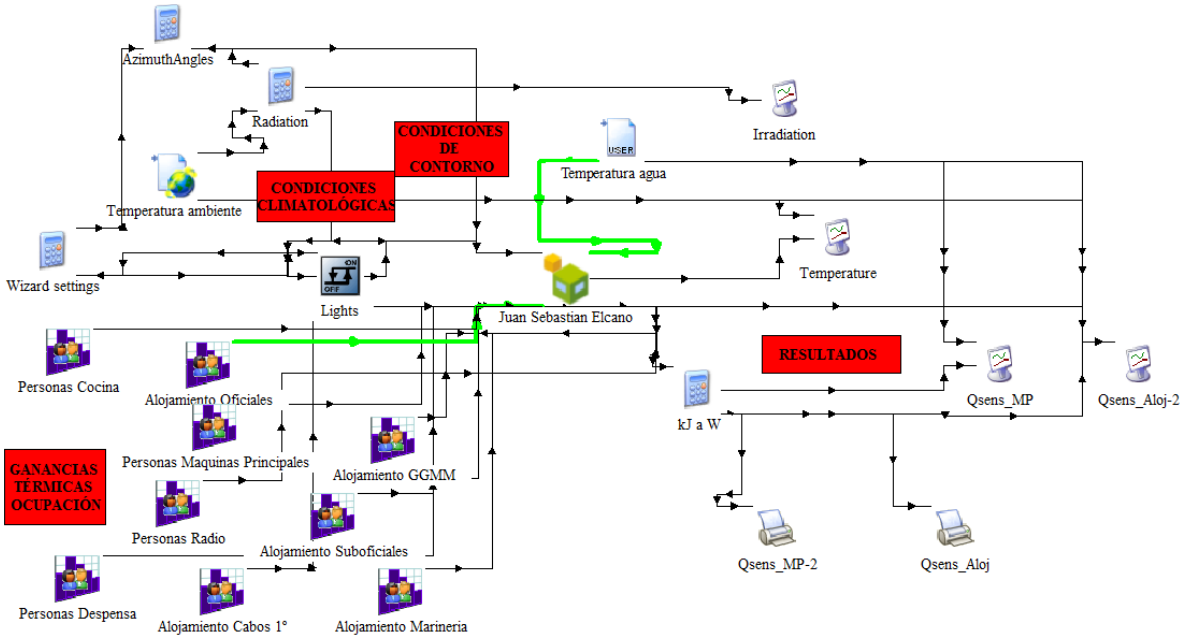


Figura 3 Modelo en TRNSYS del Buque Escuela Juan Sebastián Elcano.

2.2. Ganancias térmicas

En este estudio solo se computaron las ganancias interiores de calor por ocupantes. Dadas las limitadas capacidades de espacio de este buque, el nivel de ocupación de las diferentes estancias

representa una importante ganancia térmica que debe ser considerada. A la hora de dividir la tripulación del barco, se han considerado dos tipos de días diferentes: laborable y no laborable. El buque tiene por plantilla un total de 204 personas. Los días no laborables solo se considera que está en el buque el personal de guardia (33 personas). Para el cálculo de las cantidades de calor cedido por las personas que se encuentran en el buque, se utilizó un módulo de TRNSYS (type) específico para ello.

3. Resultados y Discusión

3.1. Análisis de consumos

La principal ventaja de la SE de cara a planificar las estancias en puerto es que permite conocer con anterioridad los consumos. A modo de ejemplo, en la generación del modelo energético se computaron los calores sensibles para los atraques que se efectuaron durante el crucero del año 2014 (tabla 1).

Puerto	**Promedio Qsens (W)**	**Estancia (horas)**	**Demandas energéticas de calor (Wh)**
Cagliari	43.198	72	3.110.256
Mahón	43.684	24	1.048.416
Sète	44.644	72	3.214.368
Melilla	29.472	72	2.121.984
San Fernando	29.607	96	2.842.272
Cádiz	24.875	72	1.791.000
Tenerife	9.711	72	699.192
Nueva York	46.344	120	5.561.280
Dublín	49.906	120	5.988.720
Hamburgo	26.618	120	3.194.160
Oslo	41.786	120	5.014.320
Marín	13.380	96	1.284.480

Tabla 1. Demandas energéticas durante estancias en puerto en el crucero de 2014

Con las demandas energéticas de calor en puerto, estima que se necesitan 3.991 litros de gasóleo para generar los 740,70 MJ demandados (Ecuación 1). La potencia de la caldera se conoce de las especificaciones técnicas del fabricante para el modelo CP 160 de la marca Roca. Se utilizó la potencia máxima: 186.000 W. Con el coste del diésel marino (0,65 €/l [11]), se calculó el coste total que supone atender la demanda de calor durante las estancias en puerto, un total de 2.582,34 €.

$$Litros\ de\ conmbustible\ consumido = \frac{Potencia}{PCI_{gasóleo} \cdot 10^6} \quad (1)$$

En base a los resultados obtenidos en las simulaciones del crucero de instrucción del año 2014, se conoce que la potencia máxima de la caldera actual es aproximadamente dos veces superior a la demanda pico de calor. Esto es, la demanda máxima de calor asciende a 95.960 W, frente a los 186.000 W de potencia máxima de la caldera.

3.2. Efecto de la sombra del dique en el consumo

Este punto se analizó para el atraque del buque en el Arsenal de La Carraca (Cádiz) (Coordenadas: 36°29'N, 6°10'W). El efecto de la sombra fue mayor en la zona térmica "Alojamiento", siendo prácticamente nulo en "Máquinas principales". La zona térmica de Máquinas principales, a diferencia de Alojamiento, carece de ventanas y se encuentra sumergida. En la Tabla 2 se muestra la variación mensual promedio en la demanda térmica derivada del efecto de la sombra del dique sobre el buque en la ubicación actual con el dique a estribor. Las mayores variaciones porcentuales corresponden a los meses de junio y diciembre (tabla 2), lo que refleja el efecto del azimut y la altura solar. Al ser un buque simétrico respecto de su línea de crujía, no se observa diferencia en las demandas térmicas al atracarlo con el dique a babor o estribor.

Mes	1 Ene.	2 Feb.	3 Mar.	4 Abr.	5 May.	6 Jun.	7 Jul.	8 Ago.	9 Sep.	10 Oct.	11 Nov.	12 Dic.
Zona Térmica Alojamiento	0,6	-0,1	-3,1	-2,1	-1,5	-7,2	-2,0	-3,1	-1,6	-0,5	-4,5	-14,5

Tabla 2. Variación porcentual promedio en la demanda térmica debida a la sombra del dique

Conclusiones

La SE desarrollada permite analizar las demandas energéticas del Buque Escuela Juan Sebastián Elcano en diferentes ubicaciones. Una de las principales utilidades que se pueden obtener de este modelo, es poder planificar los datos de demanda de calor y frío en puerto y, conociendo el consumo de las diferentes instalaciones de HVAC (i.e. caldera, sistema de ACS), estimar el coste económico de las instalaciones, tal y como se ha hecho para las demandas de calor.

Dentro de las condiciones de contorno en el atraque en puerto, destacar la influencia de la sombra del dique en la demanda energética. El no considerar su efecto puede llegar a suponer en algún mes un incremento superior a un 10% en la demanda energética del buque.

Agradecimientos

Referencias

1. Clarke, J. A., *Energy Simulation in Building Design*. Oxford: Routledge, **2001**.

2. Fabrizio E.; Monetti, V. Methodologies and Advancements in the Calibration of Building Energy Models. *Energies*, , **2015**, 8, pp. 2548-2574.

3. Ulloa, C.; Eguía, P.; Miguez, J. L.; Porteiro, J.; Pousada-Carballo J. M.; Cacabelos, A. Feasibility of using a Stirling engine-based micro-CHP to provide heat and electricity to a recreational sailing boat in different European ports. Applied Thermal Engineering, **2013**, 59, pp. 414-424.

4. Newton, W., et al. Investigating the thermal profile of a marine vessel engine room through simulation with field measurements. *Applied Thermal Engineering*, **2014**, 73, pp. 1360-1370.

5. Katte, S.S.; Venkateshan, S. P. Thermal modelling of a launch vehicle with internal and external heating. *Journal of Spacecraft Technology*, **2000**, 10, pp. 69-83.

6. Díaz, V.S.; Barreneche, R.O., *Acondicionamiento Térmico de Edificios*. Buenos Aires: Nobuko, **2005**.

7. Beckman, W.A.; Broman, L.; Fiksel, A.; Klein, S.A.; Lindberg, E.; Schuler, M.; Thornton, J. Trnsys the most complete solar energy system modeling and simulation software. *Renewable Energy*, **1994**, 5, pp. 486-488.

8. Eldeeb, R.; Fauchoux, M.; Simonson, C.J. Applicability of a heat and moisture transfer panel (HAMP) for maintaining space relative humidity in an office building using TRNSYS. *Energy Building*, **2013**, 66, pp. 338-345.

9. (**2015**). Meteonorm. Recuperado de: http://meteonorm.com/

10. (**2015**, Jul 27). Armada Española (Actividades). Recuperado de: http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/buques_principal/prefLang_es/.

11. (**2015**, Jul 28). El precio del gasóleo naval sube un 40% a los armadores se plantean amarrar la flota. Recuperado de: http://www.lne.es/aviles/2011/04/30/precio-gasoleo-naval-sube-40-armadores-plantean-amarrar-flota/1067728.html

Sesión I-E

Sociedad, Economía y Humanidades

Análisis institucional de los regímenes de responsabilidad civil por daños debidos a la contaminación por hidrocarburos: Aplicaciones al caso Prestige

Fernández González, Raquel [1]

[1] Universidad de Vigo, grupo ERENEA. raquelf@uvigo.es

Abstract: El regreso de las instituciones a la agenda principal de investigación ha puesto de relieve la importancia de las mismas en el análisis económico. La Nueva Economía Institucional ha permitido una mejor comprensión de los casos de estudio que atañen a distintas áreas de conocimiento, también a la concerniente a la gestión de los recursos naturales. En este artículo, el análisis institucional se centra en el ámbito marítimo, donde coexisten dos grandes regímenes de responsabilidad civil por contaminación, cada uno en un ámbito geográfico diferente (Estados Unidos - Europa). Por ello se realiza un análisis comparativo entre los dos grandes regímenes de asignación de responsabilidad civil existentes aplicándolos a la catástrofe del Prestige. De este modo, la asignación y distribución de responsabilidades acaecidas en la investigación y posterior proceso judicial del Prestige se compara con un escenario alternativo en donde los instrumentos de compensación aplicables se rigen por lo establecido en la Oil Polution Act de 1990 (OPA 90), para así establecer un análisis riguroso sobre los efectos que las distintas normas pueden tener en un mismo escenario.

Keywords: Instituciones; responsabilidad civil; Oil Polution Act (OPA 90); OMI; Prestige.

1. Introducción

En el ámbito marítimo, coexisten dos grandes regímenes de responsabilidad civil por contaminación, cada uno en un ámbito geográfico diferente. En Europa, y por tanto en España, los tratados internacionales diseñados en el seno de la OMI (Organización Marítima Internacional) regulan la responsabilidad por contaminación a través de dos acuerdos: "El Convenio Internacional sobre Responsabilidad Civil por Daños Debidos a la Contaminación por Hidrocarburos, 1992" que legisla la responsabilidad civil del propietario del buque y "El Convenio de Constitución de un Fondo

Internacional de Indemnización de Daños causados por la Contaminación por Hidrocarburos, 1992" o también llamado FIDAC, el cual delega la compensación de los daños a través de un fondo. En cuanto a los EE.UU., la legislación aplicable en materia de seguridad y lucha contra la contaminación viene determinada por la Oil Polution Act (OPA 90), siendo complementada por legislación propia de cada Estado.

El análisis comparativo entre los dos regímenes de responsabilidad civil nos muestra que la doctrina estadounidense se alza como un sistema más riguroso que el Europeo, pues implica a más sujetos responsables, abarca más tipos de daños indemnizables e impone mayores indemnizaciones. Ante este análisis comparativo, cabe preguntarse qué hubiese sucedido si España contase con un marco institucional de responsabilidad civil como el impuesto por la OPA 90 en la catástrofe ambiental del Prestige. La justicia española, aplicando los convenios de la OMI, desestimó en su mayoría las responsabilidades por los delitos contra el medio ambiente y desobediencia grave. Ello conlleva que solo una mínima parte de la cuantía de los daños causados fue cubierta.

2. La Nueva Economía Institucional y el análisis económico del derecho

2.1. La Nueva Economía Institucional

A lo largo de las tres últimas décadas las instituciones han regresado al centro de la agenda de investigación principal de las ciencias sociales. Este proceso ha sido protagonizado en la ciencia económica por el programa de la Nueva Economía Institucional (NEI).

El programa de la NEI consiguió integrar el papel de las instituciones en el análisis económico a través de la noción coaseana de costes de transacción (Caballero 2001, 2002; Kingston y Caballero, 2009). Desde este enfoque de análisis positivo, las instituciones entendidas como "las reglas del juego" (reglas formales, normas informales y mecanismos de cumplimiento) determinan la estructura de incentivos en la economía y resultan claves para entender el funcionamiento económico en sociedad.

Por un lado, Coase (1937) generó un enfoque microanalítico de las organizaciones que dio lugar a la economía de los costes de transacción (Williamson, 1985); por otro lado, Coase (1960) generó un enfoque macroanalítico que estudia las relaciones entre instituciones y funcionamiento económico, así como los procesos de cambio institucional (North, 1981, 1990a). La NEI incorpora ambos enfoques, que están mutuamente inter-relacionados, y estudia las instituciones y cómo las instituciones interactúan con las organizaciones en la economía (Menard y Shirley, 2005). El programa de la NEI, al incorporar el papel de las instituciones, ha construido un marco analítico en el que la historia, la cultura y creencias y la política importan, y lo ha hecho partiendo de los fundamentos económicos neoclásicos. De acuerdo a North (1994), el marco analítico de la NEI es una modificación de la teoría neoclásica que conserva los supuestos básicos de escasez y competencia, así como los instrumentos analíticos de la teoría microeconómica, pero que modifica el supuesto de la racionalidad y añade la dimensión del tiempo.

2.2. Law and Economics, o la importancia del derecho en la economía

En un mundo con costes de transacción nulos (Coase, 1960), la ley no tiene relevancia sobre el nivel de producción, porque cuando el sistema de precios funciona sin costes, la maximización de la

producción es independiente del sistema legal. Pero en el mundo real con costes de transacción positivos los sistemas legales surten efectos sobre el sistema económico: la reacomodación de derechos solo se llevará a cabo cuando permite un aumento de la producción superior a los costes de transacción. De este modo, podemos concluir que la solución eficiente no es independiente de la norma jurídica elegida. En función de cómo sea la delimitación de los derechos de propiedad así será el nivel de eficiencia y producción. Coase (1960) establece el primer vínculo sistemático entre economía y derecho a través del concepto de externalidad económica y de daño jurídico. La importancia de este trabajo es que permite concluir que cuando hay costes de transacción positivos la solución eficiente dependerá de la norma jurídica elegida: la ley tiene importancia económica y el conjunto legal determinará el grado de eficiencia de una sociedad.

En este sentido, Coase (1960) encuentra dos campos de actuación posibles para el Estado y para el legislador. En primer lugar, el legislador y los poderes públicos deben favorecer el marco institucional y las leyes que reduzcan al mínimo los costes de transacción, buscando permitir vía intercambio las transacciones que conduzcan al óptimo. En segundo lugar, deben diseñar las normas de manera que intenten reproducir la solución eficiente cuando los costos de transacción impiden la realización de las transacciones de mercado necesarias para llegar al óptimo (Medema, 1997).

En los años sesenta del siglo pasado, aparecen también, junto a Coase (1960), otros artículos seminales cuya impronta es clave en el devenir del Law and Economics. Es el caso de trabajos Calabresi (1961) sobre responsabilidad civil o Alchian (1965) sobre derechos de propiedad. De este modo, se constituye lo que se denominó el "nuevo Law and Economics", en el que fueron mayoría los economistas y minoría los abogados, y que intentó abrir una nueva etapa de relaciones entre ambos campos, dejando atrás las "viejas" relaciones entre Law y Economics. En este nuevo análisis económico del derecho resultó central la obra de Richard Posner titulada Economic Analysis of Law, publicada en 1973.

3. Responsabilidad civil por vertido de hidrocarburos

Los sistemas de responsabilidad civil además de ser, obviamente, sistemas punitivos tienen un carácter disuasorio. Su existencia incide en la disminución de los comportamientos oportunistas puesto que el hecho de tener que pagar indemnizaciones en el futuro, traslada al presente la preocupación por ello, por lo que le convierte en un mecanismo ex –ante.

Tanto los Estados Unidos como Europa poseen sendos regímenes de responsabilidad. En el país americano rige la Oil Polution Act (OPA 90) la cual recoge gran parte de la legislación federal en materia de responsabilidad civil. Estas medidas son complementadas por las normas aprobadas en cada Estado, las cuales matizan la cuantía del pago o la responsabilidad entre otras características. (Pintos Ager, del Olmo Garcia, 2003). Por otra parte, Europa se rige por el reglamento internacional creado por la OMI (Organización Marítima Internacional) al cual, en 2015, están adscritos 114 Estados y en el que España es miembro del comité ejecutivo desde 1991 (Baena Baena, 2004). Está basado en dos tratados principales: El Convenio Internacional sobre Responsabilidad Civil por Daños Debidos a la Contaminación por Hidrocarburos (CRC/92) y el Convenio de Constitución de un Fondo Internacional de Indemnización de Daños causados por la Contaminación por Hidrocarburos (FUND/92).

En el caso de España, la normativa recogida en ambos convenios prevalece por encima de las leyes nacionales. De hecho, fue esta la aplicada en el macro-juicio celebrado en la Audiencia Provincial de A Coruña.

3.1. Comparativa de los sistemas de responsabilidad, ¿OMI u OPA?

En el juicio celebrado en la Audiencia Provincial de A Coruña tres acusados se sentaron en el banquillo: el capitán y el jefe de máquinas del Prestige y el Ex –director General de la Marina Mercante. Sólo se encontró culpable de un delito de desobediencia grave al capitán del barco, por negarse a que el buque fuese remolcado el 13 de noviembre de 2002, pero esta condena se limita a nueve meses de cárcel y no conllevó responsabilidad civil, por lo que no implicó el pago de daños.

El resultado de la sentencia dejaba sin responsables ni indemnización a una de las mayores catástrofes medioambientales de la historia de España. De los 4.328 millones de euros en daños, sólo se abonaron 151 millones provenientes del fondo de compensación FIDAC. Esto provocó que se alzaran voces críticas reclamando un endurecimiento del régimen internacional a semejanza del estadounidense. Por ello se realizará una comparación entre ambas legislaciones analizando sus puntos clave.

3.1.1. Partes responsables

OMI: en su artículo III atribuye la responsabilidad civil al propietario del buque frente a los damnificados. La responsabilidad en este caso es única, se excluyen a otros posibles agentes como empleados, prácticos, fletadores o tripulantes. En el caso del Prestige, Universe Maritime es la propietaria y armadora del buque, aunque figure que su propietaria, ex datos registrales, fuese la entidad Mare Shipping. El juzgado dictaminó que Universe Maritime era responsable, con carácter responsable y mancomunado, de los daños causados por la marea negra pero no fue citada. No fue posible ya que, aunque se intentó, los numerosos cambios de domicilio y la liquidación de las empresas hasta su desaparición no lo hicieron posible.

OPA 90: En el caso de que el vertido sea causado por un buque petrolero son solidariamente responsables el propietario, el operador y el fletador a casco desnudo. En la catástrofe del Prestige estos tres agentes están representados respectivamente por Mare Shipping, Universe Maritime y Crown Resources .

3.1.2. Limitación de las indemnizaciones

OMI: el propietario del petrolero, como concesión a la responsabilidad objetiva atribuida, puede limitar la cuantía a pagar que depende del tonelaje del buque. El Prestige, con 42.820 toneladas gruesas (GT), se clasificaría en una capacidad de carga de hasta 5.000 unidades de toneladas de registro bruto (TRB), a las que se debe añadir por cada tonelada adicional 420 DEG. En total el fondo limitado atribuible al derrame del Prestige se cerniría entre los 22-24 millones de euros.

OPA 90: los agentes responsables, muchos más que el propietario del barco, no podrán limitar el pago de los daños del accidente si ha existido dolo o culpa atribuible a alguno de ellos. En caso de que no se pruebe esta intencionalidad se puede restringir la cuantía a la mayor de las cuantías siguientes (Pintos Ager y del Olmo García, 2003):

- 1.200$ por TRB
- Buques ≤ 3.000 TRB pagan 2.000.000$ (según el tipo de cambio a 2001 2.702.860 €)
- Buques > 3.000 TRB pagan 10.000.000$ (según el tipo de cambio a 2001 13.514.300 €) Para el Prestige la cantidad atribuible sería de 13.514.300 €.

3.1.3. Atribución de las responsabilidades

OMI: presenta una responsabilidad estricta. El único agente al que se le atribuye responsabilidad en el accidente es el propietario. Sin embargo puede existir causas por las que no se reputa responsable al propietario del buque. Lo son la existencia de guerra y actividades relativas, el perjuicio causado por fenómenos naturales, la acción u omisión de un tercero para causar daños y la negligencia del Gobierno u otras autoridades responsables.

- Fenómenos naturales: el artículo III apartado 2 del CRC/92 se especifica que "No se imputará responsabilidad alguna al propietario si éste prueba que los daños (…) se debieron totalmente (…) a un fenómeno natural de carácter excepcional, inevitable e irresistible". En el juicio existieron diversas voces que defendieron la teoría del que el hundimiento fue provocado por una ola de dimensiones considerables. Un ejemplo de ello fue el testimonio presentado por el perito Tony Browman el cual declaro: "aunque no se sabe de forma exacta lo que ocurrió, lo más probable es que una ola causase el desplome de un elemento estructural". Sin embargo, el juez rechazó esta hipótesis en la sentencia ya que "una ola gigante o extrema que nadie vio, que nadie o nada registró y que no afectó más que a un buque, tal vez sea posible, pero no es demasiado verosímil y, desde luego, no está ni remotamente probada, razón por la cual los argumentos finales de la defensa no abundaron en esa cuestión.".
- Acción u omisión dolosa de terceros: el artículo III del CRC/92 se expone que "No podrá imputarse responsabilidad alguna al propietario si prueba que los daños por contaminación fueron totalmente causados por una acción u omisión intencionada de un tercero para causar daños o fueron totalmente causados por la negligencia u otro acto lesivo de cualquier Gobierno u autoridad responsable (…)" Por lo tanto, se debe probar que el propietario es enteramente culpable y no existe algún otro agente involucrado que comparta responsabilidad en el hundimiento. (Rodríguez Gayán, 2003). Cuando se asignan responsabilidades para el Prestige, pueden haber dos factores claves a los que se les pueda atribuir responsabilidades.

El primero de ellos es el Gobierno por medio del ex -Director General de la Marina Mercante. Sin embargo, en la sentencia del Prestige fue absuelto del delito contra el medio ambiente y espacios naturales protegidos. Para el magistrado la decisión de alejar el barco aumentó la extensión del vertido pero redujo la intensidad de la afectación y permitió recoger el fuel en el mar. La sentencia considera válida la actuación del ex alto cargo porque: "…Nunca se ha dicho hasta ahora cual sea la decisión correcta a tomar y el protocolo a seguir en el supuesto no desdeñable de que se repitiesen hechos similares, ni aun ahora después de una dilatada instrucción y de un largo y árido juicio, ha sido capaz nadie de señalar lo que haya de hacerse aparte de algunas opiniones particulares más o menos técnicas".

El segundo factor está representado en la figura del capitán del barco, acusado de un delito contra el medio ambiente y desobediencia grave el cual solo fue encontrado culpable de esta última, por lo que sólo fue condenado a nueve meses de cárcel. La condena se basó en que el capitán se negó a tomar

remolque a las seis de la tarde del 13 de noviembre de 2002, cuando aún era de día y se podía hacer. Esta decisión agravó el perjuicio creado por el derrame del petrolero. Aunque fue condenado se le esgrimió de cualquier responsabilidad civil, por lo que no debió hacer frente a ninguna indemnización.

Si bien es cierto que el único culpable en el caso del Prestige (el capitán Mangouras) no debió hacer frente a ninguna negociación, también lo es que su culpabilidad dirimió de la responsabilidad de indemnizar al propietario del buque.

Esto es consecuencia de que, en el juicio, se atribuyó un comportamiento negligente a otra parte, por lo que el propietario tampoco debió pagar los daños causados por la catástrofe. De hecho, tan pronto se conoció la sentencia, la aseguradora London P&I Club, retiró los 22,5 millones de euros que depositara en el juzgado coruñés para repartir entre las víctimas .

OPA 90: Según lo regulado en la OPA 90 la responsabilidad es repartida entre varios agentes: el propietario del buque, el operador, los arrendatarios de las instalaciones, los propietarios y operadores de los oleoductos, los propietarios de las instalaciones en tierra y los concesionarios de puertos en mar adentro .

Asimismo, el juez, como valoración de las pruebas se basa en un discernimiento más exigente que los utilizados para los procedimientos mercantiles y civiles comunes, la llamada preponderancia de la evidencia (Álvarez del Castillo Baeza, 1998). En este caso lo que se necesitan son pruebas claras y convincentes de que la causa defendida es realmente cierta y no solo una duda razonable de que así lo pueda ser. Es por preponderancia de la evidencia que se deben probar la existencia de aquellas causas que den lugar a las excepciones de responsabilidad, como son un acto de guerra, la acción u omisión

de una tercera persona o un Acto de Dios .

Como hemos visto en el párrafo anterior, en el caso del Prestige, la atribución de responsabilidad civil al capitán del barco dirimió de responsabilidad a su propietario. Sin embargo, en la aplicación de la OPA 90, bajo la preponderancia de evidencia se necesita tener la certeza absoluta de que la negativa a remolcar el buque provocó o acrecentó el derrame de fuel-oil. Al respecto de ello en la sentencia del Prestige se puede leer que "La responsabilidad civil exigible no puede referirse a las graves consecuencias económicas del vertido de fuel del Prestige (…) de modo que si sólo se considera acreditado el delito de desobediencia, del mismo no se deriva o con el mismo no se han causado los daños y perjuicios derivados del vertido del Prestige". Por lo que, aplicando las normas de la OPA 90, con toda probabilidad esta causa no dirimiría al propietario y a los demás agentes de su responsabilidad.

3.1.4. Daños indemnizables

OMI: en el art. I.6 del Convenio por el protocolo se especifica que "la indemnización (…) estará limitada al costo de las medidas razonables de restauración" las cuales incluyen los costes de limpieza, regeneración, los daños materiales y el prejuicio económico causado a los sectores productivo. No se incluyen daños personales (Pintos Ager y del Olmo García, 2003).

OPA 90: la lista de daños indemnizables es mayor en este caso. En cuanto a los costes de limpieza y regeneración se tienen en cuenta, además de los incurridos por particulares y autoridades, los realizados por los responsables. Además, se incluyen los daños personales y a los bienes de la propiedad afectados, las pérdidas incurridas por las autoridades al dejar de percibir tasas e impuestos de los sectores afectados, los costes de servicios públicos adicionales (como remolcadores, asistencia

sanitaria o prevención de incendios) y el daño causado a los recursos ecológicos por, también, su uso pasivo[1] (Pintos Ager y del Olmo García, 2003).

4. Conclusiones

El perjuicio generado por el hundimiento del Prestige constituye una catástrofe natural de importantes dimensiones económicas y ecológicas. La contaminación generada por una marea negra es un caso típico de efectos externos negativos similares a los analizados por Coase (1960). Si la economía no tiene costes de transacción positivos, los agentes involucrados negociarán y conseguirán llegar a acuerdos que permitan maximizar la producción (o el valor). Esto quiere decir que la asignación de derechos acabará en las manos de quienes más valoren esos derechos, abonando las compensaciones necesarias a los perjudicados. Pero como señala Coase (1960, 1988, 1999), cuando los costes de transacción son positivos, la asignación de derechos inicial es relevante. Como la realidad económica se caracteriza por altos costes de transacción, las leyes y las normas jurídicas juegan un papel fundamental en la asignación de la economía y, específicamente, en la resolución de problemas de externalidades.

Cuando las normas jurídicas importan, también es fundamental garantizar la aplicación de las mismas, pues las normas que no se hacen cumplir son simplemente "palabrería", como destaca Ostrom (2004). En relación a las mareas negras, conviene señalar dos aspectos. En primer lugar, que durante las últimas décadas del siglo XX emergieron un amplio número de Convenios y Protocolos para regular el transporte de mercancías, la contaminación en el mar y las indemnizaciones y responsabilidades por contaminación marítima, y especialmente aquella derivada del transporte de hidrocarburos. Sin embargo, hay que constatar que dicha regulación todavía resulta insuficiente e incompleta, a pesar de los avances existentes, aún con los nuevos convenios aprobados después del caso Prestige. En segundo lugar, la aplicación de las normas existentes es altamente imperfecta, pues exige la intervención de terceras partes (tribunales judiciales), pero estos pueden resultar incapaces de actuar en asuntos altamente complejos, con diversas jurisdicciones, con confluencia de acción de varios tribunales y ante agentes profesionalizados en intentar evitar la acción de la justicia.

Si bien es cierto que los procesos de aplicación de las normas y convenios se caracterizan por altos costes de transacción que dificultan verificar muchos hechos el proceso, también lo es que ante un sistema de responsabilidad más riguroso la comunidad naviera limita los riesgos en alta mar, constituyendo el régimen estadounidense una herramienta contra la lucha por la contaminación marítima, ex – ante y ex – post, más efectiva que el régimen internacional aplicado en Europa. Para Pintos y del Olmo (2003) el régimen de la OPA 90, desde su aprobación, ha contribuido que decreciera en un 50% el número de vertidos de más de 10.000 galones.

En la comparativa establecida en el caso del Prestige, donde las responsabilidades se solventaron muy laxamente sin aparejar pago de indemnizaciones, se observa que en el caso de que España contase con un régimen como el de la OPA 90, aplicando la *preponderancia de la evidencia* no existirían atenuantes por los que librar a los responsables. Por otra parte, los agentes involucrados en el

[1] El valor pasivo valora monetariamente la mera existencia de un recurso natural, así como también el aprovechamiento futuro que puedan hacer las nuevas generaciones de él.

hundimiento no se limitarían solo al propietario si no que operarios o armadores serían responsables también. Además, la cuantía de indemnización aumentaría al contabilizar en el recuento de daños los perjuicios personales, las tasas e impuestos dejados de percibir y el daño ecológico suscitado en un sentido amplio.

A pesar de las reformas acaecidas en los convenios de la OMI después de la catástrofe del Prestige, estas se caracterizan por ser insuficientes al no contar con un nivel de exigencia de igual o mayor grado que el de la OPA 90. En el caso de que otro vertido de las dimensiones del Prestige sucediera, España seguiría contando con una regulación aplicable laxa donde la atribución de responsabilidades no es la adecuada para asignar sobre quiénes y cuánto se deben soportar los costes de la contaminación.

Referencias

1. Alchian, A. A. Some Economics of Property Rights, *Il Politico* **1965**, *30*, 816-829.
2. Álvarez del Castillo Baeza, J. La responsabilidad ambiental en el transporte de hidrocarburos por el mar en *La responsabilidad jurídica en el daño ambiental*, 1ª ed; Instituto de investigaciones jurídicas; Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1998; Volumen 87.
3. Baena Baena, P.J. Reflexiones sobre la responsabilidad civil por daños causados por contaminación marítima de hidrocarburos. *Derecho de los negocios* **2004,** *161*, 5-17.
4. Caballero, G. La Nueva Economía Institucional. *Sistema* **2001**, *156*, 59-86.
5. Caballero, G. El programa de la Nueva Economía Institucional: lo macro, lo micro y lo político. *Ekonomiaz* **2002**, *50*, 230-261.
6. Calabresi, G. Some Thoughts on Risk, Distribution and the Law of Torts. *Yale Law Journal* **1961**, *68*, 499-553.
7. Coase, R.H. The Nature of the Firm. *Economica* **1937**, *4*, 386-405.
8. Coase, R.H. The Problem of Social Cost. *Journal of Law and Economics* **1960**, *3*, 1-44.
9. Coase, R. H. *The Firm, the Market and the Law*. University of Chicago Press: Chicago. USA. 1988.
10. Coase, R. H. An Interview with Ronald Coase. *ISNIE Newsletter* **1999**, 2, N. 1, 3-10.
11. Kingston, C.; Caballero, G. Comparing theories of institutional change. *Journal of Institutional Economics* **2009**, *5*, 151-180.
12. Medema, S. (ed). *Coasean Economics: Law and Economics and the New Institutional Economics*. Kluwer Academic Publishers: Boston. Estados Unidos. 1997.
13. Menard, C.; Shirley, M. (ed) *Handbook of New Institutional Economics*. Springer: Dordrecht, Países Bajos, 2005.
14. Ostrom, E. Rules without enforcement are but words on paper. *IHDP* **2004**, 2, 8-12.
15. Pintos Ager, J.;del Olmo García, Pedro. Responsabilidad civil por vertido de hidrocarburos. *Indret: Revista para el Análisis del Derecho* **2003**, *1*.
16. Rodríguez Gayán, E.M. Claves de derecho privado en el asunto Prestige. *Revista Española de Derecho Internacional* **2003**, *LV*, 117-147.
17. Williamson, O. E. *The Economics Institutions of Capitalism: Firms, Markets, Relational contracting*. The Free Press: Nueva York. Estados Unidos. 1985.

La colaboración público-privada como mecanismo de asignación eficiente de riesgos

Martínez-Caraballo, Noemí [1], Muñoz-Sánchez, Fernando [1,*] y Rosell-Martínez, Jorge [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza. Emails: noemar@unizar.es (NMC), fmunoz@unizar.es (FMS) y jrosell@unizar.es (JRM)

***** Autor principal y responsable del trabajo; E-Mail: fmunoz@unizar.es (FMS).

Abstract: Los acuerdos de colaboración entre el sector público y privado (CPP) son mecanismos utilizados para proveer servicios públicos en diversos sectores. El Libro Verde de la Comisión Europea sobre CPP (2004) indica que CPP es un término que "*se refiere a las diferentes formas de cooperación entre las autoridades públicas y el mundo empresarial, cuyo objetivo es garantizar la financiación, construcción, renovación, gestión o el mantenimiento de una infraestructura o la prestación de un servicio*", y como sus principales características se resaltan las siguientes: (i) duración relativamente larga de la relación, (ii) el modo de financiación del proyecto, en el que el socio privado adopta un papel relevante, (iii) el socio privado participa a lo largo de las diferentes etapas del proyecto (diseño, realización, ejecución y financiación), y (iv) el reparto de los riesgos entre el socio público y el socio privado. El presente trabajo se centrará en este último punto, el reparto de riesgos, por ser uno de los más relevantes. El objetivo es estudiar cómo los acuerdos de CPP pueden ser una fórmula útil para conseguir una adecuada asignación de los riesgos en la provisión de servicios de Defensa.

Keywords: Colaboración Público-Privada; Defensa; Asignación de riesgos.

1. Introducción

Los acuerdos de colaboración entre el sector público y privado han sido una fórmula utilizada en la provisión de diferentes servicios públicos tales como educación, sanidad o servicios locales, entre otros, y la literatura académica se ha ocupado de analizar este fenómeno. En el ámbito de la defensa también se han utilizado este tipo de acuerdos (especialmente en Reino Unido y Estados Unidos); sin embargo, la literatura que trata la CPP en defensa es escasa en comparación con los estudios existentes para otros sectores.

Uno de los principales beneficios que se atribuye a la CPP es el ahorro de recursos. Tang et al. (2010) identifica varias fuentes para esos ahorros: i) el sector público puede concentrarse en sus competencias clave y usar la CPP para gestionar proyectos en los que no tiene experiencia; ii) el sector privado puede mejorar la eficiencia con la que los activos públicos pueden ser operados; iii) la CPP permite al sector público explotar las habilidades, experiencia, tecnología e innovación del sector privado; y finalmente, iv) los sectores privado y público pueden compartir riesgos en las diferentes etapas del proyecto. Este último aspecto es especialmente relevante. De hecho, algunos autores como Li et al. (2005) ponen de manifiesto que, aunque en un primer momento la CPP fue considerada una buena manera de proveer servicios públicos recortando el gasto público y evitando de este modo las restricciones de los límites de endeudamiento del sector público, hoy las razones para la CPP han cambiado, siendo ahora vista como una nueva aproximación para conseguir una asignación eficiente de los riesgos.

En esta comunicación, perseguimos identificar los riesgos relevantes para los acuerdos de CPP en el ámbito de la defensa. Además, queremos analizar cómo deberían ser asignados estos riesgos entre los sectores público y privado para conseguir una adecuada gestión del riesgo y si el uso de acuerdos de CPP permite esa asignación eficiente. Este tema es relevante en el sector de la defensa. De hecho, la OTAN (Organización del Tratado del Atlántico Norte) ha creado un grupo de trabajo para elaborar un informe técnico que lleve a cabo un estudio comparativo, cualitativo, que sea la base para establecer un marco que defina la naturaleza y utilidad de la CPP para su adopción a nivel OTAN[1].

En este sentido, la importancia y relevancia de este artículo está justificada. Para cumplir los objetivos perseguidos, llevaremos a cabo una revisión de la literatura académica y de informes profesionales (el anexo I contiene un resumen de los trabajos revisados).

El resto de la comunicación se estructura como sigue: en la segunda sección, llevamos a cabo una revisión de la literatura sobre la gestión de riesgos en la CPP fuera del sector de la defensa; en tercer lugar, llevaremos a cabo el mismo análisis pero focalizado en defensa. Finalmente, mostraremos las principales conclusiones que se pueden extraer de dicha revisión.

2. La asignación de riesgos en los acuerdos de CPP

Uno de los aspectos de la CPP que más ha captado la atención de la literatura académica ha sido precisamente la asignación de los riesgos relevantes para los acuerdos de CPP. Normalmente la cuestión a dilucidar es cómo distribuir esos riesgos entre los participantes directos del proyecto, esto es, entre la parte pública y privada. Una asignación eficiente de los riesgos implica que cada riesgo tiene que quedar en manos de la parte que mejor puede gestionarlo. Este último punto es relevante dado que una excesiva transferencia de riesgos del socio público al socio privado podría conducir a un precio muy elevado que hiciera de la CPP una mala opción para la provisión del servicio en cuestión.

Se podrían destacar muchos trabajos que analizan esta cuestión fuera del ámbito de la defensa. En general, todos ellos proceden de modo similar. En primer lugar, identifican los riesgos que pueden ser relevantes en los acuerdos de CPP objeto de estudio. A continuación para determinar la probabilidad de ocurrencia de cada riesgo, el impacto que podría tener en caso de su posible materialización y quién

[1] Technical group SAS-112/RTG-052 “Comparative Analysis of Private-Public Partnership in the Management of Military-Industry Activities”.

debería gestionarlo, si la parte pública o la parte privada, proceden con un cuestionario que distribuyen entre una muestra de expertos, en la que se suelen incluir representantes tanto de la parte pública como de la parte privada e incluso académicos. Debido a la brevedad que implican las normas de estilo de la presente comunicación vamos a comentar únicamente dos de esos trabajos, aunque existen muchos otros. Lo interesante de analizar la literatura no focalizada en defensa es que está mucho más desarrollada, y muchos de los riesgos que son válidos para acuerdos de CPP en sectores diferentes, aplican también en defensa. De hecho, Oudot (2005) (trabajo que comentaremos en la siguiente sección), que lleva a cabo un estudio focalizado en defensa, identifica categorías de riesgos donde se pueden clasificar del mismo modo los riesgos presentes en los acuerdos de CPP fuera de defensa; o por ejemplo, Kwak & Smith (2005) apuntan que "*la complejidad y dinámica de los proyectos de defensa implican riesgos técnicos, legales y políticos*" (todos ellos categorías de riesgos presentes en acuerdos de CPP de infraestructuras, por ejemplo).

Li et al. (2005) analizan las preferencias en cuanto a asignación de riesgos en los acuerdos de CPP en Reino Unido. Su muestra de estudio abarca gran variedad de proyectos de construcción gestionados mediante CPP incluyendo hospitales, transporte, suministro de agua y saneamiento, energía, vivienda y oficinas, comisarías y prisiones, colegios y otras instalaciones educativas. En cuanto a los riesgos a considerar los clasifican en 3 grandes niveles (macro, meso y micro) en los que incluyen hasta 46 factores de riesgo. Los riesgos macro se definen como riesgos exógenos al proyecto asociados con las condiciones políticas y legales, las condiciones económicas, las condiciones sociales y/o las condiciones naturales (en la categoría macro se consideran 17 factores de riesgo). Los riesgos meso son endógenos y están relacionados con problemas de implementación del proyecto. Dentro de los riesgos meso se consideran 5 grupos de factores de riesgo –selección del proyecto, financiación del proyecto, diseño, construcción, operación y riesgo residual– en los que se incluyen hasta 21 factores de riesgo. Finalmente, los riesgos micro hacen referencia a las relaciones que se establecen entre los diferentes *stakeholders* (todos aquellos agentes que participan en el proyecto) en la provisión mediante un acuerdo de CPP y se consideran 2 grupos –relacional y terceros– formados por 8 factores de riesgo.

Los autores consideran 4 posibles categorías en cuanto a la asignación del riesgo: (1) el riesgo debería ser asignado al sector público; (2) el riesgo debería ser asignado al sector privado; (3) el riesgo debería ser compartido por los sectores público y privado; y (4) la asignación de riesgos depende fundamentalmente de las circunstancias individuales de cada proyecto. A partir del análisis de una muestra de 53 cuestionarios (15 del sector público y 38 del sector privado), llegan a las siguientes conclusiones: el sector público debería retener los riesgos de "disponibilidad de la ubicación" (riesgo meso) y los riesgos políticos (riesgos macro), mientras que el sector privado debería gestionar la mayor parte de los riesgos meso (los que dependen del proyecto); y ambas partes deberían compartir los riesgos micro, los riesgos de fuerza mayor (acontecimientos imprevistos como una huelga de los trabajadores) y de cambios en la legislación (estos dos últimos, riesgos macro). También identifican cuatro factores de riesgos difíciles de asignar a una de las partes y para los cuales su asignación debería ser analizada de forma individual para cada proyecto. Se trata de: nivel de apoyo por parte del sector público (micro), aprobación y permisos del proyecto (meso), modificaciones contractuales (meso) y falta de experiencia (micro).

Otro trabajo interesante en este contexto es el desarrollado por Chan et al. (2011), que identifican y valoran los principales factores de riesgos de los acuerdos de CPP en China. Para ello, analizan 105 cuestionarios para conocer la diferente percepción de los riesgos. Los cuestionarios los distribuyen entre representantes del sector público y privado y entre académicos y profesionales. Los autores llevan a cabo una exhaustiva revisión de la literatura e identifican hasta 34 factores de riesgo que clasifican en 10 categorías: riesgos políticos (como por ejemplo corrupción del gobierno, expropiación o intervención del gobierno), riesgos económicos (ejemplos: fluctuación de los tipos de interés, inflación, fluctuación de los tipos de cambio), riesgos legales (cambio en la legislación), riesgos sociales (oposición política o pública), riesgos naturales (riesgos medioambientales o de fuerza mayor), riesgos de construcción (riesgo de finalización o no disponibilidad de material/mano de obra), riesgos operacionales (cambios en el proyecto, sobrecostes operativos), riesgos de mercado (competición en el mercado o cambios en la demanda del mercado), riesgos relacionales (riesgos de organización y coordinación) y otros riesgos (riesgos contractuales o falta de infraestructuras de apoyo). El cuestionario en cuestión examina la importancia relativa de cada factor de riesgo y en manos de quién debería estar su gestión.

Los resultados obtenidos indican que los factores de riesgo político son los más críticos para el éxito de los acuerdos de CPP (el top 3 de los factores más relevantes sería: intervención del gobierno, corrupción del gobierno y un pobre proceso de toma de decisiones en el sector público). Otro resultado interesante del trabajo es que no se detectan diferencias significativas entre las partes privada y pública y académica y profesional, respecto a qué factores de riesgo son más relevantes. Además, se encuentra que, en términos generales, las partes pública y privada están de acuerdo en cuanto a la asignación de riesgos. De este modo, el sector privado debería gestionar los factores de riesgo de construcción, operativo, relacionales y económicos. Por su parte, el sector público debería encargarse de los riesgos políticos, legales y sociales. El resto de factores de riesgo deberían ser compartidos por ambos sectores.

3. La gestión del riesgo en los acuerdos de CPP en defensa

El análisis de riesgos en un contexto de CPP en defensa es un tema que ha sido escasamente estudiado en la literatura académica. Entre los pocos trabajos que hemos encontrado podríamos destacar los artículos de Oudot (2005, 2010) [2] y un informe de la NAO[3] (*National Audit Office, 2008*) del Reino Unido.

Oudot (2005) presenta un marco teórico basado en el modelo principal-agente para analizar la asignación de riesgos en los acuerdos de CPP y analiza cómo se trata la asignación de riesgos para una muestra de contratos entre la *Délégation Générale pour l'Armement (DGA)* (organismo en Francia encargado de contratar) y empresas privadas. En este marco de análisis, la DGA sería el principal y las empresas privadas serían el agente y, para determinar si un riesgo se transfiere al agente o lo retiene el principal, habría que contemplar tres criterios, dos de los cuales se extraen de la teoría principal-agente y otro tiene

[2] En realidad Oudot no estudia contratos de CPP (a pesar de lo que parezca a partir del título de su trabajo), sino otras figuras contractuales presentes en la legislación francesa. No obstante, Oudot indica que muchos de los riesgos presentes en los acuerdos de CPP, también están presentes en otros mecanismos de contratación, y que los resultados obtenidos para esos mecanismos aplicarían del mismo modo para acuerdos de CPP. Por ello, vamos a estudiar de forma más breve las aportaciones de Oudot frente al informe elaborado por la NAO que sí que se centra en el estudio de este tipo de acuerdos.

[3] La NAO es la oficina que monitoriza el gasto público en nombre del Parlamento del Reino unido.

su origen en las características especiales que tiene el sector de la defensa. Oudot (2005) identifica cinco tipos de riesgo en el sector de la provisión de los servicios de defensa: *riesgo tecnológico, riesgos contractuales, riesgos industriales, riesgos financieros y riesgos de retraso.* Tras analizar una muestra de contratos entre la DGA y empresas del sector privado, concluye que el proceso de asignación de riesgos ha sido muy pobre y que en el Ministerio de Defensa francés se tiene una propensión a maximizar la asignación de riesgos a la parte privada y no se busca un reparto óptimo del riesgo.

Oudot (2010) profundiza en el análisis de riesgos en los contratos firmados en el sector de la defensa de Francia, en este caso, prestando especial atención a su efecto sobre la performance de estos contratos. Para una muestra de 48 contratos, estudia que categoría de riesgo (considera 4: riesgos tecnológicos, riesgos contractuales, riesgos industriales y riesgo financiero directo) tiene un efecto más relevante sobre la performance del contrato (considera tres dimensiones de *performance*: financiera, temporal y técnica). La *performance* financiera del contrato se mide mediante la existencia de sobrecostes (un contrato tiene una mejor performance financiera conforme menor sea el sobrecoste existente). El autor determina que, en el 87% de los contratos, existen sobrecostes. Con respecto a la *performance* temporal, Oudot determina que en el 92% de los contratos de la muestra se dan retrasos. Parece que los resultados para la *performance* técnica son mejores que en las otras dos categorías, dado que únicamente en el 17% de los contratos se observan gaps entre la calidad especificada y entregada. Para las tres dimensiones de *performance* se encuentra que los riesgos contractuales son los más relevantes.

Finalmente, Oudot (2010) determina el top 10 de los acontecimientos críticos para los contratos firmados en defensa en Francia. Este top 10 incluye dentro del grupo de riesgos contractuales: "*fallo en los equipos suministrados por el gobierno*", "*cambios post-contractuales en los requisitos*", "*cuestiones derivadas de la interdependencia entre contratos*"; dentro del grupo de riesgo tecnológico están: "*subestimación de la complejidad de los equipos a suministrar*" y "*falta de capacidad técnica por parte de los subcontratistas*"; en el grupo de riesgos industriales aparecen: "*deficiencias en la capacidad de gestión de los contratistas*" y "*deficiencias en la capacidad de gestión de los sub-contratistas*"; y finalmente, dentro de los factores de riesgos financieros se encuentran: "*la decisión por parte del ejército de recortar fondos*" y "*la congelación de los recursos por parte del ejército*".

Un documento muy interesante en este ámbito es el informe elaborado por la NAO en el año 2008 para una muestra de contratos de defensa PFI (*Private Finance Initiative*)[4] del Reino Unido. Este estudio resulta especialmente relevante dado que aborda las cuestiones planteadas en la presente comunicación de forma directa. Reino Unido es el mercado donde más extendido está el uso de los acuerdos de CPP en el ámbito de la defensa. En concreto, en dicho informe se estudia si ha habido una asignación y gestión eficientes del riesgo en los proyectos PFI del departamento de defensa, basándose en el análisis de ocho casos. En 2007, el Ministerio de Defensa era el cuarto usuario de este tipo de acuerdos en Reino Unido (había hasta 47 casos de PFIs en defensa). De esos 47 casos, se seleccionan 8 representativos de las diferentes categorías en los que se pueden clasificar esos acuerdos PFIs. En concreto, encontramos: dos proyectos relacionados con equipamiento (uno relacionado con el servicio de transportar tanques y otros

[4] PFI es un tipo de acuerdo de CPP muy extendido en el Reino Unido, definido por la NAO como "*una política introducida por el gobierno en 1992 para aprovechar la pericia y la gestión del sector privado en la prestación de servicios públicos, mientras se reduce el impacto del endeudamiento público*".

equipamientos pesados tanto en tiempos de paz como en operaciones y otro relativo a la provisión de 1347 grupos electrógenos para apoyar los requerimientos eléctricos operativos en el campo); dos proyectos relacionados con entrenamiento (uno relativo a la provisión de simuladores de vuelo y entrenamiento para el *Chinook Mk2/2A y Mk3, el Merlin Mk3 y el Puma Mk1* y otro relativo a entrenamiento en la conducción de vehículos blindados del ejército como por ejemplo el *Challenger II Main Battle Tank*); dos proyectos dentro de la categoría alojamiento (uno relacionado con el desarrollo y rehabilitación del edificio principal del Ministerio de Defensa y otros edificios y otro relativo al desarrollo de nuevas instalaciones para el "*The Defence Animal Centre*"); y dos proyectos dentro de la categoría otros (uno relativo a la racionalización y mejora de la eficiencia de los servicios de telecomunicaciones fijas existentes y otro relativo al suministro de agua y alcantarillado a las instalaciones militares de *Tidworth*). Para cada uno de estos casos, se estudia si ha habido una adecuada gestión del riesgo, y si algunos de esos riesgos han provocado algún problema en la obtención del mejor *value-for-money*[5].

En el informe de la NAO se evalúan 10 factores de riesgos claves, agrupados en tres categorías. Dentro de la categoría *diseño y entrega del proyecto* se incluyen 2 factores de riesgo: i) la *especificación del activo o servicio* definido como "el fracaso en especificar adecuadamente el activo o el servicio que va ser prestado así como que el servicio no cubra correctamente las necesidades y demandas de los usuarios y ii) *entrega de una solución PFI* definido como "el fracaso en la entrega de una solución PFI en la fase de contratación o después de que un contrato sea firmado, fracaso en la implementación del servicio requerido en los términos especificados, en los tiempos establecidos en los contratos o dentro del presupuesto establecido por el departamento". Dentro de la categoría *entrega del servicio a lo largo de la vida del contrato* se incluyen 4 tipos de riesgos: i) *prestación del servicio* definido como "fracaso al prestar el servicio de acuerdo con las normas establecidas en el contrato"; ii) *satisfacción de los usuarios y demás stakeholders con la prestación* haciendo referencia a "los usuarios no está satisfechos, o la satisfacción no es valorada para asegurar el *value-for-money* desde la perspectiva de los usuarios"; iii) *defectos tecnológicos y latentes* definidos como "la tecnología que está siendo usada para proveer el activo o servicio podría no ser adecuada a lo largo de toda la vida del contrato, debido a un inadecuado diseño o a un uso inesperado o mal uso por parte del usuario"; iv) *medio ambiente y seguridad* haciendo referencia a que "la seguridad de los activos físicos e información podría quedar comprometida por un inapropiado diseño del proyecto o por temas de gestión. Problemas medioambientales esperados o inesperados (tales como contaminación militar por fugas de combustible o contaminación por el uso de determinados tipos de armas), podrían afectar a la entrega segura y efectiva del servicio". Dentro de la categoría *proceso de gestión del contrato* encontramos: i) *control de la performance y modelos de gestión* haciendo referencia a que "mecanismos de performance inadecuados en el contrato podrían no proporcionar el suficiente incentivo al contratista para la entrega del servicio especificado en el contrato"; ii) *relaciones con los contratistas* definido como "malas relaciones entre el contratista y el sector público que pueden tener un impacto en la entrega del servicio lo que podría afectar al *value-for-money*; iii) *recursos y habilidades*, referidos a "insuficientes recursos, incluyendo recursos humanos (capacidad del personal, habilidades, reclutamiento y retención) o inadecuada capacidad financiera para

[5] Por *value-for-money* se entiende "*la consecución de una combinación óptima a lo largo de la vida del proyecto de coste y calidad que cumpla con los requerimientos de los usuarios*" (Fuente: *NAO report (2008)*).

gestionar o proveer el contrato de forma efectiva"; y iv) *procesos de gestión de riesgos* referidos a "fracaso para implementar sistemas adecuados para monitorizar y gestionar riesgos en curso para la entrega del servicio".

Tras llevar a cabo un estudio del caso para cada uno de los casos considerados, el informe de la NAO concluye que en términos generales se ha conseguido una adecuada gestión del riesgo obteniendo un buen *value-for-money* en la gestión de los proyectos. No obstante detectan algunos problemas en algunos de los casos analizados. Concretamente para el riesgo, "*especificación del activo o servicio*" se detectó un riesgo significativo para el *value-for-money* en la fase de provisión pero no en la fase operativa. Este factor de riesgo generó problemas en dos de los contratos analizados lo que provocó que uno de los contratos tuviera que ser cancelado (el relativo al entrenamiento en la conducción de vehículos blindados) y el otro tuviera que ser renegociado durante la fase de contratación (el del *Defence Animal Centre)*. En estos casos, se determina que uno de los aspectos clave que dificulta la consecución de una adecuada *especificación del activo o servicio*, es la falta de información[6].

Otro aspecto que se aborda en el informe es la asignación de riesgos entre las partes del contrato PFI. En dicho apartado se lleva a cabo una descripción de como procede el Ministerio de Defensa del Reino Unido a la hora de determinar cómo se asignan los riesgos entre las partes implicadas en los acuerdos de CPP. Este proceso requiere tanto de un análisis como de una negociación entre las potenciales empresas colaboradoras y las autoridades públicas, para garantizar que se consigue un adecuado reparto de riesgos que satisface a las partes implicadas. La decisión respecto de quién está en mejor situación para gestionar un riesgo podría basarse bien en la valoración de las competencias de cada parte o en un registro de cómo cada parte ha gestionado un determinado riesgo o bien en determinar qué parte puede controlar mejor las factores que configuran un riesgo (por ejemplo, el riesgo de construcción podría ser gestionado por la parte privada puesto que está en una mejor posición para controlar determinados factores como la *performance* de los subcontratistas). Otro aspecto que reseñan en el informe de la NAO es que una excesiva transferencia de riesgo a la parte privada podría poner en peligro la consecución de un óptimo *value-for-money* dado que en dicha situación el socio privado podría exigir un mayor precio para gestionar riesgos para los cuales no siente que tenga la habilidad o los procedimientos adecuados.

Para ilustrar este proceso de asignación de riesgos analizan el caso concreto relativo a la provisión de 1347 grupos electrógenos para apoyar los requerimientos eléctricos operativos en el campo. En este ejemplo el contratista fue *Vickers Specialist Engines*, que aceptó el riesgo de ser capaz de proveer el máximo número de generadores requerido para proporcionar el nivel global de servicio requerido. Algunos de los riesgos clave que fueron transferidos al contratista incluyen: el riesgo de disponibilidad y de *performance*, el retraso en la entrega, costes operativos a lo largo de toda la vida de los generadores, costes de mantenimiento programado, disponibilidad y entrega de electricidad extra (a los centros de distribución), demanda en exceso sobre los requerimientos mínimos y valor residual del activo. Entre los riesgos clave retenidos por el sector público encontramos: la especificación del activo, la especificación del nivel de servicio y uso del mismo, y que los niveles esperado y máximo de servicio

[6] La limitación de espacio que impone las normas de estilo de la presente comunicación hace que no nos podamos extender más en recoger los resultados mostrados en el informe de la NAO. No obstante, en dicho informe se puede acceder a una evaluación pormenorizada de cada riesgo y de cada proyecto, que puede resultar de gran interés para el lector.

disponible, fueran una representación real de las verdaderas necesidades. En el *Public Sector Comparator* –documento que se tiene que elaborar para mostrar que una opción de CPP ofrece mejor *value-for-money* que otras opciones– se estimó que el valor de los riesgos transferidos bajo una opción PFI era equivalente aproximadamente a 10 millones de £. Como referencia, el VAN del proyecto bajo una fórmula PFI se estimó en 98,3 millones de £.

4. Conclusiones

Una adecuada asignación de riesgos para conseguir una eficiente gestión de los mismos es uno de los aspectos más interesantes que ofrecen los acuerdos de CPP. Existen muchos estudios que identifican, valoran y asignan los riesgos entre la parte pública y privada para acuerdos de CPP fuera del sector de la defensa. Aquí hemos mostrado algunos ejemplos. En defensa, también se han usado este tipo de fórmulas; sin embargo, desde la literatura no se han dedicado tantos esfuerzos a su análisis. En la presente comunicación se han mostrado algunos ejemplos para ilustrar la relevancia de realizar una adecuada asignación de riesgos. Los estudios de Oudot revelan como la no adecuada asignación de los riesgos afecta a la *performance* de los contratos. Por su parte, en el informe de la NAO para el caso británico se aporta abundante información con casos concretos que pueden ser usados como guía o ejemplo de cómo asignar y gestionar adecuadamente los riesgos, y de los problemas que pueden dificultar esa adecuada asignación y gestión. La revisión de la literatura realizada resulta de interés para abordar el reparto de riesgos en los acuerdos de CPP que se implementen en el seno del Ministerio de Defensa español.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la ayuda recibida a través de los grupos de investigación “CIBER” y “CREVALOR” financiados por la DGA-FSE, del proyecto de investigación del Ministerio de Educación y Ciencia ECO2014-59688-R y del proyecto de investigación 2013-20 del CUD de Zaragoza.

Referencias

Chan, A.; Yeung, J.; Yu, C.; Wang, S.; Ke, Y. Empirical study of risk assessment and allocation of Public-Private Partnership projects in China. *Journal of Management in Engineering* **2011**, *27*, 136-148.

Kwak, Y.H.; Smith, B.M. Managing risks in mega-defense acquisition projects: performance, policy, and opportunities. *International Journal of Project Management* **2009**, *27*, 812-820.

Li, B.; Akintoye, A.; Edwards, P.J.; Hardcastle, C.; The allocation of risk for PPP/PFI construction projects in the UK. *International Journal of Project Management* **2005**, *23(1)*, 25-35.

National Audit Office. Allocation and management of risk in Ministry of Defence PFI projects. Report by the controller and auditor general, HC 343, session 2007-**2008** (30 de octubre de 2008).

Oudot, J.M. Risk-allocation: theoretical and empirical evidences, application to public-private partnerships in the defence sector. In the 9th annual conference of the institutions of market exchange, Barcelona, Spain **2005**.

Oudot, J.M. Performance and risks in the defence procurement sector. *Journal of Public Policy* **2010**, *30(2)*, 201-218.

Tang, L.; Shen, Q.; Cheng, E.W. A review of studies on Public-Private partnership projects in the construction industry. *International Journal of Project Management* **2010**, 28*(7)*, 683-694.

Anexo I: Breve descripción de los trabajos revisados

Trabajo	Planteamiento	Resultados
Li et al. (2005)	46 factores de riesgo identificados en las siguientes categorías y subcategorías: - Riesgos macro (exógenos al proyecto): políticos, políticas del gobierno, macroeconómicos, legales, sociales y naturales. - Riesgos meso (problemas relacionados con la implementación del proyecto): selección de proyectos, financiación del proyecto, riesgo residual, diseño, construcción y operación. - Riesgos micro (relaciones entre *stakeholders*): relacionales y de terceros.	- El sector público debería gestionar el riesgo "disponibilidad de la ubicación" (meso) y los riesgos políticos (macro). - El sector privado debería retener la gestión de la mayor parte de los riesgos meso. - El sector público y privado deberían compartir la gestión de los riesgos micro y de dos factores de riesgo macro (fuerza mayor y cambios legislativos). - Se identifican 4 factores de riesgo difíciles de asignar: nivel de apoyo del sector público (micro), aprobación y permisos del proyecto (meso), modificaciones contractuales (meso) y falta de experiencia (micro).
Oudot (2005)	Se desarrolla un marco teórico basado en el modelo principal-agente para analizar la asignación de riesgos en los acuerdos de CPP y se estudia cómo se asignan los riesgos en una muestra de contratos entre la "*Délégation Générale pour l'Armament" (DGA)* y empresas privadas. Además, se identifican 5 áreas de riesgo especialmente relevantes para el sector de defensa: riesgo tecnológico, contractual, industrial, financiero y de retraso.	Con este marco de análisis, en el que se establecen una serie de criterios y principios para asignar los riesgos, y para contratos en los que la DGA sería el principal y las empresas contratistas el agente, Oudot concluye que el proceso de asignación de riesgos ha sido muy pobre, y que, en la muestra analizada, el sector público tiende a maximizar la transferencia de riesgos desde el sector público al privado, no buscando una asignación óptima de los mismos.
NAO (2008)	Se estudia la asignación y gestión de riesgos para 8 casos de CPP del Ministerio de Defensa (MoD) de Reino Unido, relativos a equipamiento, entrenamiento, alojamiento y otros. Se evalúan 10 factores de riesgo relevantes dentro de las siguientes categorías: • Diseño y entrega del proyecto. • Entrega del servicio durante la vida del contrato. • Proceso de gestión del contrato. También se muestra el procedimiento que sigue el MoD en la asignación del riesgo entre las partes implicadas en los acuerdos de CPP.	Se concluye que la asignación de riesgos fue en términos generales óptima, no poniendo en riesgo la obtención de un buen *value-for-money* en la gestión de los proyectos. Sí que se observó en dos de los contratos problemas surgidos en la especificación del activo o servicio, lo que supuso la renegociación de uno y la cancelación del otro. La decisión de quién debería gestionar un riesgo podría basarse o bien en la valoración de las competencias de cada parte, o bien en un registro de cómo cada parte ha gestionado un determinado riesgo, o bien en determinar qué parte puede controlar mejor los factores que configuran un riesgo. Finalmente, muestran un caso de cómo se asignaron los riesgos entre el contratista y la parte pública.
Oudot (2010)	En este trabajo, Oudot profundiza en el análisis de riesgos en los contratos firmados entre la DGA y contratistas privados. Considera 4 grandes áreas de riesgo: • Riesgos contractuales • Riesgos tecnológicos • Riesgos industriales • Riesgos financieros También estudia cómo esos riesgos afectan a la *performance* del contrato. Analiza una muestra de 48 contratos, considerando 3 dimensiones en la performance del contrato: financiera, temporal y técnica.	1º. Los riesgos contractuales fueron la principal causa de que el 87% de los contratos sufriera sobrecostes, el 92% experimentara retrasos y que en el 17% de los casos hubiera un gap en los aspectos técnicos. 2º. Se identifican como principales factores de riesgo, los siguientes: - Contractuales: fallos en los equipos suministrados por el sector público, cambios post-contractuales en los requisitos y problemas debidos a la interdependencia de los contratos. - Tecnológicos: subestimación de la complejidad de los equipos a suministrar y falta de capacidad técnica por parte de los subcontratistas. - Industriales: deficiencias en las capacidades de gestión de contratistas y subcontratistas. - Financieros: el recorte y congelación de recursos por parte del sector público.
Chan et al. (2011)	34 factores de riesgo identificados en 10 categorías: Riesgos políticos, económicos, legales, sociales, naturales, construcción, operacionales, de mercado, relacionales y otros factores de riesgo.	- Los 3 riesgos más relevantes son: intervención del gobierno, corrupción del gobierno y un pobre proceso de toma de decisiones del sector público. - El sector privado debería gestionar los riesgos de construcción, operacionales, relacionales y económicos. - El sector público debería retener la gestión de los riesgos políticos, legales y sociales. - El resto de riesgos deberían ser compartidos.

Buscando las claves para una nueva organización social en la era post-información

Fernández Hermida, Xulio *

* EE de Telecomunicación de Vigo. Email: xuliofh@uvigo.es (XFH)

Abstract: Vivimos un tiempo de cambios de un alcance difícil de imaginar. De la mano de la digitalización llegamos a una globalización que lo está cambiando todo y en todos los ámbitos [1] [13]. La sociedad post-Información de dentro de 50 años va a tener poco que ver con la sociedad industrial que vivimos en el siglo XX. La era de la información ya está en su plenitud. Es de suponer que muchos de los elementos que serán parte consustancial de la sociedad post-información están ahora en plena ebullición. En el artículo intento dar un repaso a vista de pájaro de algunos de estos elementos y así dar visibilidad al papel que estos elementos pueden llegar a jugar en esta nueva sociedad con humanos moviéndose entre artefactos y artefactos moviéndose entre humanos. Pasaremos a una sociedad de humanos y artefactos, la sociedad post-información, en tan sólo una generación: la nuestra.[6] [7] [8] Y los que ahora estamos en posiciones de influir en la sociedad tenemos el deber ineludible de encauzar el tránsito que nuestros hijos habrán de realizar.

Keywords: Software libre; Sensor de conciencia; Big data; Dinero; Conciencia; Conocimiento; Web semántica; Paradigma de funcionamiento social; Revolución de la información; Biología de los sistemas vivos.

1. Introducción

El ánimo de este artículo es buscar los elementos que están apareciendo y su potencialidad. Intentar visualizar como se puede conjugar lo que con todo ello podamos hacer con las

potencialidades y debilidades del Ser humano y como podríamos llegar a una nueva organización social con el mínimo de violencia y sufrimiento.

Con las Tecnologías de la información, la integración electrónica, la sociedad de mercado y los desarrollos en abierto tenemos ante nosotros una situación que recuerda a las piezas del puzzle que era necesario unir, en el Proyecto Manhattan, para construir la bomba atómica que puso fin a la Segunda Guerra Mundial como se recrea en la película Creadores de sombras [11].

En este caso, la potencialidad de las piezas (apartados 2, 3 y 4) es muchísimo mayor que las de la bomba atómica; lo que nos coloca entonces en una posición de enorme responsabilidad en las decisiones que vayamos tomando al ir encajando el rompecabezas.

Responsabilidad en nuestras decisiones individuales y responsabilidad en las decisiones que atañen a los organismos de estructuración social (gobiernos, administraciones, poder económico, político, legislativo, de orden público, universidades, …) en las que desarrollemos nuestra función.

Todos y cada uno de nosotros somos responsables de nuestras acciones. Y nuestra responsabilidad como individuos no debe quedar supeditada a los mandatos que podamos cada uno tener en función del puesto que ocupa en la organización social. Sirva como ejemplo la película 'Algunos hombres buenos' [12]. Compromiso que puede ser especialmente crítico en los trabajadores de los cuerpos y fuerzas de seguridad del Estado.

Fácilmente podrían venir tiempos de desobediencia. Y si desobedecer es algo muy difícil para la población en general, (todo nuestro sistema educativo y nuestra organización social está fuertemente afincado en la obediencia) mas difícil debe serlo en los cuerpos de seguridad en los que uno de los principales requisitos que se piden a sus trabajadores es la obediencia (algo que en la lógica militar tiene todo el sentido). [14]

Dice J.B. Terceiro en Digitalismo [8] que "vivimos en una sociedad gobernada por el dinero. Debemos pasar a una sociedad centrada en el ser humano. Tenemos por delante la titánica tarea de darle la vuelta a la tortilla". Todos los elementos del puzzle actual deberán ser puestos en juego teniendo en cuenta la centralidad de los individuos, de la humanidad y su entorno como elemento a cuidar.

2. Desarrollo de equipos (Hardware + Software)

2.1. Software libre. Ayudas 'de uno a todos'.

La era industrial se ha caracterizado por la posibilidad de construir aparatos sofisticados que, gracias a la sociedad de mercado, se pudieron construir y distribuir a millones de personas. La fabricación industrial masiva en cadenas de producción y un mercado global hicieron posible la globalización [1], [13].

Con el nacimiento de los ordenadores, se ha ido avanzando en un camino donde, con un número mucho mas reducido de elementos hardware (pantalla, teclado, disco duro, memoria RAM, tarjeta gráfica, ratón, impresora, módem) y un número igualmente reducido de tecnologías (Ethernet,

ADSL, Wifi, 3G, MPEG2) hemos llegado a una sociedad del 'todo digital' [8] donde casi cada aparato con el que nos relacionamos en nuestras vidas tecnológicas funciona sobre esos elementos.
En esta sociedad del 'todo digital' hay siempre un elemento físico, el hardware, sobre el que se instala un software que le da funcionalidad real al hardware. Pero en la parte hardware de esta división, también se ha ido incrustando la división hardware + software de modo que ese hardware de un determinado nivel va siendo descompuesto en partes hardware mas pequeñas teniendo asociado un software que permite construir 'a la medida' el hardware que se precisa para cada aplicación. Y ese software puede hacerse libre y así permitir esas ayudas 'de uno a todos' que no tienen parangón en la sociedad industrial.

2.2. Arduino: Un micro de control en código abierto.

Arduino es una empresa italiana que, cuando éramos muchos los que estábamos diseñando nuestras placas de control a partir de micros, tuvo la idea de ofrecer una placa con un micro de control y un número de entradas y salidas analógicas y digitales además de una conexión Ethernet y otra USB. Y además de vender la placa, dar acceso a los ficheros que permiten adaptar esta placa al diseño concreto que cada desarrollador busca.
Su negocio consiste en vender muchas placas que otros pueden usar para desarrollar sus propios productos. Para facilitar la venta de sus placas, Arduino ofrece numerosas funcionalidades que simplifican cualquier desarrollo sobre este hardware. Con estas placas y el software que facilitan, se pueden desarrollar productos, comprobar su funcionalidad y su mercado y luego, desarrollar la placa concreta de ese nuevo producto.

2.3. Impresoras 3D: La fabricación como 'un paso mas' del software.

Las impresoras 3D se han desarrollado de un modo casi vertiginoso en torno al mundo del software libre. Se construyen con unos pocos motores paso a paso, unas cuantas poleas, un extrusor y un pequeño micro Arduino para el control. Por su reducido coste (elementos hardware muy sencillos y de producción muy masiva) y unas pocas piezas que se construyen en la propia impresora 3D, millones de personas en el entorno de las universidades tecnológicas, han construido sus impresoras 3D con las que han facilitado piezas para construir nuevas impresoras 3D y han desarrollado software que facilita y aumenta mas y mas las posibilidades de estas impresoras. Hay quien habla de una nueva revolución industrial basada en la fabricación dispersa de equipos a partir de impresoras 3D que pueden encontrarse en cualquier hogar.
Una pieza en una impresora 3D se construye del mismo modo que se imprime un artículo en una impresora convencional a partir del fichero conteniendo el documento a imprimir.

2.4. Poppy: humanoides en código abierto

Poppy es el nombre que han dado a un pequeño muñeco construido con piezas propias de las impresoras 3D (motores paso a paso, poleas, piezas imprimibles en impresoras 3D, un micro de control) y todo en software libre. Libres los ficheros para construir cada pieza de su esqueleto. Libre

la documentación para el ensamblaje de las piezas de Poppy (manuales, instrucciones, vídeos demostrativos). Libre el código para hacer que Poppy se mantenga de pie. Libre el código para que Poppy pueda moverse y mantener el equilibro. https://www.poppy-project.org/

2.5. Pixy, La visión convertida en un terminal.

Pixy es un sensor de visión preparado para conectar a una placa Arduino. Permite reconocer y seguir objetos y solamente comunica los datos de posición de los objetos reconocidos. Toda la potencia de cálculo precisa para los algoritmos de visión va incluido en un micro propio facilitando al Arduino o robot en el que se incorpore únicamente la información necesaria. http://charmedlabs.com/default/pixy-cmucam5/
Está desarrollado en código abierto. Lo veremos incluido en máquinas y robots en poquísimo tiempo dando un nuevo salto en las posibles aplicaciones de los equipos que se desarrollen.

2.6. Sensor de conciencia.

En nuestro laboratorio en la universidad de Vigo, hemos desarrollado un equipo al que me parece adecuado llamar 'Sensor de conciencia'. Este equipo recoge vídeo de varias cámaras, y datos de múltiples sensores que informan de lo que ocurre en el entorno donde opera el equipo. Toda esa información se va almacenando en una base de datos y además se coloca en una página web donde puede ser consultada en tiempo real por diferentes usuarios involucrados en las acciones de la máquina.
Además de que esa información esté a disposición, nuestra idea es utilizarla para estudiar la interacción entre la máquina y las personas en su entorno, de modo que el 'sensor de conciencia' pueda dar señales de alerta o abortar una operación si por ejemplo hay una persona en su entorno de operación que pueda correr peligro como consecuencia de la actividad de la máquina. No estamos lejos de una máquina que nos recuerda a HAL, el ordenador de '2001 una odisea en el espacio'. Y el interfaz para comunicarnos con esta máquina, hoy nos lo planteamos a través de una página web que se visualiza en la pantalla de un ordenador o de una tablet. Pero no me cuesta imaginar que en unos años esa interfaz la hagamos a través de Siri o de un sistema similar en código abierto.

2.7. Drones: Máquinas pululando entre nosotros y sin saber quien las maneja.

Por el uso que de estas máquinas se ha hecho desde el entorno militar, podríamos pensar que son el extremo opuesto al Sensor de Conciencia del apartado anterior. Han sido drones los utilizados por militares americanos para cometer asesinatos en países del oriente medio desde bases de operación en Wasington. (Rise of the Drones, https://www.youtube.com/watch?v=MVFeMH3ahtw).

3. Sociedad de la Información, Sociedad del Conocimiento

3.1. Wikipedia: La mayor y mejor enciclopedia al alcance de todos

La información clásica de las enciclopedias ya está a disposición. Pero es sólo información. Y es información para ser consultada por personas. No permite hacer extractos ni buscar relaciones.

3.2. Web Semántica,

La web con la que nos movemos actualmente está pensada para ser usada por personas. Me refiero con esto a que los datos a los que se accede son presentados en una pantalla para ser vistos e interpretados por una persona, pero no para poder ser leídos e interpretados por una máquina o un programa, mas o menos inteligente, que nos pueda contestar por ejemplo si la superficie de Galicia es mayor o menor que la de Extremadura.
Las normas para crear contenido en la red que pueda ser leído e interpretado por programas de ordenador están creadas y es de suponer que en no mucho tiempo toda la información que se coloque en la web lo estará siguiendo estos estándares. En ese momento los ordenadores podrán contestar preguntas mas complejas y hacer por nosotros operaciones que actualmente son impensables, pero que serán cotidianas en muy poco tiempo.

3.3. Recursos Educativos en Abierto. Elementos para aprender a disposición de todos.

En la docencia actual están cobrando importancia las ‘clases al revés’. En vez de explicar la lección en clase y que el alumno haga ejercicios en su casa, las clases están grabadas en vídeos con conceptos mas o menos sencillos y autocontenidos que el alumno visualiza en casa y luego va a clase donde hace ejercicios con la supervisión del profesor.
Si se van generando Recursos Educativos en Abierto, (REA) cualquier profesor podrá usarlos en sus clases y modificarlos, según su propio entender o las necesidades específicas de sus alumnos en cada momento.
Pero también pueden ser usados por el alumno en su propio proceso de estudio y aprendizaje. En este caso el profesor será esa persona que puede acompañar al alumno aconsejándole que cursos hacer o como interpretar los conocimientos que ahí se explican.
Si son varios los alumnos que se juntan para compartir sus tiempos de estudio, estarían creando comunidades de aprendizaje que podrían ser la antesala de los ‘work centers’ donde posteriormente estos alumnos pueden realizar sus trabajos en o para diferentes empresas en un trabajo a distancia.

3.4. Big data: Lo que se puede saber de ‘nosotros’ y de lo que ‘cada uno’ no somos conscientes.

Un hecho curioso es el elevadísimo grado de acuerdo que se da en alguna tarde de domingo de verano a la hora de marcharse de la playa. Si hace buena tarde, van pasando las horas y nadie se levanta. Pero si, ya avanzada la tarde, una nube se cruza por el cielo, al cabo de un momento hay unas tremendas colas de coches saliendo de la playa. Este es un caso donde muchas decisiones individuales independientes acaban siguiendo un patrón que sólo se hace visible al analizarlo en conjunto.

Con el Big Data ocurre algo parecido. Sumando los datos anónimos de los usuarios individuales se obtienen conclusiones que son evidentes. Y que pueden ser usadas para servicio (o en contra de) los propios usuarios individuales.

4. Dinero como motivador extinto. Una nueva motivación en la nueva sociedad.

4.1. Kulom

La filosofía oriental define la motivación (Kulom en tibetano) como el principio primordial y primero que nos mueve a hacer cosas. En la Sociedad Industrial en la que hemos vivido nuestras vidas los que ahora estamos aquí, el motivador fundamental, y el que ha dado sustento a la sociedad actual, ha sido el dinero. El dinero ha sido el elemento que nos colocaba en la sociedad "tanto tienes, tanto vales". El dinero era la compensación por el trabajo realizado con el que se dota de productos la sociedad de mercado. Y era también el elemento que te permite acceder a esa sociedad de mercado. [5], [6], [7]

Se ha exagerado tanto el valor del dinero como 'medidor del valor de todo' que ante una oleada de incendios en Australia hace unos años (donde la superficie quemada era similar a la península Ibérica), en los medios de comunicación cuantificaban el valor monetario de la superficie de monte afectada. Esto es una falacia tal como puede ser valorar una playa por los metros cúbicos de arena que contiene, un semáforo por la energía que consume o la luna por la luz que da. Es como valorar un paraguas por la tela que usa o un consejo por la energía de emitir las palabras de decirlo. Pero a base de repetirlo nos lo hemos creído.

Este valor al dinero, aunque haya sido una constante a lo largo de nuestras vidas, es una excepción a lo largo de la historia [7], [4]. Otros elementos de motivación han sido Dios, la religión, la reputación, el honor, la dignidad, etc. todos ellos elementos mucho mas difíciles de cuantificar que el dinero. Dinero que, con la globalización, ha pasado a ser casi un único dinero. Dólar, Euro, Yen.

Este dinero de 'comunidades muy grandes' en donde no existe sentido de comunidad (y en el caso de Europa es muy escaso) hace que sólo se aprecie el aspecto Yang del dinero [7].

4.2. Dinero Yang y dinero Yin

En cada transacción comercial donde uno compra algo, el aspecto Yang es el que valora lo que se obtiene con el dinero que se ha pagado. El aspecto Yin es el que valora el efecto de ese dinero en manos del que nos ha vendido el producto comprado. Cuando el sentimiento de comunidad es fuerte, el aspecto Yin tiene importancia quitando valor al precio en el acto de compra. Cuando no hay sentimiento de comunidad, lo único que importa es el precio a pagar por el servicio o producto comprado [7].

Como dice Joan Melé en '*Dinero y conciencia: a quién sirve mi dinero*' [5], nuestro dinero es nuestra voluntad. En cada acto de compra estamos decidiendo que valores, que sociedad estamos fomentando. Hasta ahora nos hemos desentendido totalmente de lo que ocurre con ese dinero una vez sale de nuestras manos. Y con esta manera inconsciente de gastar -o invertir- nuestro dinero hemos ido creando esta sociedad. Hemos asistido a alguno de sus efectos perniciosos y nos hemos

quejado de ellos, sin saber que en el fondo, eran nuestros propios actos los que estaban en la raíz de esos mismos efectos. [3], [2]

4.3. Búsqueda del bienestar: ¿El ser humano busca su propio bienestar?

Entiendo que el ser humano cuando hace lo que hace, está buscando su propio bienestar. Y, como no puede ser de otra manera, lo hace siguiendo su criterio y valores. Este criterio y valores, y su entorno mas cercano, condicionan fuertemente sus decisiones. Es este entorno del individuo el que, de algún modo, hace el hueco para su comportamiento; "la ocasión hace al ladrón". Al mismo tiempo que cada individuo con su comportamiento 'crea el hueco' para que la sociedad, o su entorno, se adapte al hueco que este individuo crea. [3]
Y en esta interacción 'individuo-sociedad' la tecnología en general y las tecnologías de la información especialmente, juegan un papel definitivo [8]. Debe suponer por tanto un cambio en la conciencia del individuo y de su papel en la sociedad. Cuando el individuo entienda los efectos de su comportamiento los tendrá en cuenta y, unos antes y otros mas tarde, variará su manera de hacer. Según el grupo lo vaya asumiendo, irá haciendo 'un hueco' mucho mas claro para el comportamiento del individuo [6].

4.4. Un Sistema vivo: Patrón, estructura y proceso.

En el libro 'La trama de la vida' [2], Fritjof Capra indica que los sistemas vivos son los que mas capacidad tienen para adaptarse a los cambios. Y que en todo sistema vivo podemos encontrar una lógica de organización basada en tres elementos: -**patrón** (donde se planifica que hacer y como hacerlo), -**estructura** (la parte 'hardware' que da soporte) y -**proceso** (que es el conjunto de acciones que se hacen sobre la estructura siguiendo el guión indicado por el patrón) [2].
Por el cambio tan grande en el que estamos inmersos, es posible que sólo seamos capaces de superarlo si llegamos a funcionar como si fuésemos un único ser vivo. La teoría Gaia (el planeta Tierra como un ser vivo) puede cobrar nueva fuerza cuando entendamos que nuestro futuro está intrínsecamente ligado al suyo. No hay beneficio económico individual posible que pueda compensar la destrucción de nuestro entorno vital. Destrozar nuestro entorno vital es cavar nuestra tumba... como especie.

5. Radio, televisión y su uso en la organización social

Las TIC tienen un potencial enorme. Su adecuado uso es crucial para garantizarnos un futuro para la Humanidad. No puedo saber como se usarán las TIC en la organización de esta nueva sociedad por inventar. Podemos eso si, dar un rápido vistazo a como se usaron la radio y la televisión y como han afectado a las sociedades donde se usaron.

La radio nace en Alemania, tractor económico de Europa. Para ordenar el uso del espectro radioeléctrico, y la concesión de licencias de emisión, el control se puso en manos del gobierno pues es el ente que representa a todos los ciudadanos. Esta concentración de regulación en el gobierno es considerada como un elemento crucial en la preparación del terreno para que Alemania

provocase la Segunda Guerra Mundial. Cuando años mas tarde se hace lo propio en Estados Unidos, se decide que sea el mercado el que regule la distribución de espectro y emisoras. Esta decisión vendría condicionada por la experiencia de lo ocurrido en Alemania.

La televisión jugó un papel crucial en el desarrollo de la Sociedad industrial, de mercado y en la generalización de la democracia como forma de gobierno de los países donde ha entrado (o sea, todos). Quedan los países con dictaduras en los que se usa la televisión con censura y total control desde el poder establecido. Fantástico el análisis que hace Gustavo Bueno en "Telebasura y democracia" [15]

Internet, tcp-ip, Wifi, Teléfonos móviles, Red de telefonía móvil, Operadores de telefonía móvil, páginas web, correo electrónico, WhatsApp, servidores, tipos de tráfico, Facebook, perfil social, identidad digital, navegadores, historial de búsquedas, Google, Apple, … Numerosos elementos y diversas formas de actuar, influir en la construcción de las redes y de las informaciones que los individuos movemos. Numerosas posibilidades de actuar. Por la dificultad de ver el alcance de nuestras acciones, cuidemos al menos de que la intención con la que hacemos lo que hacemos es la correcta.

6. Resultados y Discusión

El desarrollo de equipos como combinación de hardware y software está alcanzando un ritmo vertiginoso. Al ir apoyado en la estructura económica y de mercado de la sociedad industrial estos equipos alcanzan a una gran parte del planeta. Al utilizar los desarrollos en abierto, la comunidad desarrolladora es enorme haciendo que aparezcan desarrollos increíbles cada mes.

La sociedad de la información, con la web semántica como soporte de conocimiento para las máquinas, los R.E.A. como soporte de conocimiento para los humanos y el Big Data como recopilación de lo que hacemos como sociedad, nos coloca en una nueva situación donde el conocimiento reside en la red y accedemos a el a través de esas mismas máquinas.

La motivación del dinero y el pago por trabajo como forma de organización de la sociedad ha tocado fondo. No hay trabajo que no puedan hacer las máquinas. Quedan, de momento, ciertos trabajos especialmente creativos o específicos. Posiblemente habremos de ir a una sociedad con un salario social que permita vivir y con personas que hagan cosas por una motivación que no será económica.

Encuentro que serán claves para esta nueva sociedad:

Una manera diferente de entender la vida como nuestro paso por este mundo. Será bueno si entendemos que el dinero es sólo un medio de facilitar los intercambios y no un fin en si mismo. Si entendemos que cuando alguien está mal eso es un problema de todos. Si entendemos que para disfrutar de la vida hay que plantearse retos y objetivos y que el reto no puede ser la diferencia con el prójimo (no podemos seguir con una sociedad que usa la diferencia como criterio de éxito).

Habremos de entender que producción, mercado, dinero, trabajo, ... fueron parámetros de la sociedad industrial; y que sostenibilidad, globalización, individuo, satisfacción, conciencia, ... son los parámetros para la sociedad post Información. [6]

Habremos de mantener el ritmo de cambio. Si cesa el cambio, aquellos que se encuentren en una situación que consideren desfavorable serán reacios a aceptar que las cosas queden así. Y si no lo aceptan provocarán un conflicto en el que nos veremos involucrados todos.

Aquellos mas ricos no deben hacer ostentación de riqueza. Las diferencias en nivel económico no tienen por que ser un punto de conflicto. El conflicto aparece cuando 'los ricos hacen ostentación de su riqueza´.

Entender que, para poder hacer el cambio, será necesario desobedecer. [9], [12] La sociedad está construida sobre una base fundamental de obediencia. Pero en tiempos convulsos, la obediencia debe ser fuertemente cuestionada por los individuos. Bajo la obediencia hemos cometido auténticas atrocidades como el holocausto judío o las bombas atómicas sobre Japón.

7. Conclusiones

La potencialidad de las nuevas herramientas es tal que no pueden seguir siendo usadas con los criterios propios de la sociedad industrial y de mercado. Tenemos que inventar nuevos criterios [6].

Hasta ahora la motivación era ganar dinero en una búsqueda de realización personal y de seguridad para uno mismo y para los suyos. Comprábamos cosas que nos ayudaban a relacionarnos con los demás y con el entorno. Y así, en 50 años, transformamos el planeta, el medio es mas amistoso, podemos disponer de mas cosas, no hay trabajo remunerado y aunque hay muchas cosas por hacer, estas no siempre llevan asociado un movimiento de dinero.

Tenemos que ir acomodando el paso entre una nueva motivación para hacer las cosas y una no necesidad de trabajo remunerado para vivir. Entre la importancia que le damos al dinero y la importancia que les damos a las personas. El reto es conseguir pasar este tiempo de transición con las menos magulladuras posibles. Será necesario disponer de mentes abiertas y de los líderes necesarios para conducir el proceso de cambio [6], [8].

Los mecanismos puestos en marcha en la era industrial tuvieron un poder transformador fantástico. Fabricación en serie, un sistema económico y financiero potente, unas redes de comunicaciones de personas y materiales, un mercado de productos, factores que alimentados por los medios de comunicación y por la televisión consiguieron una transformación del planeta en tan solo 50 años impensable incluso para los que hemos vivido esa transformación.

En la era de la información hemos puesto en marcha otros mecanismos que apoyados en los anteriores nos ponen al borde de un abismo. Con la adición de las capacidades del software a las capacidades de creación de nuevas máquinas, estamos al borde de una sociedad en la que habremos de convivir humanos con máquinas, que no siendo humanos, podrán hacer cosas actualmente impensables. Una sociedad así necesita un nuevo juego de valores; un nuevo paradigma de

organización social. Nuevos entes pululando entre nosotros para los que habremos de inventar regulaciones que protejan a los individuos del poder de control de la sociedad. Pero también que protejan a la sociedad de la capacidad de hacer daño de personas individuales.

Agradecimientos

Agradezco a mis alumnos y personas cercanas. Ellos son la parte fundamental del reflejo de mis reflexiones y los que hacen el 'hueco' que me mantiene enganchado a la sociedad.

Referencias

1. Xulio F. Hermida, *La Globalización y el Cubo de Rubik* http://tv.campusdomar.es/serial/index/id/203
2. Fritjof Capra, *La trama de la vida: Una nueva perspectiva de los sistemas vivos.* Ed. Anagrama.
3. Fritjof Capra, *Las conexiones ocultas. Implicaciones sociales, medioambientales, económicas y biológicas de una nueva visión del mundo.* Ed. Anagrama.
4. Guaicaipuro Cuatemoc, *Discurso do cacique mexicano Guaicaipuro Cuatemoc ante la reunión de Jefes de Estado de la Comunidad Europea, el 8 de febrero de 2002*. http://www.ciudadseva.com/textos/otros/cacique.htm
5. Joan Melé, *Dinero y conciencia: ¿A quién sirve mi dinero?*. Ed. Casa del Libro
6. Justo Zambrana *El Ciudadano conforme: Mística para la globalización.* Ed. Taurus
7. Bernard Lietaer, *El futuro del dinero. Como crear nueva riqueza, trabajo y un mundo mas sensato*, Ed. errepar/longseller
8. Terceiro, J. B. (2001). Digitalismo: El nuevo horizonte sociocultural. Taurus.
9. Documental "El juego de la muerte".- https://www.youtube.com/watch?v=64cuhc3vx5A
10. Documental "Educación prohibida".- https://www.youtube.com/watch?v=1RBBVL1Sah0
11. Película "Creadores de sombras"
12. Película "Algunos hombres buenos"
13. Conferencia Xulio F. Hermida "Barcos con ordenador a bordo"
14. Documental "De la esclavitud moderna".- https://www.youtube.com/watch?v=AXghGpoLsqY
15. Gustavo Bueno "Telebasura y democracia", Ediciones B, Barcelona 2002

¿Existen pautas comunes en el comportamiento del gasto en defensa para diferentes países?

Medrano Adán, Luis Ángel [1], Muñoz Sánchez, Fernando [2,*] y Sáenz Royo, Carlos [3]

[1, 2, 3] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza; lmedrano@unizar.es, fmunoz@unizar.es, csaenz@unizar.es

***** Fernando Muñoz Sánchez; E-Mail: fmunoz@unizar.es

Abstract: La literatura se ha centrado sobre todo en identificar factores que afectan al gasto en defensa. La presente comunicación aborda el estudio, a nivel agregado y por países, de si existen regularidades en la evolución del gasto en defensa y de otras variables relacionadas con dicho gasto; o si, por el contrario, el comportamiento del gasto en defensa de la mayoría de países no muestra ninguna pauta común, pese al proceso de globalización. Para poder responder a estas cuestiones se estudia la evolución del gasto en defensa (y PIB) de 87 países, mediante análisis gráfico y métodos estadísticos. Entre otros resultados podemos destacar que la evolución temporal del gasto en defensa muestra una gran variedad de trayectorias, no habiendo por tanto, una pauta común que se repita en la mayoría de países. También se observa que el gasto en defensa es más volátil y tiene una componente cíclica más importante que variables económicas, como el PIB. Además identificamos algunos resultados que se cumplen a nivel agregado o para la mayoría de países; como que la riqueza agregada, PIB, crece de forma casi monótona, o que el esfuerzo realizado en defensa (% del PIB) decrece, aunque no de forma monótona.

Keywords: Gasto en defensa, gasto en defensa per cápita, gasto en defensa agregado, esfuerzo de gasto en defensa.

1. Introducción

Los avances en tecnología y conocimiento nos están llevando a una inevitable tendencia a la globalización tanto en aspectos económicos como científicos, dando lugar a un nuevo escenario estratégico en todos los ámbitos. La mejora de los trasportes y el desarrollo de acuerdos comerciales han diluido las fronteras y han reducido las diferencias interculturales. La globalización parece conllevar aspectos muy positivos como el aumento de la competencia, mayor estabilidad o menor nivel de conflicto debido a una mayor interdependencia. Los nuevos riesgos o amenazas afectan a varios países

a nivel regional, incluso mundial. Aspectos como la migración, la destrucción del medio ambiente, el fundamentalismo religioso, el crimen organizado pasan a ser percibidos como amenazas militares internacionales (CESEDEN, 2009). Una mayor interdependencia de los países implica una menor autonomía y una mayor cooperación en las decisiones gubernamentales. Cabe preguntarse si este proceso de globalización ha tenido reflejo en una menor independencia de las decisiones económicas y las decisiones de gasto en defensa simultáneamente. La mayor parte de los trabajos que consideran factores políticos, económicos y estratégicos como determinantes del gasto militar hacen una aproximación al problema estableciendo una función de demanda que depende de variables como el PIB, la población, el gasto público excluyendo el gasto en Defensa o la participación del saldo de la balanza comercial en el PIB [Maizels & Nissanke (2003)]. Este planteamiento debería encontrar correlaciones entre los gastos en defensa de los distintos países, bajo el supuesto de que las variables económicas que los explican están correlacionadas a su vez. Alonso & Martínez (2008) matizan que estas relaciones son difícilmente observables a nivel mundial dada la heterogeneidad de países pero podrían encontrarse patrones de carácter regional o local. Otros autores, como Medrano et al. (2014) documentan la existencia de economías de escala en la provisión del servicio de Defensa. Este aspecto justificaría la aparición de alianzas supranacionales. En este sentido la mayor parte de los estudios realizados sobre alianzas encuentran importantes beneficios en las mismas [Khanna y Sandler (1996)]. Por otra parte, una amplia rama de la literatura académica de defensa, se ha centrado en la relación entre gasto en defensa y las principales variables macroeconómicas, como por ejemplo el crecimiento económico (Ram 1995 o Dunne et al. 2005), mostrando como el gasto en defensa y la evolución de la economía están relacionados.

La dilución de fronteras y la creciente interdependencia requieren cooperación y coordinación en los recursos individuales lo que debería tener reflejo en la aparición de regularidades ya sean lineales o exponenciales, crecientes o decrecientes en la evolución de los resultados económicos y de gasto en defensa de los países. El presente trabajo pretende analizar dichas relaciones, estudiando la volatilidad de las variables económicas y de gasto en defensa de los países individuales y/o la existencia de tendencias comunes. Concretamente se estudia la evolución de los gastos en defensa frente al PIB a nivel agregado e individual de los países, estimando pautas comunes de comportamiento en las decisiones de gasto y de generación de PIB, mediante análisis gráfico, métodos de estadística descriptiva, modelos de regresión o modelos de series temporales. El resto del trabajo se estructura como sigue; en el segundo apartado presentamos los datos y metodología usados; en el tercer apartado mostramos los resultados obtenidos; finalmente, resaltamos las conclusiones alcanzadas más relevantes.

2. Datos y Métodos.

Analizamos un total de 87 países pertenecientes a 5 zonas geográficas diferentes en el periodo comprendido entre 1988 y 2013. Para cada país hemos obtenido el gasto en defensa, el Producto Interior Bruto (PIB) y la población en cada uno de los años analizados. Para el gasto en defensa hemos utilizado los datos de la SIPRI Military Expenditure Database (Stockholm International Peace Research Institute)[1]. Las cifras del gasto militar vienen expresadas en millones de dólares a precios y tipos de

[1] Los países analizados, agrupados según las zonas geográficas agregadas consideradas por el SIPRI aparecen recogidos en el apéndice I.

cambio constantes de 2011 así como en porcentaje sobre el PIB total. Los datos de población los hemos obtenido de las bases de datos estadísticas del Banco Mundial. En cuanto a la metodología empleada, hemos recurrido desde análisis gráficos y estadísticos descriptivos hasta métodos de regresión y de análisis de series temporales. Además hemos analizado datos individuales de cada país de nuestra muestra y también datos agregados, a partir de índices del gasto en defensa agregado y del PIB agregado.

3. Resultados y Discusión

En primer lugar, analizamos la representación gráfica de las series temporales del gasto en defensa y del PIB de los países de la muestra (figuras 1.1 y 1.2 del apéndice I)[2]. Cuando se analizan dichas representaciones se ve claramente que no existe un patrón que se repita en la mayoría de países. De hecho, se identifican varios patrones muy distintos entre sí; desde el (aproximadamente) monótono creciente (el más repetido), hasta el monótono decreciente (observado, por ejemplo, en El Salvador, Hungría y Rumanía), pasando por un patrón en forma de "U" (Argentina, por ejemplo), o de "U invertida" (por ejemplo, Irlanda o Italia), o uno "sin tendencia" (observado por ejemplo en Dinamarca, Leshoto, y Uruguay). Sin embargo, cuando representamos la evolución del PIB, figura 1.2, vemos que hay un patrón que se observa en la mayoría de los países (más del 90% de la muestra) caracterizado por una tendencia (casi) monótona creciente hasta 2008, seguido de un periodo de crecimiento bajo o incluso moderadamente negativo a partir de ese año. Esto sugiere que el comportamiento del gasto en defensa es muy heterogéneo; en particular, mucho más que el del PIB. Esto implica que la globalización ha tenido una mayor repercusión en los aspectos económicos que en los de defensa, bien porque en el gasto en defensa no se han desarrollado factores "comunes" de globalización que afecten a la mayoría de países, o si se han desarrollado, no tienen un peso muy grande en la explicación de la evolución del gasto. Además, el comportamiento del PIB sigue unas pautas más o menos comunes en la mayoría de países, debido seguramente a la globalización con un peso importante en su determinación.

En segundo lugar, calculamos varios estadísticos descriptivos y mostramos los más relevantes en la tabla 1.1 del apéndice I. Este análisis revela algunos resultados interesantes en relación al gasto en defensa. En el período 1992-2013, observamos que el gasto en defensa crece para 60 países y decrece para 27. Las tasas medias anuales de variación (columna séptima de la tabla 1.1) están entre el 10,5% de Argelia y el -7,1% de Bulgaria. Vemos que hay grandes diferencias entre países (desde crecimientos positivos de dos dígitos a negativos del 7% anual). Más interesante es observar lo que ocurre con el Gasto en defensa per cápita (columna octava). El gasto per cápita crece para 48 países y disminuye para 39. En dólares corrientes, el gasto en defensa por persona medio mundial es de $392,7 (en todo el periodo de 22 años), el máximo está en $2.938 de Kuwait y el mínimo esta en $3,7 de Ghana. Medido en porcentaje del PIB (columna novena), el gasto en defensa (a nivel agregado) decrece en el periodo analizado; debido a que el PIB crece en promedio a una tasa que casi duplica la tasa a la que crece el gasto en defensa. En promedio, los países dedican el 2,6% del PIB a gasto en defensa, aunque la dispersión es muy grande, ya que varía entre un máximo del 13,6% de Kuwait y un 0,2% de Mauricio. Si comparamos los valores de 2013 con los de 1988, observamos que el porcentaje del PIB destinado a gasto en defensa aumenta

[2] Dadas las normas de estilo de la comunicación no es posible adjuntar el apéndice I dada su extensión. Sin embargo, dichas figuras están a disposición de todo aquel que esté interesado en ellas mediante solicitud a los autores.

solamente para 12 países y disminuye para 75. Esto sugiere que el esfuerzo que los países hacen en defensa decrece a lo largo del tiempo (debido a que perciben menores riesgos de conflictos armados, o a razones políticas –prefieren priorizar otros tipos de gastos- o, lo que es más probable, a una combinación de ambas). El PIB crece a largo plazo. No obstante, hay 2 países (Bulgaria y Rumanía) para los que el PIB disminuye al cabo de los 22 años analizados. La tasa de crecimiento medio anual del PIB está entre el -2,8% de Bulgaria y el 10% de China, de modo que hay una gran dispersión en el crecimiento. La tasa media de todos los países es del 3,7%. La riqueza, medida por el PIB per cápita, muestra una dispersión muy grande: varía desde $84.897 de Luxemburgo hasta $261 de Etiopía. La media global de todos los países es de $16.556. A lo largo del tiempo, la riqueza tiende a crecer, debido a que el PIB crece más rápido que la población. En el periodo analizado, la riqueza crece a una tasa media anual de 2,4% (en media de todos los países). Hay 6 países para los que la riqueza al final de 2013 es menor que en 1988, entre los que hay 3 africanos, 2 europeos y uno asiático. Como conclusión podemos afirmar que las variables relacionadas con gasto en defensa tienen un comportamiento mucho más heterogéneo y volátil que las relacionadas con el PIB. En especial, mientras que las segundas suelen tener una tendencia positiva a largo plazo para casi todos los países, las primeras muestran tendencia de ambos signos, positiva y negativa, para un número importante de países.

En tercer lugar hemos analizado la persistencia o "memoria" del gasto en defensa. En primer lugar, estimamos el modelo de panel para el gasto en defensa:

$$GD_{i,t} = a + b\, GD_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t} \qquad (1)$$

y obtenemos que $\hat{b} =$ 1,004465 (t-statistic = 689,28) y un coeficiente de determinación de 0,9954. En promedio para todos los países y años, el gasto en defensa de un país aumenta un 0,45% respecto a su gasto del año anterior, y el 99,54% del gasto en un periodo es explicado por el gasto en el periodo previo. También hemos estimado el modelo anterior país a país obteniendo unos resultados similares (véase la figura 1.3 del apéndice I). Por último hemos estimado el modelo (1) para el gasto agregado en defensa obteniendo $\hat{b} =$ 1,0241 (t-statistic = 24,788) y un coeficiente de determinación de 0,970. La conclusión es que el gasto en defensa muestra una gran persistencia (tiene "memoria"): el gasto en *t* está muy relacionado con el gasto previo (en *t*-1). Esto implica que cualquier cambio en un factor determinante del gasto, o cualquier shock, que se produzca en un periodo *t*, tendrá un efecto "duradero"; es decir, provocará cambios en el gasto en defensa de *t*+1, de *t*+2, etc. Esto tendrá consecuencias importantes. Por ejemplo, puede provocar que sea difícil detectar si una determinada variable influye significativamente en el gasto o no.

Por último, analizamos el comportamiento agregado del gasto en defensa y del PIB (y de variables relacionadas con ambas; para el análisis agregado nuestra muestra empieza en 1992, primer año con datos para Rusia). El estudio de los estadísticos descriptivos a nivel agregado revela que en el periodo total, el gasto en defensa agregado ha crecido a una tasa media anual del 1,9%. Este aumento no se ha producido monótonamente. De hecho el gasto decrece hasta 1999, comienza una fase creciente que dura hasta 2008 y a partir de esa fecha se estabiliza para comenzar una fase decreciente en los últimos 3 años. Más interesante es observar que el gasto en defensa agregado per cápita permanece prácticamente constante (apenas sube a una tasa media anual del 0,4%); obviamente, debido a que la población crece

a una tasa similar a la que crece el gasto. Medido en porcentaje del PIB, el gasto en defensa agregado decrece en el conjunto de los 22 años; debido a que el PIB crece en promedio a una tasa que casi duplica la tasa a la que crece el gasto en defensa. En promedio (de todos los países y años), los países dedican el 2,6% del PIB a gasto en defensa, aunque la dispersión entre países es muy grande. El análisis gráfico de la evolución del Gasto en defensa agregado, $GD_{m,t} = \sum_{j=1}^{N} GD_{j,t}$ y el PIB agregado, $PIB_{m,t} = \sum_{j=1}^{N} PIB_{j,t}$ **,** muestra que, mientras el segundo tiene una clara tendencia creciente (y aproximadamente lineal), el gasto en defensa se caracteriza por la existencia de ciclos muy marcados. Para el PIB también existen ciclos, pero estos son más cortos y menos pronunciados (el supuesto de tendencia lineal permitiría explicar el 98,7% de las variaciones del PIB y solo el 83% de las variaciones del gasto agregado en defensa).

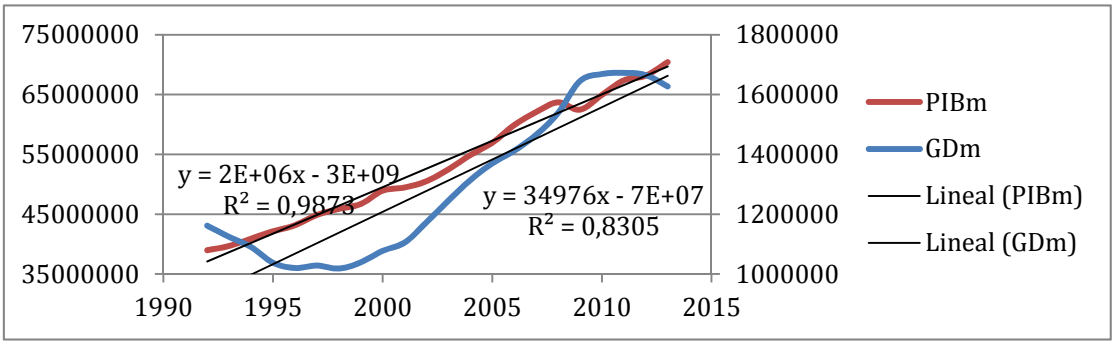


Figura 1. Evolución temporal del gasto en defensa y el PIB a nivel agregado (millones de $).

Otro aspecto destacable es que el gasto en defensa agregado es más volátil que el PIB agregado. Considerados conjuntamente los dos hechos, mayor volatilidad y tendencia más compleja, podemos pensar que el gasto en defensa es más difícil de predecir y de analizar. Además de analizar las variables agregadas, es interesante analizar sus variaciones o, mejor aún, sus tasas de variación anuales. Denotemos dichas tasas porcentuales de variación por $gd_{m,t} = \ln\left(GD_{m,t}/GD_{m,t-1}\right)$ y $pib_{m,t} = \ln\left(PIB_{m,t}/PIB_{m,t-1}\right)$. En la figura 2 podemos ver que las tasas de variación anuales del gasto en defensa agregado (línea azul) y el PIB agregado (línea roja) tienen un comportamiento muy diferente. En particular, el gasto en defensa agregado es más volátil y tiene un comportamiento cíclico más marcado. Además, el gasto en defensa agregado baja en 7 de los 21 años representados en la figura, mientras que el PIB solo desciende en 1 año, 2009**.**

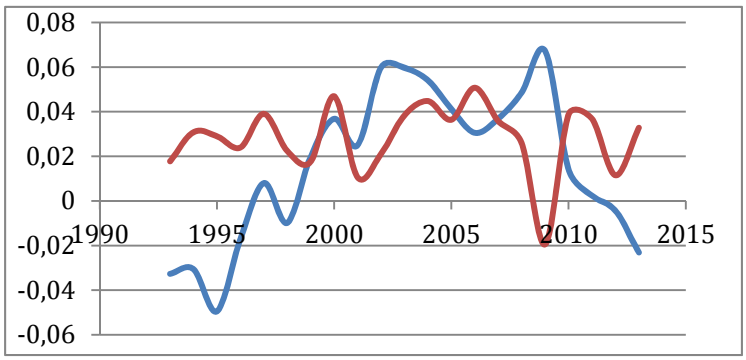


Figura 2. Evolución temporal de las tasas de variación anual del gasto en defensa (línea azul) y el PIB (línea roja) a nivel agregado.

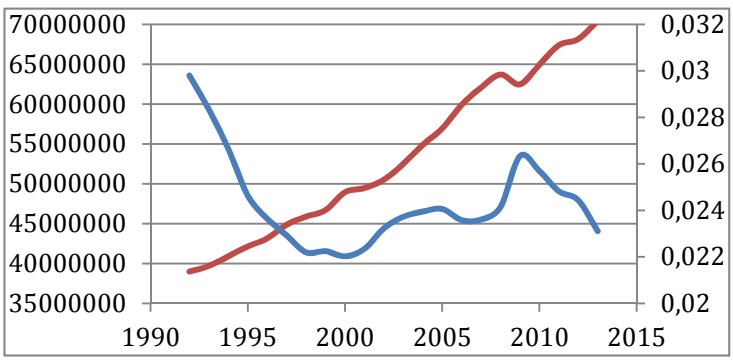


Figura 3. Evolución temporal del PIB agregado mundial (línea roja, en millones de $) y el porcentaje del PIB agregado destinado a gasto en defensa, (línea azul).

Si estimamos el modelo que relaciona ambas tasas de variación:

$$gd_{m,t} = \alpha_4 + \gamma_4 pib_{m,t} + u_{1,t} \tag{2}$$

obtenemos que no hay una relación significativa entre ellas, $\hat{\gamma}_4 = -0.064 \quad (p - value = 0.90)$, $R^2 = 0.00084$. Lo que indica que, si bien a largo plazo debería existir una relación entre gasto en defensa y PIB, las variaciones anuales del gasto en defensa agregado no vienen explicadas por las variaciones contemporáneas del PIB.

Para concluir el análisis agregado, nos fijamos en el "esfuerzo realizado en defensa", medido por el gasto en defensa expresado en porcentaje del PIB, $GD_{m,t}/PIB_{m,t}$. Es aquí donde se perciben las diferencias más grandes entre los comportamientos del PIB y el gasto en defensa (figura 3). Vemos que aunque la riqueza agregada, PIB, crece de forma casi monótona, el esfuerzo realizado en defensa (el porcentaje destinado a defensa) decrece, aunque no de forma monótona. De hecho, decrece hasta el año 2000 incluido, crece de 2001 a 2009 y comienza una nueva fase decreciente a partir de esa fecha. La fase decreciente inicial puede ser debida principalmente a la inercia que se inicia con el fin de la guerra fría y los subsiguientes cambios políticos en el antiguo bloque comunista. La fase creciente que se inicia en 2001 tiene que ver sin duda con el atentado de las torres gemelas y la "guerra" contra las redes terroristas fundamentalistas que se inició a continuación. Y el cambio de tendencia que se inicia en 2008-2009 puede deberse fundamentalmente a la crisis económica "global", que azotó principalmente a los países más desarrollados. Nótese que estas explicaciones sugieren motivos políticos, estratégicos y económicos para explicar los cambios de tendencia en el "esfuerzo realizado en defensa".

Para terminar, queremos señalar alguna reflexión sobre distintas formas de medir el gasto en defensa agregado y sus implicaciones. Una forma habitual de modelizar variables agregadas es mediante números índice. Para analizar el gasto en defensa agregado nos planteamos dos alternativas: un índice (de tasas de variación anuales) equiponderado y un índice ponderado "por tamaño". Así, para el gasto en defensa, ambos índices se calcularían del siguiente modo:

$$IM_{1,t} = k_2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} gd_{i,t}, \quad IM_{2,t} = k_1 \sum_{i=1}^{N} \omega_{i,t} gd_{i,t}, \quad \text{donde} \quad \omega_{i,t} = \frac{GD_{i,t}}{\sum_{j=1}^{N} GD_{j,t}} \tag{3}$$

donde $GD_{i,t}$ es el gasto en defensa del país i-ésimo en el periodo t, $\omega_{i,t}$ es la ponderación de dicho país en el índice "ponderado por tamaño", k_1 y k_2 son constantes de normalización y $gd_{i,t} = \ln\left(GD_{i,t}/GD_{i,t-1}\right)$. Obviamente, ambos índices coinciden si y solo si el gasto en defensa de todos los países es idéntico. Cuanto mayor sea la heterogeneidad entre los gastos en defensa de los países, más dispar será el comportamiento de ambos índices. En la figura 4 vemos que los dos índices se comportan de manera diferente, especialmente los índices de gasto en defensa. En el caso del PIB, los dos índices tienen una evolución parecida (simplemente el índice equiponderado amplifica los cambios del ponderado). En el caso del gasto en defensa, los comportamientos de ambos índices difieren bastante: el

equiponderado oscila menos y muestra una tendencia creciente a largo plazo, mientras que el ponderado por tamaño muestra una tendencia poco clara y es más volátil. Además, a partir de 2010 su comportamiento diverge: uno decrece y el otro crece significativamente. De hecho los dos índices de gasto en defensa tienen una correlación de (solamente) 0,45, mientras que los de PIB llegan al 0,83.

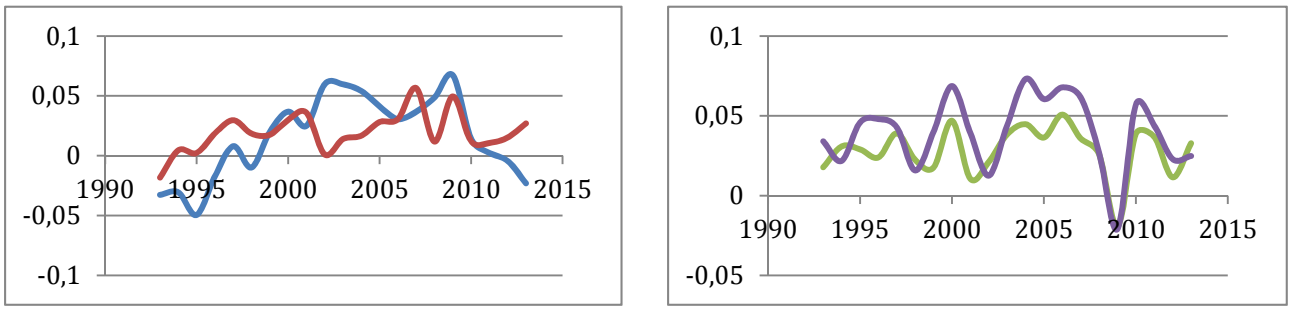


Figura 4. Tasas de variación anual de los índices de gasto en defensa agregado (figura izquierda, equiponderado -línea roja- y ponderado por tamaño -línea azul-) y de los índices de PIB agregado (figura derecha, equiponderado -línea morada- y ponderado por tamaño -línea verde-).

Por tanto, en el caso del gasto en defensa, ambos índices miden aspectos distintos del gasto agregado y están determinados por factores diferentes. El índice ponderado por tamaño es el mejor indicador para analizar la evolución del gasto agregado mundial en defensa. Pero, cuando hay países con una ponderación muy grande (como ocurre en el gasto en defensa, donde el gasto de Estados Unidos supone alrededor del 40% del gasto agregado de todos los países), éste índice puede estar determinado por factores específicos de los países con alta ponderación en el índice. El índice equiponderado refleja lo que ocurre en el gasto de la "mayoría" de países (sin tener en cuenta su importancia relativa) y depende, fundamentalmente, de factores que afectan a "muchos" países. El hecho de que ambos índices tengan una correlación relativamente baja implica que los factores que afectan a países "grandes", con elevado gasto en defensa, son distintos en gran parte de los factores que afectan al resto de países (que son la mayoría, en cuanto a su número). Al interpretar los resultados hay que ser muy cuidadosos. Por ejemplo, en el periodo 2009-2013, el gasto agregado ponderado por tamaño disminuyó. Esto no implica que el gasto en defensa de la "mayoría" de países disminuyera. De hecho, sabemos que el gasto de la mayoría de países aumentó en este periodo concreto (como sí refleja la evolución del índice equiponderado), si bien el gasto de los países "más grandes" (por volumen de gasto en defensa) disminuyó. Dependiendo del índice usado en los análisis los resultados pueden variar mucho. No sería extraño que la variación del gasto en defensa de un país tuviera una relación significativa con uno de los índices pero no con el otro. Por ejemplo, el coeficiente de correlación entre los índices ponderados por tamaño del gasto en defensa y el PIB es negativo mientras que dicho coeficiente de correlación es positivo cuando se calcula con índices equiponderados. Además, no hay relación significativa entre los índices de gasto en defensa y los de PIB.

4. Conclusiones

Tanto la observación de la evolución de las series temporales como algunos de los principales estadísticos descriptivos, sobre el PIB y el gasto en defensa, para los diferentes países que componen nuestra muestra, nos conduce a concluir que el comportamiento del gasto en defensa es muy

heterogéneo; en particular, mucho más que el del PIB. Esto implica que o bien no existen factores "comunes" que afecten al gasto en defensa de la mayoría de países, o si existen, no tienen un peso muy grande en la explicación de las variaciones del gasto. Además, el comportamiento del PIB sigue unas pautas más o menos comunes en la mayoría de países, debido seguramente a la existencia de factores globales-comunes con un peso importante en su determinación. Además se ha mostrado como el gasto en defensa muestra una gran persistencia (tiene "memoria"). A nivel agregado la evolución del gasto en defensa y el PIB muestra que, mientras el segundo tiene una clara tendencia creciente (y aproximadamente lineal), el gasto en defensa se caracteriza por la existencia de ciclos muy marcados. En el caso del PIB también existen ciclos, pero estos son más cortos y mucho menos pronunciados. Otro aspecto destacable es que el gasto en defensa agregado es más volátil que el PIB agregado. Considerados conjuntamente los dos hechos, mayor volatilidad y tendencia más compleja, podemos pensar que el gasto en defensa es más difícil de predecir y de analizar. El estudio de las tasas de variación anuales del gasto en defensa agregado y el PIB agregado también refuerzan las conclusiones anteriores. Además vemos que aunque la riqueza agregada, PIB, crece de forma casi monótona, el esfuerzo realizado en defensa (el porcentaje destinado a defensa) decrece, aunque no de forma monótona. Finalmente, analizamos las implicaciones del uso de distintas formas de medir el gasto de defensa agregado.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo financiero recibido del proyecto ECO2013-48496-C4-3-R, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad español, y de la DGA-FSE a través de los grupos de investigación CREVALOR y CIBER. También al proyecto de investigación con código 2013-20, financiado por el CUD de Zaragoza.

Referencias

1. Alonso, M.A. y Martínez, A. (2008). "Los determinantes del gasto en defensa en la literatura académica de los últimos cincuenta años: una revisión de las principales aportaciones y modelos". Hacienda Pública Española/ Revista de Economía Pública, 187, 109-137.
2. CESEDEN (2009). "La violencia del siglo XXI. Nuevas dimensiones de la Guerra". Monografía.
3. Dunne, J.P., Smith, R.P. and Willenbockel, D. (2005). "Models of military expenditure and growth: a critical review". Defence and Peace Economics, 16(6), 449–460.
4. Khanna, J. and Sandler, T. (1996). "NATO burden sharing: 1960–1992". Defence and Peace Economics, 7(2) 115–133.
5. Maizels, A. y Nissanke, M. K. (1986). "The Determinants of Military Expenditures in Developing Countries". World Development, 14(9), 1.125-1.140.
6. Medrano, L.A., Muñoz, F. y Sáenz, C. (2014), "Economías de escala en la provisión de la Defensa". Revista del CLAD Reforma y Democracia, 58, 31-60.
7. Ram, R. (1995). "Defense expenditure and economic growth. In Handbook of Defence Economics". Edited by K. Hartley and T. Sandler. Amsterdam: North-Holland City. Chapter 10, 251–273.

Definición de la estrategia tecnológica en empresas que suministran tecnología a Defensa

Vicente Oliva, Silvia [1,*], Martínez Sánchez, Ángel [2,] Escribano Bernal, Francisco[1] y Delgado Gómez, José Manuel [2]

[1]Centro Universitario de la Defensa. Academia General Militar. Zaragoza. Email: silviav@unizar.es, fescrib@unizar.es; y [2]Departamento de Dirección y Organización de Empresas. Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA). Universidad de Zaragoza. Email: anmarzan@unizar.es, jdelgom@unizar.es

*****Autor Principal y responsable del trabajo; Email: silviav@unizar.es

---

Abstract: Las empresas españolas que suministran sistemas de armas y equipos al Ministerio de Defensa español desarrollan su estrategia para mantener y aumentar sus capacidades tecnológicas actuales. En algunas de ellas, su definición se apoya en una vigilancia muy activa de las necesidades de sus clientes, basada tanto en fuentes informales y contactos con diferentes gobiernos en un entorno internacional, como en un seguimiento pormenorizado de la competencia desde el punto de vista comercial -como pueden ser los contratos que ejecutan competidores- y tecnológico -como son los bienes y servicios que éstos -. Sin embargo, también hay empresas de marcado perfil técnico que promueven sus propios desarrollos como modo de avance tecnológico con impacto potencial sobre el mercado, especialmente en entornos internacionales y con acuerdos de colaboración. Saben que las necesidades de los clientes en el presente, como los Ministerios de Defensa, están sujetas a cambios inesperados de la situación y por ello algunas están estableciendo sistemas de gestión del conocimiento, nuevas formas organizativas para gestionar la innovación, su capital humano o alianzas con otros suministradores, tanto en aspectos tecnológicos, como en comerciales y de internacionalización. En general, con formas más abiertas de innovación y cooperación intra e inter-organizacional.

Keywords: estrategia corporativa; estrategia tecnológica; gestión de la innovación; vigilancia competitiva

---

1. Introducción

La estructura de la industria de Defensa en España y la manera de competir de sus empresas en el mercado se han visto modificadas los últimos años. Sin embargo, los factores tecnológicos siguen teniendo un gran peso en la generación de capacidades relevantes para la competitividad de las fuerzas armadas de los países [1] y un reto para los suministradores. Las innovaciones militares radicales son difíciles de predecir en la esfera comercial debido a que pueden implicar el desarrollo de nuevos conceptos de los que no existen ejemplos actualmente [2]. En un estudio de prospectiva de 2003 con horizonte 2020 [3], las fuentes de empresas innovadoras en defensa se basaban, en primer lugar, en la reestructuración de la base industrial mediante adquisiciones de competidores emergentes que dispusieran de nuevas tecnologías y expansión de la oferta de productos; en segundo lugar, en la generación de acuerdos tecnológicos o *joint ventures* con proveedores de defensa de primer nivel; y, en tercer lugar, en la dedicación de empresas comerciales o divisiones de éstas a nuevos requerimientos que pudieran manifestar los mercados de defensa, como por ejemplo, farmacéuticas con productos de diagnóstico y prevención, empresas de ocio capaces de reproducir virtualmente el campo de batalla del mañana en simuladores tácticos, etc. Sin embargo, a día de hoy se observa que la innovación en Defensa es menos evolutiva e incremental que en los productos civiles [1, p.40], aun cuando los requerimientos de tecnologías de uso dual para el mercado civil y de Defensa son crecientes.

El contexto general actual en el que se encuentran las empresas españolas es cada vez más competitivo y hay multitud de factores que están condicionando su estrategia competitiva. Los condicionantes políticos y de desarrollo de programas militares, así como las restricciones presupuestarias, tienen un impacto directo en la actividad de estas empresas y, por ello, todos los aspectos relacionados con la estandarización de productos (especialmente los novedosos, como pueden ser los relativos a vehículos no tripulados), los próximos programas de desarrollo que se anuncian y las medidas proteccionistas de la industria, propiciadas por el entorno regulatorio, inciden directamente en la definición de su estrategia tecnológica. En los últimos años, el Ministerio de Defensa español (MINISDEF) ha intensificado sus esfuerzos para vigilar y hacer prospectiva tecnológica, así como la comunicación de sus análisis a las empresas del sector y a la sociedad en general [4-5], permitiendo una vía de colaboración con otras estructuras internacionales que pueden influir en la Innovación y en la Tecnología (I+T) relacionada con capacidades de Defensa.

Este estudio es novedoso frente a los que tratan de la base tecnológica de la industria en general porque su objetivo es conocer cómo definen su estrategia tecnológica las empresas españolas proveedoras del MINISDEF. Los resultados ofrecen una aproximación a los procesos estratégicos internos teniendo en cuenta las características propias del sector. Es de destacar que muestran una interrelación profunda entre las áreas técnicas y las comerciales hasta el punto de que, en muchos casos, no es posible hacer I+T sin una apropiada gestión de las relaciones con cliente y vigilancia comercial. Por último, resalta la priorización de las actividades de gestión de la cartera de proyectos frente a otras de contenido más estratégico como la prospectiva.

A continuación se detalla la metodología que se ha seguido para desarrollar el estudio, recopilar información y analizarla. En un tercer apartado se incluyen los resultados obtenidos y su discusión. Y, finalmente, las conclusiones del análisis.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

Las empresas que integran la base tecnológica e industrial de Defensa española pertenecen a diferentes ramas productivas y ello dificulta el análisis que podría hacerse en un sector industrial homogéneo [6]. Desde el punto de vista estadístico, tampoco resultan útiles los Códigos Nacionales de Actividades (CNAE) en que todas las empresas registran su actividad. Esto lleva a que existan macro-análisis de empresas del sector en España con 118 observaciones [6, p.106] o, uno más reciente, con 650 [7]. Para diseñar nuestro estudio, la metodología de estudio de casos ofrecía el mejor modo de investigar la cuestión debido a que es especialmente aplicable cuando el fenómeno a estudiar no puede ser separado de su contexto, las relaciones son demasiado complejas para utilizar métodos cuantitativos y la perspectiva de múltiples casos de estudio permite replicar y contrastar resultados [8]. Al tratarse de aspectos estratégicos, son difícilmente cuantificables algunos parámetros generales en las empresas y los factores que influyen en las mismas no se pueden interpretar fuera del sector de Defensa.

Con la finalidad de tener garantías de validez de análisis, la metodología cualitativa se diseñó de acuerdo con las indicaciones de Stake y Eisenhard [9], [10] tomando como unidad las empresas proveedoras de acuerdo con la taxonomía del Ministerio de Defensa para capacidades industriales agrupadas en sectores de actividad [11]. De esta forma, se cubrieron todos ellos por las cinco empresas entrevistadas (ver tabla 1), aunque algunas tienen divisiones y/o productos y servicios que se incluyen en más de una categoría. Todas ellas son proveedores del MINISDEF de capital privado y disponen de tecnología propia, habiéndose comprobado que tienen registrados patentes y/o modelos de utilidad, o presentación de productos en ferias especializadas.

CLASE	DESCRIPCIÓN	CNAE	
1	Vehículos terrestres	**2910**	Fabricación de vehículos a motor
2	Naval	**7112**	Servicios técnicos de ingeniería y otras actividades relacionadas con el asesoramiento técnico
3	Aeronáutico		
4	Espacial		
5	Armamento	**2540** **7112**	Fabricación de armas y municiones Servicios técnicos de ingeniería…
6	Misiles	**2540** **7112**	Fabricación de armas… Servicios técnicos de ingeniería…
7	Eléctrico e informático	**7112**	Servicios técnicos de ingeniería…
8	Servicios generales	**7022**	Otras actividades de consultoría de gestión empresarial

Tabla 1. Clases de empresas estudiadas y actividades

Tres de ellas son pequeñas y medianas empresas (PYMES) y dos son grandes, esto es, tienen más de doscientos cincuenta trabajadores y su volumen de negocio es superior a cincuenta millones de euros, o su cifra de balance es superior a cuarenta y tres millones de euros. La media de las cinco en el año 2014 es la siguiente: 373 empleados, volumen de negocio de 97.090.000 € y balance de 157.028.000 €. Salvo una de las empresas, todas tienen una antigüedad en el mercado superior a veinticinco años, situándose la media en 43,6 años.

El método de recogida de evidencias fue la revisión documental (técnica: patentes y modelos de utilidad; y comercial: datos económicos y catálogos de ferias) y la realización de múltiples entrevistas de profundidad con preguntas abiertas, cerradas y semiestructuradas, presenciales y telefónicas, a empleados de áreas técnicas (directores de ingeniería), responsables de actividades de estrategia e innovación (incluyendo miembros de la dirección y/o propiedad en algún caso) entre los meses de marzo y junio de 2015. Para validar que el guion y las plantillas de la entrevista recogían todos los aspectos a estudiar se habían remitido previamente a expertos en materia de estrategia, prospectiva tecnológica y economía de la Defensa de México, Colombia y España, tanto civiles como militares; con sus aportaciones y observaciones se mejoró la recogida de información.

Todas las entrevistas incluidas en este análisis fueron grabadas y transcritas para posterior comprobación por las empresas, que pudieron mejorar la precisión de sus argumentos (revisión del lenguaje coloquial) y manifestar su acuerdo para tratamiento agregado. Para evitar problemas de varianza común y mejorar la validez interna y externa en favor del rigor de los casos, la información recogida fue triangulada, en la medida de lo posible, por fuentes de acceso público [12]. El enfoque científico que se utilizó fue la inducción analítica a través de la comparativa de elementos comunes o diferenciales.

Los documentos consistentes en las entrevistas transcritas conformaron las unidades de análisis. La duración total suma más de trescientos minutos. Los factores se estructuraron en torno a las unidades lógicas analizadas y agrupadas en clases mediante el programa informático Nudist, que sumó 1.329 unidades de texto. Se analizó para cada atributo la ocurrencia en relación al tema de clasificación, en concreto: contexto, políticas y programas, estrategia comercial y estrategia tecnológica y de conocimiento. A partir de cada atributo, se modelizó mediante el programa Gephi cada una de las etiquetas y relaciones solamente para los que son comunes a las cinco, pero existe el archivo completo bajo petición a los autores. Para realizar la infometría se tomaron los nodos provenientes del programa de investigación cualitativa y las relaciones existentes intra- e inter-caso. Para forzar relaciones, se aplicó el escalado multidimensional (MDS) en los filtros conforme a Fruchternam y Reingold [13], lo que permite que los vértices conectados por una arista se aproximen y que no se extraigan éstos demasiado cerca unos de otros.

3. Resultados y Discusión

Tras una primera codificación de transcripciones se obtuvieron sesenta y siete etiquetas diferentes aplicadas a los textos. Una vez eliminados algunas que aportaban semánticamente lo mismo y/o repartido el significado entre dos etiquetas, e incluso tres, se trabajó con sesenta y tres nodos. Su agrupación por temática no fue de acuerdo al guion ya que éste se diseñó para recoger la información y no para analizarla. En la figura 1 se han incluido las agrupaciones en árbol de los temas tratados con las empresas. Para cada uno de ellos se han incluido los aspectos más relevantes. Así, por ejemplo, para el contexto en el que opera la empresa, los aspectos de tamaño y estrategia competitiva tienen dos nodos (contratista principal y costes estructurales), la competencia en el mercado cuatro (tamaño: pequeñas, baja competencia, mundial y cooperación con la competencia), la sobrecapacidad de la industria de Defensa sólo uno y la intensidad tecnológica tiene tres nodos (menor velocidad del cambio, amplitud del mercado potencial y liderazgo tecnológico).



Figura 1. Estructura del estudio: agrupación temática de los nodos

Los únicos aspectos que se han repetido en las cinco empresas son la baja competitividad en su área tecnológica dentro de su segmento de mercado (3,3% de las referencias), la actuación mundial (3,4%), la certificación de productos (2%), los aspectos políticos (13%), el market-pull o demanda del mercado sobre los desarrollos de bienes y servicios (3,8%), la vigilancia tecnológica (4,7%) las actividades de prospectiva (4,4%) y los métodos de prospectiva (5,6%).

Los aspectos políticos y la actuación mundial se encuentran especialmente próximos y se refleja en testimonios como el siguiente:

> *Nos está costando exportar pero hemos hecho intentos con (países). El Ministerio nos ayuda bastante. Por ejemplo (producto propio) que queremos vender en (país) y el personal militar nos está apoyando al aportar la visión de uso al cliente, de un modo formalizado.*

Pero estos factores también se encuentran entremezclados con la prospectiva estratégica a través de su gestión de relaciones con el cliente:

> *El usuario del producto muchas veces no es el mismo que el cliente. Puede ser una empresa local del país que compra pero el usuario final será al que se venda después. Conocer en primera línea su necesidad y prever cuál será en dos o tres años, aunque nos centremos en España, debería ser accesible porque conoces usuarios, las líneas estratégicas de I+D que van sacando […] en los países que consideramos estratégicos.*

En concreto, la prospectiva estratégica aparece unida a la estrategia tecnológica de las empresas, tanto por actividades comerciales atendiendo a las demandas de cliente, como puede ser el MINISDEF (market-pull) como a la información de vigilancia tecnológica que puede forzar desarrollos propios sobre los que las empresas tienen capacidad de desarrollo (technology-push):

> *No se hace prospectiva con la formalidad adecuada pero sí se hace. En ocasiones, para algunos temas, es interno. Para otros va de la mano del cliente. A futuro estamos tratando de identificar nichos de mercado, oportunidades y […] contrastando con nuestras áreas de negocio. En otras ocasiones es el cliente, como el MINISDEF, quien ya está avanzando en nuevos programas como la nueva Fragata o el 8x8 y está ya pensando en la tecnología que habrá en 8 o 10 años.*

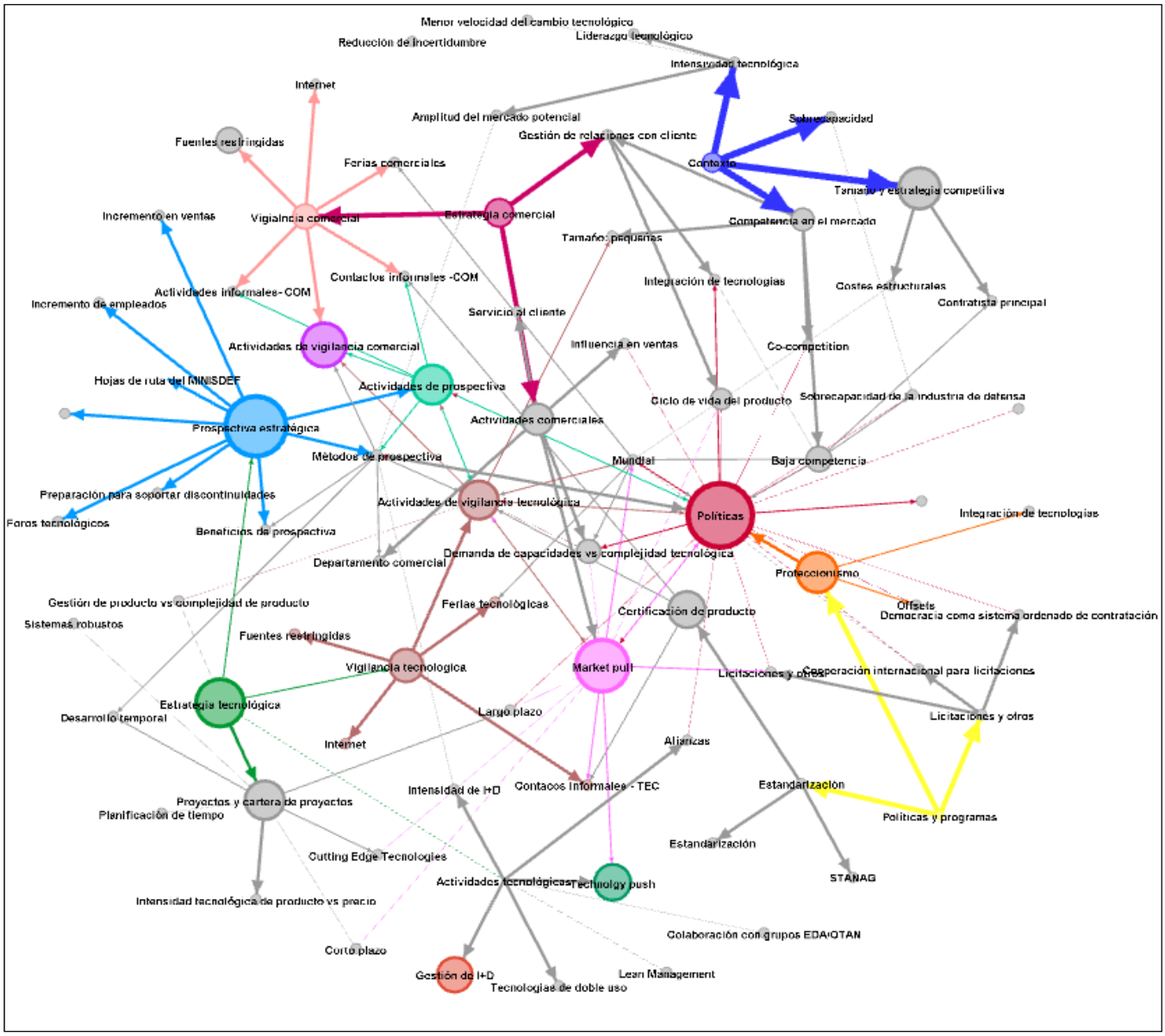


Figura 2. Infometría de los nodos en los cinco casos comunes para todas las empresas

A partir de estos aspectos, de acuerdo con la estructura de contenidos y las relaciones que aparecen inter-casos e intra-casos, para los aspectos que se incluyen en las cinco empresas a la vez, se ha modelizado la estructura de relaciones que se incluye en la figura 2.

Como se ha visto, los aspectos políticos son los que más unidades de texto codificadas representan (un 13%) pues están indisolublemente unidos en este sector, incluso más que otros, a todo el diseño estratégico de la empresa. La influencia sobre las actividades de estrategia es muy directa pero los métodos que se utilizan para aproximarse al futuro tecnológico y comercial pasan primero por éstos y, a su vez, se ven influidos por el proteccionismo que exhiben algunos gobiernos:

> *Estamos en un concurso público europeo en el que un requisito es que el contratista principal sea del país. En Europa se supone que es abierto, pero han considerado que por la misiones en las que este (producto) va a estar, van a tener un carácter secreto […] y esto te afecta al presentarte.*

Para ello, una buena vigilancia tecnológica se revela como determinante de la estrategia tecnológica:

> *Tienes que tratar de ser el primero o el segundo en seguir al mercado, o en llevar. Como no tengas buena prospectiva, para cuando te enteres ya es tarde. Tendrás que ser más barato…*

Pero no sólo la complejidad tecnológica es determinante para el diseño de la estrategia, sino que también es importante tener en cuenta toda la información que contribuye a la prospectiva estratégica, por ejemplo a través de licitaciones:

> *A veces hay procesos de información y contratación pública previos a licitaciones, o con procedimientos restringidos, y en función de todos los consultados algunos gobiernos ofrecen una "oferta hueca" en la que admiten alternativas. Te dan pistas cuando te preguntan por algo pero si luego sale otra cosa, por lo que has conseguido entender tu solución no les ha parecido la más apropiada.*

La influencia de la cooperación internacional en las actividades tecnológicas y de mercado empieza a tener reflejo, muy tímidamente en algunas estrategias tecnológicas. Aunque lo reseña alguna empresa, es visible en el grafo el poco peso específico que han otorgado a grupos de expertos y su baja relación con el enfoque technology-push.

> *La crisis en nuestro sector ha afectado a las estrategias de las empresas. Hemos entendido que tenemos que cooperar. Antes igual íbamos más a competir para ver qué trozo podíamos tener del pastel; ahora quizá es más buscar lo mejor de cada uno, el espíritu que se ve últimamente.*

4. Conclusiones

Nuestro estudio es consistente con estudios previos como Fonfría [1], constatando que las PYMEs entran en el mercado como productores de alta tecnología muy especializados, en algunos casos de la mano de contratistas principales, como socios estratégicos para el desarrollo de sistemas en las que éstos no poseen las capacidades requeridas. Una de las características de la industria de Defensa es que requiere de importantes flujos de recursos en Investigación y Desarrollo para mantener su posición tecnológica [6, p. 103]. Sin embargo, nuestro estudio demuestra el alto peso que tiene la estrategia comercial, especialmente cuando se vincula a actividades de vigilancia tecnológica y política. Por ello, la vigilancia competitiva se configura como un modo fundamental para que las empresas diseñen su estrategia aunando todos los elementos que les afectan.

Respecto a la participación de las personas, se revela esencial la existencia de fuentes informales de conocimiento sobre aspectos estratégicos en todos los países donde las empresas tienen presencia, incluso más que el acceso a fuentes restringidas. Ello se reconoce en trabajos previos, ya que el conocimiento tácito que poseen las personas desempeña un papel mucho más relevante [1, p.140].

En actividades de prospectiva estratégica es donde las empresas se encuentran en un momento de concienciación. Todas ellas reconocen que es beneficioso realizarlas aunque se advierten diferencias sobre el acuerdo en su grado de formalización. Las empresas de menor tamaño lo hacen sobre la base de relaciones informales y una dirección muy implicada. Las más grandes están estableciendo sistemas de gestión que les permitan añadir la visión de futuro a su diseño de la estrategia tecnológica.

Los aspectos internacionales han cobrado mucha relevancia y están llevando a estas empresas a expandir sus actividades, lo que puede ser fuente de nuevos desarrollos e inversiones tecnológicas, así

como modos de colaboración más allá de acuerdos para poder licitar en algunos países. Es relevante destacar que la estrategia tecnológica y su impacto directo en el diseño de proyectos de I+D o la cartera de la empresa está supeditada enormemente a factores comerciales, primando el corto y medio plazo, aun cuando sus productos y servicios vayan a tener ciclos de vida muy extensos. Esto puede suponer una desventaja competitiva aunque se vea como un modo de supervivencia tras años de crisis.

Este estudio ha de entenderse en el contexto actual en que se ha recopilado la información. Presenta limitaciones inherentes a su diseño metodológico y al número de empresas analizadas, aun cuando arroja importantes conclusiones sobre el modo de definir la estrategia tecnológica en empresas que no están sujetas a directrices internacionales y que conforman la base tecnológica e industrial de Defensa de España.

Agradecimientos

Proyecto STRADEFINITION- Financiación UZCUD-2014-SOC-02 (2014-2015) y CUD 2013-20. A todas las personas que han apoyado en el diseño y la ejecución del mismo. Muy especialmente, a los directivos de las empresas que nos ofrecieron información sobre sus procesos estratégicos internos, por su tiempo y confianza.

Referencias

[1] A. Fonfría Mesa y C. Pérez-Forniés, Lecciones de economía e industria de la Defensa. Cizur Menor (España): Editorial Aranzadi, S.A., 2013.

[2] G. Nelder, “Auditory Crescendo,” Futures, vol. 50, pp. 86–93, Junio 2013. DOI: 10.1016/j.futures.2013.03.010

[3] I. P. Office of the Deputy Undersecretary of Defense, “Transforming the Defense Industrial Base: A Roadmap,” 2003.

[4] J. M. Riola Rodríguez, “R&D and the Defence Technology Observatory,” Arbor, vol. 190, no. 765, p. 101, Mar. 2014. DOI: 10.3989/arbor.2014.765n1008

[5] J. M. Riola Rodríguez, “La política de I+D en Defensa: Metas y retos tecnológicos,” en Las Tecnologías de Doble Uso: La Investigación y el Desarrollo al Servicio de la Sociedad Civil y Militar. I Jornadas ., 2011, pp. 13–22.

[6] Economía de la Defensa. Madrid: Colegio de Economistas, 2000.

[7] J. García-Estévez y E. Trujillo-Baute, “Drivers of R&D investment in the defence industry: evidence from Spain,” Defence and Peace Economics, vol. 25, no. 1, pp. 39–49, Enero 2014. DOI: 10.1080/10242694.2013.857464

[8] R. K. Yin, Case Study Research: Design and Methods, 3th ed. London: Sage Publications, 2003.

[9] R. E. Stake, The art of case study research. Thousand Oaks: Sage Publications, 1995.

[10] K. M. Eisenhardt, “Building Theories from Case Study Research.,” Academy Management Review, vol. 14, no. 4, pp. 532–550, 1989. DOI: 10.5465/AMJ.2007.24160888

[11] Ministerio de Defensa, “La Industria de Defensa en España. Informe - 2013,” 2013.

[12] M. Gibbert, W. Ruigrok, y B. Wicki, “What passes as a rigorous case study?,” Strategic Management Journal, vol. 1465–1474, no. 29, pp. 1465–1474, 2008. DOI: 10.1002/smj

[13] T. Fruchterman y E. Reingold, “Graph drawing by force directed placement,” Software: Practice and Experience., vol. 21, no. Noviembre, pp. 1129–1164, 1991. DOI: 10.1002/spe.4380211102

Sesión I-F

Entorno, Sistemas y Modelado

La toma de decisiones militares. Una propuesta del método de planeamiento de las operaciones a nivel táctico y logístico para el ejército de tierra empleando la metodología AHP.

Ruiz López, Carlos[1,*], Balmori Abella, José Maria[2]

[1]Centro Universitario de la Defensa. Zaragoza (CUD-Zaragoza). Academia General Militar, carretera de Huesca s/n. 50090 Zaragoza. cruizl@unizar.es (RLC)
[2]Academia de Logística. Acuartelamiento barón de Warsage. Calatayud. jbalabe@et.mde.es (BAJ)

***** Autor responsable del trabajo; cruizl@unizar.es (RLC);

Abstract: La toma de decisiones por parte de un individuo o centro decisor se basa normalmente en la experiencia y la intuición de los mismos, lo que se denomina el saber vulgar. Pero cuando se trata de una decisión compleja donde intervienen múltiples factores y variables, la experiencia no es suficiente. Elegir la mejor línea de acción (LA) en un planeamiento logístico o táctico durante una operación militar, donde esa decisión afectará a miles de personas, la experiencia no es suficiente. En este trabajo proponemos una norma operativa (NOP) donde se implementa el proceso de la decisión aplicando metodología AHP, Analytic Hierarchy Proccess, como técnica de decisión multicriterio para la toma de decisiones militares. Asimismo mostramos un programa informático diseñado ad hoc para la ejecución de dicha metodología. Esta propuesta podría ser una alternativa al actual sistema de ponderación lineal, utilizado en el Ejército de Tierra (ET), "OR5-008 Método de planeamiento de las operaciones" del Mando de Adiestramiento y Doctrina del ET. Por último mostraremos cómo fue implementada esta metodología y su NOP durante el ejercicio "Antorcha Audaz 2014" realizado por la Brigada logística (BRILOG) en sus instalaciones y Campo de Maniobras de San Gregorio, así como las conclusiones y lecciones aprendidas.

Keywords: AHP; Jerarquía; Planeamiento Logístico; Línea de Acción Logística, Norma Operativa; Brigada Logística.

1. Introducción

Hoy en día estamos continuamente tomando decisiones, ya sea a nivel individual o colectivo. La subjetividad es inherente a las personas que toman estas decisiones. Cuando esta puede afectar a la vida de muchas personas, la subjetividad debe ser controlada o al menos cuantificada con técnicas y modelos de ayuda a la decisión, ya sean discretos o continuos. En las fuerzas Armadas españolas se están realizando numerosos avances en este sentido.

En el año 2010, el Estado Mayor de la Defensa (EMAD) realizó el "Proyecto de Objetivo de Capacidades Militares" [1], donde tuvo que Analizar y Prelacionar las Capacidades Militares, para de acuerdo a los Objetivos establecidos, priorizar sus necesidades. Para la valoración del estado de las capacidades militares se estableció un procedimiento análogo al existente en otros países y Organizaciones Internacionales de Seguridad y Defensa denominado "procedimiento MIRADO". Los componentes fundamentales de este procedimiento son: Materiales, Infraestructuras, Recursos Humanos, Adiestramiento, Doctrina y Organización. Para cada unidad militar se dispuso de información relativa al estado (considerado como porcentaje) de cada uno de sus factores del MIRADO y de la contribución de esa unidad a cada una de las capacidades militares. Puesto que no todas las capacidades son iguales, no todos los factores del MIRADO debían tener el mismo peso específico, para reflejar esta diferencia de importancia en cada capacidad se aplicó un factor de ponderación a cada uno de ellos.

El proceso para determinar estos factores de ponderación fue la comparación por pares de los factores del MIRADO de cada capacidad, según la escala propuesta por Thomas L. Saaty en su Proceso Analítico Jerarquizado, Analytic Hierarchy Proccess (AHP), técnica de toma de decisiones estructurada para resolver problemas complejos.

El EMAD ha utilizado esta metodología AHP en otros casos como la elección y posterior adquisición de sistemas de armas y vehículos, como UAV, sistemas de artillería antiaérea ligero y vehículos 8x8, de forma que jerarquizaba las diferentes alternativas posibles en función de criterios previamente establecidos. Seguramente, lo mejor de esta metodología no han sido los resultados obtenidos sino la información aportada sobre los sistemas y alternativas analizadas en función de variables y criterios no visibles para el mando que tenía que decidir. Una buena decisión es aquella que está basada en la lógica, considerando todos los datos disponibles y las alternativas viables y aplicando una aproximación cuantitativa y cualitativa para resolverlos. Galileo Galilei decía hace más de 400 años: "Mide lo que se pueda medir, y lo que no se pueda medir, hazlo medible".

"Un proceso de toma de decisiones puede concebirse como la elección por parte de un centro decisor (un individuo o grupo de individuos) de lo mejor entre lo posible" [2]. "Es una de las características esenciales del ser humano y da idea de su grado de autodesarrollo, conocimiento y libertad. Se basará en alguno o algunos de los siguientes Binomios: Experiencia-intuición (comportamiento no racional), conocimiento-razonamiento (comportamiento racional), emoción-pasión (comportamiento irracional)" [3]. El Método de Planeamiento, que se desarrolla en la Publicación Militar del Ejército de Tierra OR5-008 [4], tiene como punto más importante la decisión del Jefe.

Sin embargo para ayudar en la toma de esta decisión, utiliza el método de la ponderación lineal (MPL), consistente en construir una función de valor para cada alternativa en la Matriz de Decisión. Esta matriz considera unos criterios y unos baremos que determinan la opción más apropiada (tabla 1).

Este método aunque muy intuitivo tiene serias limitaciones; decisión difícil ante puntuaciones finales cercanas, gran sensibilidad ante pequeños cambios debidos a la subjetividad, experiencia e intuición (comportamiento no racional) del evaluador y por último no es sensible a factores valorados excesivamente bajos, dando como buenas opciones inviables en alguno de los criterios, por quedar compensado con los otros.

CRITERIO[1]	Ponderación[2]	LA. 1[3,4]		LA. 2[3,4]		LA. 3[3,4]	
		Valor	Resultado	Valor	Resultado	Valor	Resultado
Maniobra	3	2	(6)	3	(9)	1	(3)
Inteligencia	3	3	(9)	1	(3)	2	(6)
Apoyos de fuego	2	2	(4)	1	(2)	3	(6)
Movilidad	2	3	(6)	2	(4)	1	(2)
Contramovilidad	1	1	(1)	3	(3)	2	(2)
Mando y Control	4	3	(12)	2	(8)	1	(4)
EW.	1	2	(2)	1	(1)	3	(3)
Defensa antiaérea	1	1	(1)	2	(2)	3	(3)
Seguridad	2	1	(2)	2	(4)	3	(6)
Flexibilidad	1	2	(2)	1	(1)	3	(3)
TOTAL			**(45)**		**(37)**		**(38)**

[1] Elegidos durante la Confrontación.
[2] Ponderación fijada por el Jefe o, en su caso, por el JEM./JPLM.
[3] La escala de calificaciones (en este caso de 1 a 4) será fijada también por el Jefe o, en su caso, por el JEM./JPLM.
[4] Líneas de acción surgidas de la Confrontación.

Tabla 1. Fuente: OR5-008. MPL. Matriz de decisión entre 3 Líneas de acción (LA) según 10 criterios militares.

Por estos motivos creemos que el empleo de técnicas de decisión multicriterio (TDMC), como ayuda a la toma de decisiones militares pueden facilitar al Jefe una visión más ajustada a la realidad de las alternativas que se le proponen, sin desvirtuar la acción de mando inherente a la responsabilidad del cargo". Y lo llevamos a la práctica. En el mes de noviembre del año 2013 tuvo lugar la evaluación (FOC) del Cuartel General (CG) de la Brigada logística (BRILOG) mediante el Ejercicio "Antorcha Audaz 2013". Esta evaluación conllevó la confección de documentos procedimentales y operativos asociados a la preparación y despliegue del CG BRILOG como PCMALCE [5]. La BRILOG manifestó su interés meses antes de contar con un núcleo de apoyo a la toma de decisiones integrado en su Cuartel General durante el citado ejercicio. Este núcleo compuesto por un oficial diplomado en Investigación Operativa (DIMO), tendría principalmente la misión de aplicar la metodología AHP para la comparación de las diferentes Líneas de acción logísticas (LAL) propuestas por el cuartel general de la BRILOG a su General Jefe durante el planeamiento logístico. Una LAL es una forma de cumplir la misión encomendada desde el punto de vista logístico. Para ello se redactó un documento donde se estableció el procedimiento a seguir para implementar la metodología AHP.

Mediante este trabajo se pretende estandarizar unos procedimientos en la ayuda a la toma de decisiones que hagan que estos sean reproducibles y replicables. Por eso, no sólo nos hemos limitado a definir unas pautas o pasos, sino que se han definido los criterios con los que se iba a evaluar las líneas de acción en función del trabajo realizado con los Comandantes y Teniente Coroneles analistas de las diferentes áreas pertenecientes al CG de la BRILOG, Abastecimiento, Mantenimiento, Transporte, Seguridad, Inteligencia, Obras, HNS, CIMIC,…

Los objetivos que nos planteamos en este trabajo son los siguientes:

1º. Presentar un método de comparación de Líneas de Acción alternativo al de ponderación lineal desarrollado en el Método de Planeamiento actual, utilizando la TDMC AHP.
2º. Confeccionar un procedimiento estandarizado (NOP) que permita a la Brigada Logística desarrollar su propia Norma Operativa para la toma de decisiones utilizando la metodología AHP.
3º. Dar a conocer este tipo de técnicas en el ámbito del Ejército de Tierra (ET) para su inclusión en las futuras publicaciones militares de Planeamiento Logístico o táctico.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

De las diferentes metodologías existentes en TDMC, se ha empleado el método AHP (ANALYTIC HIERARCHY PROCESS) o Método de Jerarquización Analítica, desarrollado por Thomas L. Saaty en la Universidad de Pensilvania durante los años 70. Su finalidad principal es la ordenación de una serie de alternativas, en nuestro caso LAL, basándonos en unos criterios/subcriterios definidos por el decisor. Además utilizaremos un programa informático realizado ad hoc en la Academia de Logística del Ejército de Tierra donde implementaremos todas las etapas de la metodología.

Como ya se ha comentado, esta metodología la aplicamos a la FOC del CG de la BRILOG durante el planeamiento de la operación “Antorcha Audaz 2013” como ayuda a la toma de decisiones de su General Jefe, para la elección de la mejor Línea de acción logística (LAL) entre las dos que su Cuartel general le presentó en la conferencia de la decisión.

3. Resultados y Discusión

3.1. Primera etapa. Representación del Problema

El primer paso fue representar el problema mediante un diagrama de árbol. En nuestro caso y como se observa en el gráfico 1, el objetivo era decidir cuál era la mejor alternativa en el Planeamiento logístico de la operación “Antorcha Audaz” (nivel 1); elección de una Línea de Acción Logística entre las dos propuestas (LAL 1 y LAL 2).

Los criterios y subcriterios (nivel 2) serán las cualidades de cada LAL permitiendo cuantificar en qué medida ésta se ajusta a las expectativas que durante el desarrollo de las mismas se tuvo en cuenta a la hora del diseño. Por último, las LAL1 y LAL2 (nivel 3), se definen como el esquema de un plan posible para cumplir la misión encomendada. Son las diferentes alternativas que satisfacen la resolución del problema planteado. Por lo tanto, el esquema gráfico de nuestro ejercicio táctico fue el siguiente:

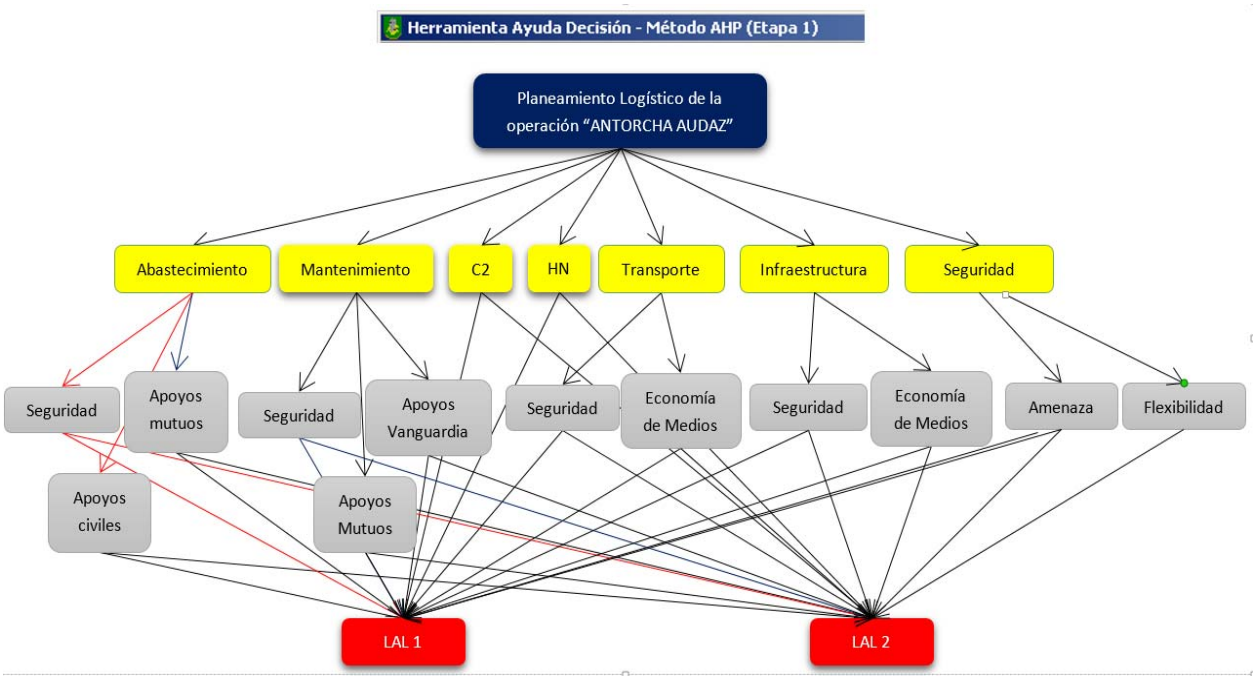


Gráfico 1. Presentación de los criterios-subcriterios y Líneas de acción logísticas mediante diagrama de árbol

3.2. Segunda etapa. Evaluación de los criterios y subcriterios

Con anterioridad al ejercicio Antorcha Audaz tuvieron lugar una serie de reuniones entre el CG de la BRILOG, concretamente su célula de Planes, y el oficial DIMO que se integraría como célula de apoyo a la toma de decisiones para confeccionar una Norma operativa (NOP) sobre "Criterios y Método de Comparación" [6] y que fue aprobada por su General Jefe en Noviembre del 2012. En esta NOP se detallaron, fruto del estudio y análisis de todas las secciones que integran el CG de la BRILOG, una relación pormenorizada de todos los criterios y subcriterios que podrían ser empleados para tomar una decisión logística según el tipo de operación a desarrollar. El listado completo de criterios y subcriterios de este trabajo están definidos de forma completa y exhaustiva en el Apéndice 1 del Anexo F de la NOP Proceso de Planeamiento de la BRILOG, norma que ha quedado en el CG de la BRILOG para futuras utilizaciones. Para esta operación logística, los criterios y subcriterios seleccionados por los analistas del CG son los que figuran en el nivel 2 del gráfico 1.

3.2.1. Cálculo de los pesos de los criterios de valoración

Los criterios no tienen la misma importancia siempre. Habrá operaciones logísticas donde el criterio Transporte sea más importante que el criterio Mantenimiento y al revés. Pero ¿Quién decide qué criterios son los más importantes en nuestro ejercicio "Antorcha Audaz" y sobre todo cómo valorar y cuantificar esa diferencia? Para decidir el peso de los criterios y obtener su ponderación utilizamos la escala de Saaty. Construimos una matriz a partir de la comparación de los diferentes criterios dos a dos, con el propósito de estimar la importancia relativa entre cada uno de ellos. Para realizar estas valoraciones, reunimos en una sala a todos los analistas importantes con capacidad de decisión en alguno de los criterios. De esta forma evitamos que la subjetividad del analista de Abastecimiento diera todo el peso a su área en menoscabo de operaciones, por ejemplo. El analista de Investigación Operativa fue el elemento conductor y director de las valoraciones obtenidas.

Se fueron mostrando en una sala los resultados de las comparaciones dos a dos sobre la importancia relativa de los criterios para esta operación logística en función de las puntuaciones dadas por los analistas, que en nuestro caso fueron 9 Comandantes y Tenientes Coroneles expertos en sus respectivas áreas de conocimiento. En cada comparación se estableció un debate sobre qué criterio era más importante y en qué grado o valor. Funcionó como un sistema, interactuando todas las partes, y no de forma aislada y sin conexiones como se había hecho hasta entonces. Similar al Método Delphi.

Las valoraciones obtenidas se introdujeron en el programa AHP elaborado ad hoc en la Academia de logística [7], y se obtuvieron los pesos (W) de cada criterio. Señalar que 3 de los 7 criterios valorados, la seguridad, el transporte y las infraestructuras, obtuvieron el 75% del peso total. En esta operación logística se planteaba un entorno propicio para sabotajes, de manera que la seguridad de nuestras infraestructuras y transportes fueron muy valoradas por todos los analistas. Hay que señalar que se utilizó un criterio nuevo, HNS (Host Nation Support) y se incorporó a la NOP. Esto nos indica como la realidad y la experiencia nos hace aumentar el número de criterios a tener en cuenta para sucesivos planeamientos.

3.2.2. Cálculo de la Consistencia de los pesos asignados a los criterios.

AHP posee un indicador que controla el grado de consistencia de las puntuaciones que hacemos en cada fase del proceso al establecer la importancia relativa entre los elementos de cada nivel. La mente humana está preparada para ordenar y valorar dos o tres elementos pero cuando tenemos que ordenar y ponderar 7 criterios a la vez, se producen inconsistencias. El método AHP cuantifica ese grado de inconsistencia en nuestras valoraciones. El cálculo del índice de consistencia IC, necesario para obtener la Razón de Inconsistencia (R.I.) tras dividirlo por la consistencia aleatoria (CA), se obtiene con la siguiente fórmula, siendo n el número de criterios y landa máximo el resultado de dividir la matriz de criterios por el vector de los pesos:

$$\mathrm{IC} = \frac{\lambda_{\max} - \mathrm{n}}{\mathrm{n} - 1}$$

Como norma general, si la Razón de Inconsistencia R.I. es mayor de un 10%, las puntuaciones obtenidas en los pesos de los criterios no son muy coherentes. En nuestro caso la R.I. fue 0,0943 (menos de un 10%) luego podemos aceptar que las valoraciones de nuestros analistas fueron consistentes.

3.2.3. Cálculo de los pesos de los subcriterios de valoración

Para obtener los pesos de los subcriterios pertenecientes a cada criterio procedimos de igual forma que con los criterios, si bien nuestro decisores para obtener las valoraciones fueros los analistas militares de cada uno de ellos. El analista de Investigación Operativa se reunió en cada sala y por separado con la célula responsable de cada área-criterio, y se obtuvieron sus valoraciones como expertos.

3.3. Tercera etapa. Evaluación de las alternativas

El paso siguiente consistió en solicitar nuevamente los especialistas-células y por separado que mostraran sus juicios de valor para la confrontación del siguiente nivel jerárquico, la comparación de las alternativas en cada criterio o Subcriterio. Una vez hechas estas comparaciones procedimos como en el paso anterior y obtuvimos un valor para las dos LAL en cada criterio y Subcriterio.

3.4. Cuarta etapa. Jerarquización de las alternativas

Una vez obtenidos los pesos para los criterios, subcriterios y las alternativas, el paso siguiente consistió en obtener unos pesos globales para ambos niveles jerárquicos. Esta tarea la realizamos por medio de una agregación multiplicativa entre niveles jerárquicos, obteniéndose la tabla 2 o matriz de decisión. La matriz de decisión muestra al general Jefe de la Brigada que según la opinión de todos sus expertos y analistas, y tras un proceso metódico y replicable, la mejor Línea de acción es la LAL1 (65%), dándole el detalle de los criterios y subcriterios donde es más fuerte cada una de las LAL.

MATRIZ DE DECISIÓN

CRITERIOS / SUBCRITERIOS	PESOS	LAL1	LAL2
C2	**0,07**	**0,75**	**0,25**
ABTO	**0,24**	**0,43**	**0,57**
+ SEG APO	0,63	0,25	0,75
+ APO MUT	0,26	0,75	0,25
+ APO CIV	0,11	0,75	0,25
MANTO	**0,08**	**0,54**	**0,46**
+ SEG	0,57	0,50	0,50
+ APO MUT	0,14	0,25	0,75
+ APO VAN	0,29	0,75	0,25
TP	**0,25**	**0,82**	**0,18**
+ SEG APO	0,83	0,83	0,17
+ ECO MED	0,17	0,75	0,25
INFR	**0,06**	**0,77**	**0,23**
+ SEG	0,75	0,75	0,25
+ ECO MED	0,25	0,83	0,17
HNS	**0,04**	**0,75**	**0,25**
SEG	**0,25**	**0,67**	**0,33**
+ AMENZ	0,83	0,75	0,25
+ FLEXB	0,17	0,25	0,75
		0,65	**0,35**

Tabla 2. Matriz de decisión de LAL según los 7 criterios militares. Ponderaciones y valoraciones obtenidas AHP

4. Conclusiones

Como conclusiones, podemos decir que se han conseguido los objetivos de este trabajo. Hemos presentado un método de comparación de Líneas de Acción logísticas (LAL) o tácticas (LA) alternativo al desarrollado en el Método de Planeamiento de las operaciones del Ejército de Tierra, utilizando la TDMC AHP. La Brigada Logística ha desarrollado un procedimiento que le ha permitido confeccionar su propia Norma Operativa (NOP) para la toma de decisiones utilizando AHP. Y por último, hemos dado a conocer la metodología AHP en el ámbito del Ejército de Tierra para su inclusión en las futuras publicaciones militares de Planeamiento Logístico o táctico, si así se estima conveniente.

Como hemos visto en este caso real, las técnicas de decisión multicriterio, y concretamente la metodología AHP, proveen de una estructura que nos permite seguir un razonamiento sistemático y replicable acerca de decisiones complicadas, como puede ser la decisión de un General Jefe de una Brigada Logística, sobre qué maniobra logística realizar en un país extranjero. “La decisión multicriterio, más que proporcionar soluciones, son una fuente de conocimiento sobre el entorno, la incertidumbre, los objetivos, los cursos de acción y los intercambios. No reemplaza al decisor en la toma de decisiones, ni elimina su intuición en la resolución de problemas” [3].

Agradecimientos

A la BRILOG por su inquietud constante de mejora y rigor en la toma de decisiones.

Referencias

1. Rodríguez, J.J.; *Proyecto de Objetivos de Capacidades Militares*, Estado Mayor de la Defensa, PROCAM; Madrid, España, 2010; Volumen II, Anexo E.
2. Romero, C.; *Análisis de las decisiones multicriterio*, 1ª edición, Isdefe: Madrid, España, 1996.
3. Moreno, J. M.; *Problemas de gran tamaño en el proceso analítico jerárquico*. Estudios de economía aplicada 1997, 8, 25-40.
4. MADOC; *OR5-008. Método de Planeamiento de las operaciones, Nivel táctico.* Mando de Adiestramiento y Doctrina, Granada, España, 2004.
5. Bridada Logística; *Proceso planeamiento operativo Antorcha audaz*, Zaragoza, España, 2013.
6. Bridada Logística; *Proceso planeamiento en BRILOG*, 00/12/Planes, Zaragoza, España, 2012.
7. Vázquez, A.; *Método de decisión Multicriterio AHP*, 1ª edición: DLF, Calatayud, España, 2013.
8. Saaty, T.; *Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors. The Analytic Hierarchy/Network Process*. RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics) 2008, 102 (2): 251–318.

Factores condicionantes para la redacción de una Normativa Tipo para la gestión acústica en Buques de la Armada

Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier [1]*; Núñez Nieto, Xavier [2]; Espada Recarey, Luis [3]; Patiño Cambeiro, Faustino [4] ; Barragáns Martínez, Belén [5] y Bellas Rivera, Roberto [6]

[1] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. fjavierrodriguez@cud.uvigo.es
[2] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. xnnieto@cud.uvigo.es
[3] Profesor emérito, Universidad de Vigo. lespada@uvigo.es
[4] INARdesign, Universidad de Vigo. fpatino@uvigo.es
[5] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. belen@uvigo.es
[6] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. rbellas@cud.uvigo.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo.

Abstract: Las condiciones acústicas en los navíos han de adecuarse a una serie de necesidades. La normativa de cumplimiento se rige actualmente por el Código sobre Niveles de Ruido a Bordo de los Buques, aprobado por la Organización Marítima Internacional (OMI) en 19 de noviembre de 1981, así como, cuanto lo acuerdan los interesados, por los criterios establecidos en el dictamen definido por *Norske Veritas*. No obstante, dentro del ámbito de las Fuerzas Armadas, no existe una publicación que regule o establezca, de forma inequívoca, los límites de ruido aéreo a bordo de nuestros buques, sino que varios documentos guía o publicaciones se utilizan a modo de referencia, ninguna de ella con carácter vinculante: *ANEP-24 "Guidelines for Shipboard Habitability Requeriments for Combatant Surface Ship*", ANEP-26 "*Ergonomic data for Shipboard Space Design in NATO Surface Ship*", clasificación COMF-NOISE de Bureau Veritas (BV), publicación del Estado Mayor de la Armada "*Estándares de Habitabilidad para Buques de la Armada*" o la publicación de la Armada Norteamericana MIL-STD 1472G "*Design Criteria Standard Human Engineering*". Desde el punto de vista metodológico sería más conveniente que hubiese un texto único. En este contexto, la presente comunicación analiza las publicaciones o documentos anteriores y propone una normativa tipo.

Keywords: Redacción de Ordenanza Tipo, Valores máximos de exposición, Niveles límite de aislamiento acústico.

---

1. Introducción

Las condiciones acústicas en los navíos han de adecuarse a las siguientes necesidades: buena comunicación oral, correcta percepción de las alarmas acústicas, ambiente propicio para la toma de decisiones y comodidad suficiente en los espacios destinados al descanso. En este sentido, la normativa de cumplimiento se rige actualmente por el Código sobre Niveles de Ruido a Bordo de los Buques, aprobado por la Organización Marítima Internacional (OMI) en 19 de noviembre de 1981, así como, cuanto lo acuerdan los interesados, por los criterios establecidos en el dictamen definido por *Norske Veritas*. No obstante, dentro del ámbito de las Fuerzas Armadas, nos encontramos con el hecho de que no existe una publicación que regule o establezca, de forma inequívoca, los límites de ruido aéreo a bordo de nuestros buques, sino que varios documentos guía o publicaciones se utilizan a modo de referencia, ninguna de ella con carácter vinculante. Así, las publicaciones *ANEP-24 "Guidelines for Shipboard Habitability Requeriments for Combatant Surface Ship*" y ANEP-26 "*Ergonomic data for Shipboard Space Design in NATO Surface Ship*" sirvieron como guía durante los últimos 15 años y se han aplicado para la construcción de los buques de operaciones anfibias "*Galicia*", "*Castilla*" y BAC "*Patiño*"; de modo que la Armada mejoró notablemente las condiciones de bienestar, tanto de las dotaciones como de la fuerza embarcada, sin dejar de lado la operatividad requerida. En sus últimas construcciones navales la Armada ha trabajado y exigido la clasificación COMF-NOISE de Bureau Veritas (BV), líder en clasificación y certificación. Existe, además, la publicación del Estado Mayor de la Armada "*Estándares de Habitabilidad para Buques de la Armada*" (2010, basada en los estándares requeridos para los modelos de los buques de la US Navy) y la publicación de la Armada Norteamericana MIL-STD 1472G "*Design Criteria Standard Human Engineering*" (que se convierte en una referencia de gran calidad, especialmente en la distribución de los espacios, ya que, además de tener en cuenta los espacios de la OMI, añade otros propios de un Buque de Guerra).

2. Objetivo: Redacción de Normativa Tipo para la gestión acústica en Buques de la Armada

Por todo ello, desde el punto de vista metodológico sería más conveniente que hubiese un texto único, consensuado en determinados puntos concretos y que dejase libertad para adaptar aquellos temas específicos del ámbito militar. En este contexto, la presente comunicación aborda los aspectos clave para la redacción de una Normativa Tipo para la gestión acústica en Buques de la Armada, considerando los puntos de encuentro y divergencias que presentan los documentos existentes en la temática, prestando especial atención a:

a) Los *valores máximos de exposición adecuados para su aplicación normativa,*
b) *los valores máximos de nivel de presión sonora (niveles acústicos instantáneos) permitidos en los diversos espacios del buque,*
c) *los valores de niveles continuos equivalentes permitidos en los diversos espacios del buque y*
d) *los valores de aislamiento acústico a ruido aéreo mínimos que han de conseguirse entre distintos espacios, en función de sus características.*

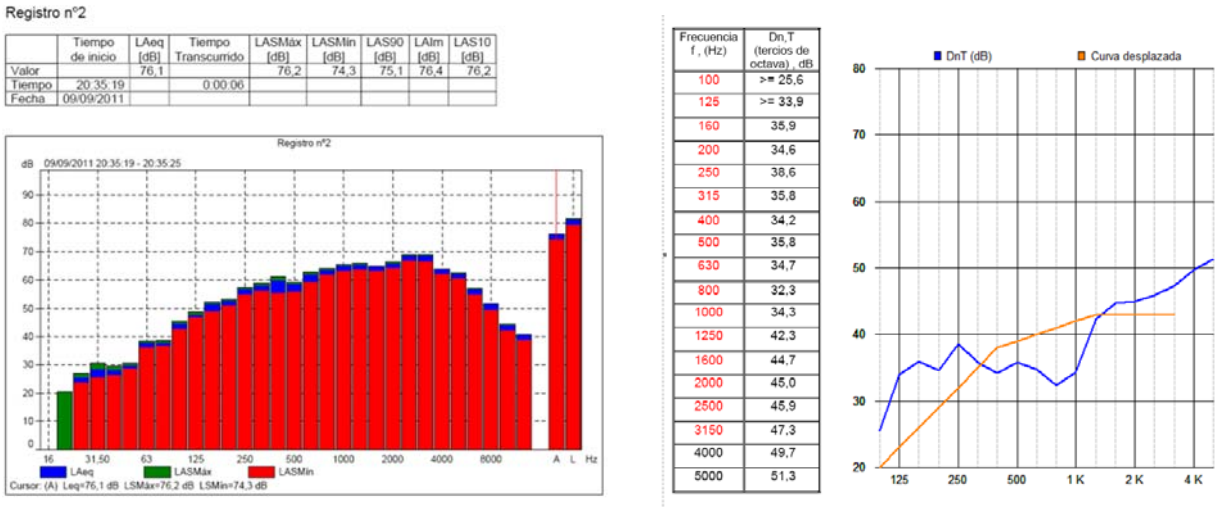


Figura 1. Ejemplos de resultados derivados de muestreos acústicos de ruido ambiental y de ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo (según normas UNE-EN ISO 140-4 y UNE-EN ISO 717-1)

La Normativa Tipo propuesta aporta una distribución de capítulos muy similar a la que realiza en su documento la OMI, debido a que, tras el análisis de toda la documentación, es la que más se ajusta a las intenciones deseadas. En este sentido, se ha consultado:

- *Directiva Europea 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.*
- *Resolución de la OMI, MCS 337(91)"Código sobre niveles de ruido a bordo de buques".*
- *Regla II-1/3-12 del Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar (SOLAS) 1974.*
- *STANAG 4293 "Guidelines for the Acustical Enviroment in NATO Surface Ship" (1990).*
- *Estándares de Habitabilidad para Buques de la Armada (2010).*
- *ANEP-24 "Guidelines for Shipboard Habitability Requeriments for Combatant Surface Ship".*
- *ANEP-26 "Ergonomic data for Shipboard Space Design in NATO Surface Ship".*
- *Clasificación COMF-NOISE de la Sociedad de Clasificación Bureau Veritas.*
- *MIL-STD 1472G "Design Criteria Standard Human Engineering" (2012).*
- *El Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.*
- *El Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.*

De este modo, la redacción de la Normativa Tipo propuesta se sustenta en los siguientes principios básicos o factores condicionantes:

i. *Estudio comparativo de la documentación existente y la identificación de puntos fuertes enriquecedores.*

ii. *Un pormenorizado análisis de los requisitos abordados.*

iii. El conocimiento de los niveles de ruido y de los protocolos de medida del mismo obtenidos por la experiencia en la realización de inspecciones de ruido ambiental y ensayos de aislamiento.

iv. El conocimiento de la realidad acústica a bordo de los buques de la Armada.

3. Resultados: Texto de la Normativa Tipo propuesta

A partir de la evaluación de los documentos anteriores indicados y de los factores condicionantes detallados, se refleja, a continuación, **la Normativa Tipo propuesta** para la gestión acústica en Buques de la Armada (literalmente redactada en *letra cursiva*). De este modo, se aporta un texto mediante el cual se pretende crear un entorno aceptable para el personal de las FF.AA a bordo de nuestros buques.

3.1. Capítulo 1: Ámbito de aplicación

Todas las unidades de nuestra flota, buques de superficie y submarinos, construidos o de nueva construcción, en función del Real Decreto 286/2006 que entró en vigor tras un período transitorio de cinco años, el 15 de Febrero de 2011, de aplicación a todo tipo de buques, independientemente del tipo tamaño y año de construcción.

Se reconoce sin embargo, la dificultad de su aplicación a los buques de la Armada ya construidos, por lo que en el supuesto de no ser posible su desarrollo en éstos, se recomienda el empleo de los métodos para reducir la exposición al ruido redactados por la OMI.

3.2. Capítulo 2: Equipos de medición

*- El **parámetro acústico** a medir es el nivel de presión acústica continuo equivalente ponderado A (LAeq,T), por lo que se exigirá un sonómetro integrador-promediador de precisión de clase 1.*

La utilización de dispositivos de filtro octava o la recomendación respecto al empleo de pantallas antiviento para los micrófonos desarrolladas por la OMI, se adopta como necesaria.

*Respecto de los **calibradores**, deberán satisfacer la norma IEC 60942 (2003-01) y estarán aprobados por el fabricante del sonómetro de que se trate.*

*- Los **instrumentos de medida** y calibradores utilizados para la evaluación del ruido deberán cumplir las disposiciones establecidas en la Orden de 25 de septiembre de 2007, por la que se regula el control metrológico del Estado sobre los instrumentos destinados a la medición de sonido audible y de los calibradores acústicos. En concreto, los sonómetros y calibradores sonoros se someterán anualmente a verificación periódica conforme a la citada Orden, debiendo la entidad que realice dicha verificación emitir un certificado de acreditación de la misma, de acuerdo también con la Orden mencionada. El plazo de validez de dicha verificación será de un año.*

En los trabajos de evaluación del ruido por medición, se deberán utilizar instrumentos de medida y calibradores cuya precisión sea la exigida para los de tipo 1/clase, por la Orden del Ministerio de Fomento, de 25 de septiembre de 2007, a la que se refiere el apartado anterior.

*Dado que la evaluación de las **curvas NCR** precisa el uso de filtros de banda de 1/3 de octava, se emplearán equipos de precisión del tipo 1, debiendo cumplir lo exigido para el grado de precisión tipo 1/clase 1 en las normas UNE-EN 61260:1997 "Filtros de banda de octava y de bandas de una fracción de octava" y UNE-EN 61260/A1:2002 "Filtros de banda de octava y de bandas de fracción de octava".*

*- Será preceptivo que al inicio y al final del proceso de medición acústica se realice una **verificación acústica** de la cadena de medición mediante calibrador de nivel o pistófono, que garantice un margen de desviación no superior a 0,3 dB con respecto al valor de referencia inicial. Esta circunstancia quedará recogida en el informe o certificado de mediciones, donde, además, se indicarán claramente los datos correspondientes al tipo de instrumento, clase, marca, modelo, número de serie y fecha y certificado de la última verificación periódica efectuada.*

3.3.Capítulo 3: Factores condicionantes para la realización de las medidas sonoras

Se observaran las recomendaciones del capítulo 3 del documento de la OMI Código sobre niveles de ruido a bordo de los buques (Resolución MSC.337 (91) adoptada el 30 de noviembre de 2012), incorporando los siguientes aspectos diferenciadores:

a) Las medidas con los filtros de banda de octava centrados en las frecuencias de 31,5 Hz a 8.000 Hz se llevarán a cabo en los siguientes casos:
   - *Cuando el criterio dBA no se cumple y por lo tanto la NCR tiene que aplicarse.*
   - *Para una posición de medida en cualquier compartimento.*
   - *Para todos los espacios de trabajo en los cuales la comunicación hablada es importante.*

b) El viento no ha de superar la escala Beaufort 3 (7-10 nudos) y el estado de la mar que no será mayor de fuerza 3 (0.5 a 1.25 m).

c) Las medidas se realizarán al menos en el 30% de los camarotes y todos los alojamientos adyacentes a los motores o espacios de máquinas, además de, en todos los espacios con dotación permanente en condiciones normales de funcionamiento.

d) Para espacios de más de 50 metros cuadrados se realizarán dos medidas convenientemente espaciadas.

e) Además, se considerarán de modo complementario los siguientes aspectos relativos al Real Decreto 1367/2007; el cual establece, como precaución en la realización de las medidas para la evaluación de los niveles sonoros, las siguientes condiciones ambientales:

- *Las condiciones de humedad y temperatura deberán ser compatibles con las especificaciones del fabricante del equipamiento de medida.*
- *Las mediciones en el medio ambiente exterior se realizarán usando equipos de medida con pantalla antiviento.*
- *Cuando en el punto de evaluación la velocidad del viento sea superior a 5 metros por segundo se desistirá de la medición.*

3.4. Capítulo 4: Niveles acústicos máximos de referencia

Se establece para las áreas de extrema tranquilidad (quirófanos) no sobrepasar un nivel máximo de 45 dBA ($LAeq_{30s}$) de nivel ambiente interior procedente de otros recintos, dejando la aplicación de este requisito a criterio de la Armada.

A continuación se especifican los límites del nivel de ruido ($LAeq_{30s}$ dBA) para diversos espacios (ver tabla siguiente):

CATEGORIAS	Límite (dBA)	NCR
Espacios permanentemente ocupados		
CIC	60	55
Local derrota	60	55
Puente	60	55
Local sonar	60	55
Cuarto radar	60	55
Cámara mando y control submarinos	60	55
Espacios no permanentemente ocupados		
Cámara control de daños	70	65
Salas reuniones y alerta	70	65
Cámaras de maniobra	70	65
Cámaras de control	70	65
Compartimento misiles	70	65
Centro control misiles	70	65
Local radio	60	55
Compartimentos y centrales de artilleria	70	65
Planta propulsora y zonas de trabajo adjuntas	70	65
Espacios de alojamiento (Prioridad confort)		
Peluqueria	75	70
Lavanderia	75	70
Talleres	80	75
Compactadora basura	75	70
Cocina	75	70
Zonas estudio, recreativas y esparcimiento	65	60
Comedores	65	60
Capilla	65	60
Especial tranquilidad		
Chaza,camarotes y sollados	60	55
Compartimentos y espacios de sanidad	60	55
Altos niveles de ruido Comms no importantes		
Sala de máquinas con dotacion permanente	90	85
Sala de máquinas sin dotación permanente	110	105
Diesel generadores	110	105
Salas de máquinas auxiliares	110	105
Cámara de la reductora	110	105
Servo	110	105
Compartimentos de maquinaria auxiliar	110	105
Compartimentos de enfriadores y eyectores	110	105
Cámara de propulsión	110	105
Zonas maniobras de la planta propulsora	110	105
Altos niveles de ruido Comms alto esfuerzo		
Alerones puente	75	70
Puente exterior	75	70
Sala torpedos	75	70
Zonas de aire adyacente	75	70
Zonas de cubierta permanente	75	70

Tabla 1. Límites sonoros ambientales propuestos

Estos valores vienen expresados mediante el parámetro nivel continuo equivalente LAeq (dBA) y para la justificación de su cumplimiento mediante medición en el barco, se tomará un tiempo de medida de 30 segundos ($LAeq_{30s}$ dBA).

El número de muestreos acústicos a realizar vendrá determinado en función del volumen del local receptor, de modo que, en la mayoría de los casos, será suficiente un punto de medida en el centro de la estancia.

3.5.Capítulo 5: Límites de exposición al ruido

Se adopta el valor de 80 dBA como la máxima exposición diaria (24 horas) sin protección; 84,9 dBA como el límite de exposición sin protección durante un periodo máximo de ocho horas y el de 75 dBA durante al menos un tercio de cada periodo de 24 horas.

Se observaran las recomendaciones del capítulo 5 del documento de la OMI Código sobre niveles de ruido a bordo de los buques (Resolución MSC.337 (91) adoptada el 30 de noviembre de 2012).

3.6. Capítulo 6: Aislamiento Acústico a ruido aéreo entre espacios

Para buques de nueva construcción, las paredes, cubiertas y techos que delimitan espacios correspondientes a estancias de la tripulación o el tránsito hacia ellas, han de tener propiedades de aislamiento acústico a ruido aéreo tal que mediante ensayos in situ (Norma UNE EN ISO 140) permitan el cumplimiento de los siguientes valores de aislamiento acústico a ruido aéreo (R'_w) entre recintos:

- *Entre camarotes $R'_w = 35$ dB*
- *Entre comedores, salas de recreo, espacios públicos o zonas de entretenimiento y camarotes o enfermerías $R'_w = 45$ dB*
- *Entre pasillo y camarote $R'_w = 30$ dB*
- *Entre camarotes con puerta de comunicación $R_w = 30$ dB*
- *Sala de máquinas $R'_w = 55$ dB*
- *Espacios técnicos $R'_w = 45$ dB*

Tabla 2. Niveles mínimos de aislamiento acústico a ruido aéreo entre espacios de un buque

En el caso de los buques ya construidos se recomienda emplear, al menos, métodos e indicaciones documentales para reducir la exposición al ruido entre recintos.

4. Conclusiones

Como se ha indicado, los buques de la Armada quedan exentos del cumplimiento de la mayoría de las normativas acústicas, pero no por ello sus dotaciones dejan de padecer los mismos efectos que el resto de hombres de mar. La finalidad del presente trabajo, además de la propuesta de redacción de una Normativa Acústica Tipo, consistió en ampliar conocimientos y profundizar en un tema poco documentado dentro de nuestras normativas. Tras el análisis de los documentos indicados anteriormente, se pueden indicar, de modo complementario, las siguientes consideraciones:

- Se constata la disparidad respecto a los parámetros y valores acústicos aplicables a buques, y más aun refiriéndonos a buques de la Armada Española.
- La normativa más amplia y desarrollada es la correspondiente a la OMI.
- La *Stanag 4293* no aporta prácticamente nada nuevo con respecto al documento de la OMI, salvo completar los procedimientos de medición respecto del análisis espectral.

- La publicación Estándares de habitabilidad para buques de nueva construcción del EMA, resulta una buena guía para la delimitación de los espacios y su operatividad, aunque los límites que establece en alguno de los casos no son aplicables.
- La clase *Comf-Noise* refleja, en general, los límites más exigentes. Respecto a los procedimientos de medición, aplicamos algunas de sus recomendaciones en cuanto a condiciones ambientales, así como en el apartado de puntos de medición, donde implementa la normativa de la OMI respecto de los compartimentos susceptibles de medición.
- La *Mil-Std 1472G* sólo aporta como novedad la reducción de 85 a 84 dB para garantizar la legalidad de no usar auriculares de protección en todo momento.
- El *Real Decreto 286/2006* lo hemos empleado casi exclusivamente para el ámbito de aplicación y límites de exposición, donde resultó ser menos exigente que la normativa de la OMI.

Referencias

1. Isaac López Jiménez. *"Redacción de Normativa Acústica Tipo (parámetros, proceso de toma de datos, valores límite) para el diagnóstico del confort acústico y vibratorio a bordo de buques"*, Trabajo Fin de Grado, Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar.
2. *Resolución de la OMI, MCS 337(91)"Código sobre niveles de ruido a bordo de buques"*.
3. *Regla II-1/3-12 del Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar (SOLAS) 1974.*
4. *STANAG 4293 "Guidelines for the Acustical Enviroment in NATO Surface Ship" (1990).*
5. *Estándares de Habitabilidad para Buques de la Armada (2010).*
6. *ANEP-24 "Guidelines for Shipboard Habitability Requeriments for Combatant Surface Ship"*.
7. ANEP-26 "Ergonomic data for Shipboard Space Design in NATO Surface Ship".
8. *Clasificación COMF-NOISE de la Sociedad de Clasificación Bureau Veritas.*
9. *MIL-STD 1472G "Design Criteria Standard Human Engineering" (2012).*
10. *Real Decreto 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.*
11. *Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas*.
12. *Gestión de la contaminación acústica: análisis de la legislación estatal y propuestas de aplicación para la administración local.*
13. Publio Beltrán. Artículo opinión: *"ruido de buques consecuencias de la entrada en vigor del Real Decreto 286/2006 y su aplicación al transporte marítimo"*.
14. Web: artículo *"Vibraciones en estructuras navales"*.
15. Antonio de la Iglesia Huerta: *"Vibraciones: vigilancia de la salud en trabajadores expuestos"*.

Seguridad y garantía para las unidades de la Armada: la Logística Basada en Prestaciones aplicada al mantenimiento

Carreño Morales, Rafael M. [1,*], Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier [1], Fernández de la Puente de Santiago, Arturo [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar, Plaza de España, 36920, Marín. Emails: rafaelm@cud.uvigo.es (RMCM), fjavierrodriguez@cud.uvigo.es (FJRR), arturo_fp1990@hotmail.com (AFPS)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: rafaelm@cud.uvigo.es (RMCM);

Abstract: La evolución de la logística en el contexto civil ofrece a la logística militar una oportunidad de mejora con la utilización de nuevas técnicas. Enfoques como *Material Requirements Planning* (MRP), *Just in Time* (JIT), *Supply Chain* (SC), han demostrado sobradamente su utilidad. A principios del siglo XXI surge la Logística Basada en Prestaciones, traducción de *Performance-Based Logistics* (PBL), enfoque que probablemente cambiará el apoyo logístico en las Fuerzas Armadas (FFAA) de los países avanzados. En este modelo logístico, el contratista no se limita a vender su producto y realizar las reparaciones necesarias, sino que se hace responsable de dar un apoyo total para alcanzar unas prestaciones determinadas, recibiendo incentivos o penalizaciones según se cumplan o no las condiciones contratadas por ambas partes. En esta comunicación se estudia la aplicación del modelo PBL para la contratación del mantenimiento en unidades de las FFAA. Este modelo, aplicado con éxito en los EEUU durante una década, fue empleado en los contratos de mantenimiento de unidades de algunas marinas de guerra europeas. El caso de España se estudia con rigor en este trabajo, donde se analizan las condiciones para poder aplicar el enfoque PBL en los contratos de mantenimiento.

Keywords: Mantenimiento; prestaciones; logística; prescripciones técnicas; colaboración

---

1. Introducción

A la hora de tratar de cualquier tema relativo a las Fuerzas Armadas (FFAA), es necesario tener que referirnos a los profundos cambios habidos y que siguen sucediendo en el panorama estratégico mundial, desde la caída del Muro de Berlín, el final de la guerra fría, la actual lucha contra la piratería hasta la declaración de la guerra contra el terrorismo. La necesidad de adaptarse a estos cambios, ha impulsado la transformación continua de las FFAA, en un proceso que no ha finalizado.

Una de las funciones clave para que las FFAA puedan desempeñar eficazmente su labor es la función logística, entendida como "la parte del arte de la guerra que tiene por objeto proporcionar a las FFAA los medios necesarios para satisfacer adecuadamente las exigencias de la guerra" [1]. Por ello nos centraremos en la logística como ciencia que se basa en la planificación y ejecución del movimiento de las FFAA así como del mantenimiento de los medios necesarios para ello.

La ciencia o función logística, ha evolucionado considerablemente en el mundo militar, pero últimamente guiada por el desarrollo técnico en el ámbito civil. Esta evolución en el contexto civil ofrece a la logística militar una oportunidad de mejorar su eficiencia y eficacia con la utilización de los nuevos procedimientos desarrollados. Del mundo civil de las empresas surgen durante la segunda mitad del siglo XX técnicas y enfoques como *Material Requirements Planning* (MRP), *Just in Time* (JIT), *Supply Chain* (SC), y es en los primeros años de este nuevo siglo cuando surge la logística basada en prestaciones (PBL), que se ha impuesto y parece que va a representar el futuro en el apoyo logístico de las FFAA de los países militares más avanzados.

En este trabajo, se llevará a cabo un estudio sobre el origen de este enfoque y el resultado de su aplicación en las FFAA de otros países. Tras la comparativa con otros países, se tratará de analizar la viabilidad de este sistema en las FFAA de España, centrándose en la Armada. Este enfoque de apoyo logístico podría garantizar una mejor seguridad operativa para las unidades de la Armada. Finalmente se expondrán las conclusiones sobre los resultados obtenidos y las recomendaciones para la aplicación del método a partir de los estudios realizados.

2. La logística basada en prestaciones. Definición y origen

El enfoque PBL supone un cambio de filosofía que se orienta fundamentalmente hacia el logro. En lugar de proporcionar la mera compra de bienes o productos, se busca la adquisición de resultados concretos o prestaciones en el apoyo a los productos que se compran. Podría decirse que se trata de comprar capacidades y no solo productos. El contratista no se limita a vender su producto y realizar las reparaciones cuando sea necesario, sino que se convierte en el responsable de realizar un apoyo total que permita alcanzar unas prestaciones determinadas. En función de que se alcancen los objetivos establecidos por el cliente, reflejados en las condiciones de contrato, el contratista recibirá una remuneración a través de incentivos o penalizaciones en caso de incumplimientos.

Aunque este modelo le exige al contratista asumir un mayor riesgo, si el funcionamiento de la PBL es eficiente, conseguirá una mayor disponibilidad, un apoyo más flexible y abaratar los costes. Las claves para su buen funcionamiento se basan en un estudio previo, establecer los requisitos adecuados y un buen trabajo llevado a cabo por el contratista, además de una financiación estable.

Según la *Defense Acquisition Guidebook* [2], la definición oficial de PBL es:

> "La compra de apoyo como un paquete de prestaciones integrado, asequible, que está diseñado para optimizar la preparación del sistema y cumplir con los objetivos de rendimiento de un sistema de armas a través de los mecanismos de apoyo a largo plazo con líneas claras de autoridad y responsabilidad. La PBL puede ser aplicada en el sistema, subsistema o nivel de ensamblaje principal en función de las circunstancias exclusivas del programa y del análisis de un caso de negocio adecuado."

La Marina de los EEUU estableció otra definición donde se introduce el término proveedor y le concede al mismo un poder adicional en la toma de decisiones. Según la Navy [2]:

> "Una estrategia PBL es un acuerdo, normalmente a largo plazo, en el cual el proveedor (sociedad comercial, organización, pública o privada) es incentivado y capacitado para satisfacer al cliente global orientado a los requisitos de rendimiento (fiabilidad, disponibilidad, etc.) con objeto de mejorar la eficacia de apoyo del producto al mismo tiempo que se reduce el coste total de propiedad."

(Este coste total de propiedad incluye la adquisición, uso, mantenimiento y formación).

Se puede afirmar que la PBL nació en el sector de la defensa en EEUU a finales de los años 90, fruto del trabajo llevado a cabo por la oficina del Secretario de Defensa, los tres Ejércitos, el Estado Mayor Conjunto y la Agencia de Logística de Defensa. La PBL fue desarrollada como una estrategia que surgió después de analizar las mejores prácticas en la industria [3].

Desde la Segunda Guerra Mundial, el Departamento de Defensa (DOD) de EEUU funcionaba con una logística masiva, provocando a menudo cuellos de botella en el apoyo debido a la gran cantidad de inventario. Tras la guerra fría, el DOD sufrió una gran reducción en su presupuesto; la Revisión Cuatrienal de la Defensa (QDR) establecía la necesidad de que el DOD redujese su infraestructura de apoyo y racionalizase sus procesos de adquisición. Esta nueva situación exigía una logística más flexible y precisa. El documento estratégico *Joint Vision 2010* establecía la Logística Enfocada (*Focused Logistics*) como uno de los cuatro conceptos operacionales en los que habría de basarse la acción conjunta de las FFAA. El documento *Joint Vision 2020*, que actualizaba y mejoraba el anterior, volvía a definir el concepto, hacia cuya consecución se orientaba toda la transformación logística.

Para la renovación de un contrato de apoyo logístico para un nuevo sistema de armas, modernización de uno ya existente, o para el sostenimiento de los sistemas actuales, todos los organismos del DOD y de la Marina de Guerra de EEUU (USN) tienen la obligación de estudiar, como primera opción, la viabilidad de un contrato basado en PBL.

Si el estudio previo, conocido como *Business Case Analisis* (BCA), es satisfactorio y se puede probar que con un contrato PBL se obtendrá un mejor servicio a igual o menor precio que el método tradicional, se firmará entonces un contrato basado en las prestaciones o *Performance Based Agreement* (PBA). En este documento el jefe de programa y los clientes negocian las prestaciones y objetivos que se desean alcanzar para el crédito disponible.

La implementación de la PBL supone básicamente pasar de una gestión de repuestos a una gestión de proveedores y cambiar el ciclo tradicional por la medición de los resultados obtenidos. En EEUU, el enfoque PBL se lleva aplicando durante más de una década y los buenos resultados obtenidos han incitado a otras marinas de guerra a aplicar esta filosofía. De forma sintética, en la tabla 1 se recogen las conclusiones más importantes de la aplicación de la PBL en la marina de EEUU.

Los ciclos de contratación según el enfoque PBL son más largos que en el enfoque tradicional, además implican más personal y mayor especialización para la realización del estudio previo. El estudio previo a realizar es fundamental y debe ser riguroso.
Antes de comenzar la negociación de un contrato basado en PBL es necesario tener claras las ideas y los números. ¿Qué queremos? Ante todo, hay que sentarse a hablar con el contratista.
Hay que ser claro durante la negociación, muy escrupuloso en la supervisión de exigencias y sobre todo ser firme en el cumplimiento de las obligaciones contractuales.
Un contrato basado en PBL está planteado principalmente para nuevos sistemas, fundamentalmente en la fase de diseño. Su complejidad y su riesgo aumentan cuando se aplica a sistemas ya antiguos.
Es mucho más sencillo para la administración plantear un contrato PBL para componentes y repuestos, y en determinados casos también para subsistemas. La aplicación de un PBL muy ambicioso supone un alto riesgo de fracaso en su aplicación.
Es fundamental ofrecer e incentivar la participación de la industria a todos los niveles, evitando la contratación exclusiva de un grupo reducido de grandes compañías.
La aplicación del enfoque PBL requiere un esfuerzo de mentalización y aprendizaje de todas las partes involucradas. Mediante periodos formativos se consigue superar la incomprensión inicial.
Con un contrato PBL recae mucha responsabilidad sobre la industria. La posibilidad de que el acuerdo se rompa tras varios años, hace necesaria la existencia de un plan alternativo desde el inicio.

Tabla 1. Conclusiones de la aplicación del enfoque PBL en EEUU.

3. Aplicación del enfoque PBL en países occidentales

Considerando el liderazgo en asuntos de Defensa de algunos países y las alianzas estratégicas de España, se consideró de interés analizar la aplicación de la filosofía PBL en las marinas de guerra de países occidentales de nuestro entorno. Así pues, se hará una breve exposición de la aplicación y los resultados obtenidos en EEUU, Reino Unido y Francia, pues podrían servir como espejo para España.

3.1. EEUU como origen de la PBL

La PBL surgió en el sector de la aeronáutica y en las compañías aéreas comerciales, donde se centró en conceptos de efectividad operativa tales como disponibilidad de horas de vuelo, repuestos, aviones diarios listos en plataforma, horas de funcionamiento, etc.

La *Naval Air Systems Command* (NAVAIR) se estableció en EEUU en 1966 como sucesora de la Oficina de Armas Navales de la USN. La misión de NAVAIR es proporcionar apoyo al ciclo de vida completo de las aeronaves de la aviación naval, armas y sistemas operados por los marinos. En este contexto, los responsables de la aviación naval de la USN, fueron de los que más rápidamente se

adaptaron a los contratos según PBL y también los que más experiencia acumulada tienen en su aplicación y desarrollo. En la tabla del apartado anterior se resumieron los puntos más importantes que se concluyeron tras una década de aplicación de PBL en los EEUU. Algunos ejemplos y resultados exitosos de contratos PBL en el entorno de la aviación naval de la USN se exponen en la tabla 2.

Equipo / componente	Descripción
Radio ARC-210	El ciclo de reparación de este equipo de comunicaciones de varios aviones y helicópteros, pasó de 23 a 5 días con Rockwell-Collins
Banco de pruebas de sistemas y componentes electrónicos CASS	Lockheed-Martin entregó el Sistema CASS a la USN. Su disponibilidad llegó a superar el 90%
Amortiguador del SH-60	Sikorsky Aircraft Corporation suministra un elemento crítico, el "Vibration Damper" para el helicóptero SH-60
Componentes dinámicos del SH-60	Sikorsky Aircraft Corporation asegura la disponibilidad de los componentes dinámicos del SH-60
Sensores del SH-60	Raytheon asegura la disponibilidad de los sensores del SH-60

Tabla 2. Contratos según enfoque PBL en EEUU

3.2. Los contratos PBL en el Reino Unido

El caso del Reino Unido (RU) es interesante por formar parte del entorno geográfico y económico de España. La capacidad y presupuesto de Defensa del RU no es tan diferente de la de España al contrario de lo que sucede con EEUU. Sin embargo, el RU tiene una gran experiencia en los contratos de colaboración público-privada. Además la industria británica y la estadounidense comenzaron muy pronto a asociarse en acuerdos para acceder a contratos PBL para las FFAA de los dos países, que comparten varios sistemas de armas. Podemos afirmar que la logística basada en prestaciones está introducida en las fuerzas armadas británicas. Por otro lado, las leyes administrativas y mercantiles británicas son muy similares a las de Estados Unidos, aunque en RU no existe como tal el contrato PBL, sino que se denomina *Availability Contracting* (AC), siendo el *Ministry of Defence* (MOD) quien remunera al contratista en función de la disponibilidad de un determinado sistema.

La reciente Revisión Estratégica de la Defensa británica ha detectado un incremento del coste en el que ha derivado el exceso de externalización. También se ha observado una relajación de las normas y exigencias a los contratistas. La principal medida que tomó el MOD fue apoyar decididamente los AC pero tratando de aumentar el número de proveedores extranjeros, europeos o americanos. De este modo pretende forzar a las grandes empresas británicas a que vuelvan a ofertar precios competitivos.

3.3 El caso francés

La armada francesa introdujo el enfoque de la PBL en el año 2004, cuando llevó a cabo la firma de un contrato global de colaboración público-privada entre la empresa pública *Direction des Constructions Navales* (DCN) y la *Marine Nationale* (MN), el cual debía asegurar la disponibilidad de seis submarinos nucleares. El éxito de esta primera aplicación de un contrato PBL fue rotundo para

ambas partes, pues la disponibilidad de la flotilla de submarinos mejoró notablemente en tan solo dos años mientras que los astilleros de la DCN consiguieron una carga de trabajo durante varios años.

La jefatura logística de la MN estableció un plan de revisión y ajuste de los principales contratos de sostenimiento, que consiguió la reducción de 200 contratos tradicionales a 50 de colaboración público-privada, denominados como *Maintien en Condition Opérationnelle* (MCO). Al igual que la introducción del contrato PBL por primera vez, este segundo paso resultó un gran éxito para ambas partes, pues la disponibilidad de la flota aumentó un 20 % y los costes globales se redujeron también un 20%. Como toda mejora, supuso un gran esfuerzo para todos los implicados. En primer lugar el gobierno realizó una revisión del marco legislativo francés para permitir a la MN priorizar este tipo de contratos en su esfuerzo de sostenimiento, además la MN rompió con su método tradicional en los arsenales y a bordo de las unidades y las empresas adoptaron nuevos métodos de gestión empresarial.

3.4 Consideraciones sobre la aplicación de la PBL en Europa

Tras el estudio de la aplicación en diferentes países de nuestro entorno, hemos visto que el modelo británico es muy similar al estadounidense. Los AC alcanzan a todo el MOD y, a diferencia de los EEUU, sigue en aumento la ambición de los contratos, consolidándose programas que gestionan todo el adiestramiento, los astilleros, clases enteras de buques, etc. Todo según la definición debería ser a coste menor de lo que pagaría el MOD, que sería el coste de referencia. Sin embargo, a lo largo del tiempo, el MOD ha perdido su capacidad de supervisión y de análisis financiero, además de una noción clara del coste de referencia inicial. Esto ha derivado obviamente en una sospecha generalizada de que se está pagando más de lo que se debería por los servicios externalizados. Para ellos ya no hay vuelta atrás, resulta muy complicado que puedan recuperar un sostenimiento independiente en el caso de que lo necesitaran. Sus esfuerzos se centran en el control del gasto y la mejora de supervisión.

La marina francesa cometió los mismos errores que la USN al seguir sus pasos. El principal fue el exceso de ambición en el alcance de sus contratos, viéndose obligados a recortar y pasar de disponibilidad completa a disponibilidad por sistemas y subsistemas. A diferencia de la USN, en Francia debieron tramitar los cambios en la legislación obligados por la situación económica de los astilleros y la administración.

En ambos casos, las industrias de defensa nacionales ofertan PBL a clientes internacionales. De esta forma se desarrolla la oportunidad de negocio y se aseguran unos ingresos constantes con clientes constantes. Para un cliente extranjero, el PBL supone una gran tranquilidad a la hora de mantener los sistemas en el nivel adecuado a la vez que se desarrolla la participación de empresas nacionales.

Si hemos de compararnos con alguno de estos dos modelos, el que más se asemeja a la situación española sería el modelo francés, por el marco legal y su industria nacional.

4. Aplicación de la filosofía PBL al caso español

La base de los contratos PBL, se basa en la colaboración de las empresas del sector privado con el sector público. El desarrollo legal que regula este tipo de contratos no alcanza su máximo desarrollo hasta el año 2007, siendo éste el principal motivo del retraso comienzo de la aplicación de la metodología PBL en España. La Ley 30/2007 de 30 de octubre de Contratos del Sector Público (LCSP) introduce el mecanismo de adjudicación de contratos a través del Contrato de Colaboración

entre el sector Público y Privado (CCPP), para su uso en contratos "particularmente complejos y cuando no sea posible la utilización de otras vías de contratación". La LCSP fue actualizada por Real Decreto Legislativo 3/2011, de 14 de noviembre, donde se aprueba el texto refundido de la ley de contratos del sector público.

Las características [4] que podemos destacar de los CCPP según la normativa española son numerosas, pero debemos resaltar para su aplicación las siguientes:

- Complejidad en los contratos, dado que es complicado para la administración el poder definir previamente los medios necesarios para alcanzar los objetivos establecidos.
- Compartición de riesgos durante la elaboración de las clausulas particulares entre el contratista y la administración, de ese modo se obtendrá mayor rentabilidad.
- Beneficios en función de cumplimiento de resultados. A lo largo de la duración del CCPP, se realizará la retribución a la empresa privada según se vayan cumpliendo los objetivos, pudiendo incluirse también penalizaciones.
- La financiación de los medios para llevar a cabo el cumplimiento del contrato será realizada por la parte privada.
- La duración de los CCPP será de un tiempo determinado, aproximadamente un mínimo de 10 años y un máximo general de 20 años.
- El proceso de adjudicación será llevado a cabo por el contratista, que participará en el diseño y elaboración del contrato.
- Por último y más importante, resaltar el carácter subsidiario, pues los CCPP están relegados a última opción, cuando las otras alternativas posibles no satisfacen las necesidades públicas de rentabilidad, coste o eficacia.

Según el Ministerio de Defensa, las necesidades prioritarias a las que podríamos aplicar un CCPP se pueden dividir en tres grupos principales:

- Contratos asociados a personal y sus necesidades, y a las de funcionamiento de los servicios (alimentación, servicios relacionados con la calidad de vida de la fuerza, servicio hospitalario, etc.), si se contrataran conjuntamente con la rehabilitación, mantenimiento y explotación de sus correspondientes infraestructuras y equipamientos.
- Contratos relacionados con las infraestructuras y los sistemas de información y comunicaciones que no son desplegables en los teatros de operaciones.
- Contratos asociados a la operatividad y disponibilidad de los sistemas.

La normativa ministerial relativa a los CCPP considera de mayor facilidad de aplicación de estos contratos en el área de la construcción, mantenimiento de infraestructuras, etc. Considerando de riesgo intermedio los contratos relacionados con sistemas de armamento y material, relacionado con el 2º y 3º escalón de mantenimiento, y considerando de alto riesgo si afectan a unidades de la fuerza, relacionado con el 1º escalón de mantenimiento.

El Ministerio de Defensa tras analizar la aplicación del modelo de otros países, ha adoptado una aproximación prudente de esta filosofía, con la intención de en un futuro, mostrarse más ambicioso. El CCPP español posee las cualidades para permitir a la Armada un sostenimiento basado en las prestaciones, al igual que los PBA norteamericanos o los AC británicos. Salvando las diferencias en referencia al carácter de última opción que impone la ley española al CCPP, siendo en los EEUU una

prioridad. Aun así, los CCPP son apropiados para aplicar el PBL en las FFAA españolas, siempre que haya voluntad por las partes y se realice por personal experto de forma coherente.

4.1. Justificación e interés de la PBL para el caso español

En este apartado se van a exponer las diferentes razones de por qué es apropiado un cambio logístico en la Armada. En primer lugar, por iniciativa del Ministerio de Defensa, la instrucción 5/2008 del SEDEF que regula el sostenimiento de armamento y material, sostiene que la política de contratación se deberá basar, cuando sea posible, en contratos por prestaciones o disponibilidad que permitan transferir a la industria mayor nivel de responsabilidad en el sostenimiento.

Otro punto importante es la situación de nuestras unidades. La Armada Española es una marina que posee un gran número de buques nuevos como los buques de acción marítima (BAM) y otros que aún están en su primer tercio de vida, la mayoría de ellos fabricados en España. La PBL es idónea para unidades modernas, idealmente como filosofía de mantenimiento del ciclo de vida. No obstante la Armada cuenta con unidades no tan modernas, las cuales también son adecuadas para la aplicación de un contrato PBL centrado en subsistemas o componentes. Las unidades aéreas pueden ser sostenidas también mediante PBL, como lo son actualmente los aviones de despegue vertical Harrier AV8B+.

Actualmente España está produciendo sus propios buques y también sus propios sistemas de armas, electrónicos y de comunicaciones. Por ello, debe encargarse de realizar los planes de mantenimiento que se realizan durante el diseño y construcción. Al ser los proveedores los mismos que suministran los repuestos, se producen unos planes de mantenimiento caros debido a su estrategia de negocio. Para evitar esta situación, sería conveniente llevar a cabo un sostenimiento de ciclo de vida basado en PBL.

La instrucción del SEDEF 5/2008 señala también la necesidad de buscar fórmulas innovadoras para aprovechar el exceso de capacidad de los centros logísticos de los Ejércitos y la Armada con el uso compartido con la industria, mediante modelos de cooperación industrial. Los Centros Logísticos, Parques, Arsenales o Maestranzas de los ejércitos disponen de una capacidad considerable tanto en instalaciones como en equipamiento infrautilizadas, debido a las limitaciones a la contratación de personal y a la complejidad inherente a su adaptación a los nuevos Sistemas de Armas. [5].

La Armada está muy interesada en estos nuevos sistemas de apoyo logístico, sobre todo para los nuevos buques. Concretamente, para la fragata F-105 se planteó un apoyo logístico integrado con Mantenimiento Basado en la Fiabilidad o *Reliability Centered Maintenance* (RCM) [6]. Igualmente con los BAM se buscó una reducción de costes de mantenimiento y de tiempo necesario de operaciones de mantenimiento a bordo. Ambas clases de buques tienen capacidad de transmitir vía satélite los parámetros de funcionamiento de sus equipos, monitorizados por el sistema de mantenimiento basado en la condición, al Centro de Supervisión de Análisis de Datos de la Armada (CESADAR). Todas estas innovaciones son herramientas adecuadas para realizar el seguimiento de un apoyo basado en prestaciones, tanto para la Armada como para el propio contratista.

4.2. Casos reales de aplicación de la PBL en España

Para ilustrar las razones expuestas en el apartado anterior, se presentan a modo de ejemplo dos casos de aplicación de contratos PBL en los que hubo participación española.

En el caso del Harrier AV8B la oficina del programa en NAVAIR se centró en un PBL con un único contratista, Boeing, que cubre una lista de 1010 subsistemas y componentes críticos. Al estar la Armada integrada en la oficina del programa Harrier como un miembro más de NAVAIR a efectos logísticos, se le ofreció en 2007 entrar en este PBL desde el primer momento y en igualdad de condiciones con la USN. Para cada elemento se acordó en la práctica un PBL único, con unos parámetros de seguimiento concretos. La mejora en la disponibilidad fue espectacular en todos los casos. La negociación para este PBL empezó en mayo de 2004 y se firmó finalmente en junio de 2007, siendo su puesta en marcha definitiva en enero de 2008.

Se tuvo en cuenta el número de AV8B disponibles cada día referido solamente a los escuadrones operativos. En una aproximación prudente al primer PBL que firman las FFAA españolas, la Armada decidió sumarse al *Harrier integrated supply & support* (HISS) con 273 componentes donde existían dificultades para mantener por el conducto logístico habitual. Hasta entonces el sostenimiento se hacía sobre todo a través del contrato "Albatros" con INDRA, que solía actuar como intermediario.

Para la Armada el HISS no sólo supuso supuesto un ahorro de más del 30% en el coste medio de reparación de estos 273 componentes, sino que la satisfacción del usuario (9ª Escuadrilla y 2º Escalón de Mantenimiento de la FLOAN) fue completa. Los tiempos de reparación pasaron de meses a semanas, llegando en varios casos a pasar de una media de 15 meses a 72 horas.

El Ejército de Tierra (ET) posee desde finales de abril del 2011 [7] el primer contrato basado íntegramente en la PBL firmado en España. Se decidió recurrir a él para el sostenimiento de las cabezas tractoras C/P Kynos Aljaba K-15-100 y los semirremolques 66 Tm Góndola Traylona GP6, las populares "Kynos", ante la imposibilidad de seguir manteniéndolas de manera orgánica, por su elevado coste de reparación, por el excesivo coste de la externalización del servicio de transporte, por el precio del material sustitutivo y por haber desaparecido el fabricante original.

Por todos los riesgos que implicaba la operación del sistema, que estaba dando una disponibilidad muy baja (35-50% frente al 70% requerido) se optó por explorar si algún contratista estaría dispuesto a asumir esos riesgos y dar una disponibilidad superior a un coste similar al soportado en el ET. Además, el Estado Mayor del Ejército había fijado como objetivo mínimo mantener una operatividad de todos los vehículos de ruedas de al menos el 70% diario.

Para definir el PBL se barajaron las siguientes métricas o indicadores de disponibilidad:

- Disponibilidad Operativa Mensual (DOM) global por cada modelo (por NOC).
- Disponibilidad Operativa Mensual por número de serie (o matrícula).
- Tiempo de reparación (duración de la Petición de Mantenimiento desde que se notifica a la empresa hasta que la empresa devuelve el material reparado).

El contrato se iniciaría entregando al contratista una flota operativa al 100% y se abonaría al contratista una cantidad fija diaria en base al número de vehículos operativos. Con la idea de que el contratista consiguiera unos resultados lo más próximos posible a los fijados por el ET, se definieron unas primas y penalizaciones por franjas, sobre el objetivo del 70%.

También se fijaron unas cláusulas de rescisión si el desempeño del contratista resultara preocupadamente bajo. Serían causa de rescisión una DOM de la flota inferior al 40% durante más de 2 meses consecutivos o una DOM por matrícula igual a 0% durante 3 meses consecutivos. Esto último perseguía que no se abandonaran vehículos que tuvieran pendiente alguna reparación complicada.

El contratista podría utilizar las instalaciones del ET y sería responsable de las labores de 2º escalón de mantenimiento y siguientes. Tan solo las labores de 1º seguirían bajo responsabilidad del ET.

Dentro de lo que cabe, este es un PBL sencillo, en el que el órgano de contratación contaba con todo el conocimiento técnico y medios para seguir siendo responsables del sostenimiento de los medios. Sin embargo decidió probar a contar con las empresas para ver si alguna se encontraba en condiciones de aceptar el reto y mejorar los resultados. Como era de esperar, por las razones que ya se han argumentado a lo largo del trabajo, la propuesta era muy sensata y permitía a las empresas optar a un margen de beneficio suficientemente aceptable, por lo que el contrato se cerró con éxito y se prorrogará previsiblemente sin complicaciones. Curiosamente, el ET recurrió a un contrato de servicios con un procedimiento de contratación abierto que finalmente se adjudicó la empresa JPG. Se trata de un contrato de 2,7 millones de euros y un plazo de cuatro años, prorrogable.

El "Kynos" es un buen ejemplo de PBL viable y exitoso en España, materializado con un contrato tradicional que ni tan siquiera ha precisado recurrir a un procedimiento negociado para su definición.

5. Conclusiones

Un contrato PBL aplicado correctamente mejoraría la disponibilidad, permitiría mayor flexibilidad en el apoyo y reduciría los costes a la administración a la vez que mejoraría los beneficios del contratista. Con el PBL ambas partes salen beneficiadas, pero no hay que olvidar que implica asumir riesgos. De todos modos, la instrucción 5/2008 del SEDEF ordena recurrir, siempre que se pueda, a contratos por prestaciones o disponibilidad para el mantenimiento de medios e instalaciones. Por tanto, utilizar el sostenimiento basado en prestaciones no solo es recomendable, es una orden.

Los CCPP/PBL son los más adecuados para la consecución de contratos por prestaciones o disponibilidad. Hasta la aparición de los contratos CCPP, el concepto de PBL no era posible llevarlo a cabo en España por problemas legales. Actualmente esos problemas legales no existen, aunque los CCPP están limitados debido a su carácter de último recurso, al desconocimiento de este tipo de contratos y problemas de financiación del proyecto. La manera legal de acudir a un CCPP será cuando la administración sea incapaz de asumir la financiación del contrato, algo frecuente en estos tiempos. Para iniciar la aplicación de los CCPP/PBL habría que comenzar desde su aplicación más simple, es decir, para el sostenimiento de instalaciones en tierra y centros de instrucción y adiestramiento.

Sobre el apoyo a unidades de la fuerza, se podrían implementar CCPP/PBL centrados en subsistemas y componentes. Siendo más complejos, podrían mejorar la disponibilidad de las unidades.

La aplicación de los CCPP/PBL integrales es recomendable para buques cuando la filosofía de sostenimiento comienza en su diseño. Por la novedad de esta metodología quizás sería más prudente limitar el alcance de los CCPP/PBL a los sistemas o subsistemas en las unidades, hasta obtener la suficiente experiencia tanto la Armada como los contratistas.

Los CCPP/PBL están limitados por la legislación española a una duración entre 10 y 20 años. Lo más apropiado es reducir los plazos a 10 años con opciones de ampliación de dos a cuatro años. Si fuera demasiado tiempo en relación al riesgo a asumir, será preferible la aplicación de modelos mixtos de contratación tradicional, tratando de adaptarlos a las prestaciones o en la disponibilidad.

Una contratación errónea con una deficiencia en los estándares y poca exigencia a los contratistas puede producir que en un periodo corto de tiempo aumente el coste, llegando a superar el coste de los

métodos tradicionales. Por ello, la negociación ha de ser clara y exigente, se ha de ser minucioso en la supervisión y obligar al cumplimiento de las exigencias de las negociaciones. Es necesario que exista una competencia entre varias empresas, independientemente de la nacionalidad de las mismas, para que haya un mayor esfuerzo en las ofertas y poder escoger a la empresa adecuada para la contratación. Además, al haber varias empresas, surge la posibilidad de que en el caso de no estar satisfechos con la empresa contratada, sustituirla al cabo del tiempo sin necesidad de buscar de nuevo.

Para la aplicación del PBL la Armada debe saber exactamente qué es lo que quiere conseguir de ese PBL y cuánto le costaría ese nivel de disponibilidad con el sistema actual de sostenimiento. Conocer el valor total es fundamental para poder compararlo con la oferta que haga el contratista. No obstante, la clave fundamental del éxito del PBL está en el estudio previo, el establecer unos parámetros de seguimiento adecuados, la supervisión del trabajo del contratista y sobre todo una financiación estable.

El personal encargado de los estudios de viabilidad debe estar cualificado para la tarea y poseer los conocimientos necesarios. Es recomendable que los jefes de programa tengan una continuidad prolongada, para seguir de cerca los avances y supervisar el buen funcionamiento del sistema.

El contrato PBL en forma de CCPP tiene las características adecuadas para que la Armada lo utilice en sus modelos de apoyo logístico más innovadores para dar el mejor apoyo a sus unidades de manera global a lo largo de todo su ciclo de vida. Sin embargo, no hay que olvidar el riesgo que conlleva el firmar contratos a largo plazo basándose solo en la confianza mutua. Las tensiones entre ambas partes aparecerán seguramente en cualquier momento. Tanto una parte como la otra estarán obligadas a cumplir con los términos acordados y buscarán resquicios legales en beneficio propio cuando lleguen las dificultades, por eso la negociación detallada y con paciencia es fundamental para cubrir todos los riesgos y circunstancias posibles.

Los CCPP/PBL pueden ser muy positivos, pero es necesario llevar a cabo un cambio en la mentalidad y en la formación del personal implicado en su gestión. Pese a ello, los casos de éxito en la aplicación de la filosofía PBL, permiten que este enfoque contribuya a mejorar la seguridad operativa de las unidades de la Armada. Asimismo, los contratos basados en PBL pueden ofrecer una garantía de disponibilidad inmejorable precisamente por estar basados en las prestaciones de las unidades.

Referencias

1. Salgado, J. *Logística General y Naval Operativa*, 1st ed.; Editorial Naval; Madrid, España, 1973.
2. Defense Acquisition University. Chapter 5 Life-Cycle Logistics. In *Defense Acquisition Guidebook*. Retrieved June 2, 2015 from https://acc.dau.mil/CommunityBrowser.aspx?id=489744
3. Romero, J.; Ibáñez, E.; Sols, A. Nuevas estrategias en el apoyo al ciclo de vida de los buques militares. *Ingeniería Naval* **2011**, 890, 85-89.
4. EuroDefense-España. Instituto Superior de Estudios Empresariales S.A. *Oportunidades que ofrece la Colaboración Público Privada (CPP) en el ámbito de la Defensa*; Madrid, España, 2008 http://www.ceoe.es/resources/image/oportunidades_cpp_ambito_defensa.pdf
5. Secretaría de Estado de Defensa (SEDEF). Instrucción 5/2008. Ministerio de Defensa, 2008.
6. Sánchez, A. El programa F 105. *Revista General de Marina* **2011**, 261, 41-52.
7. http://www.infodefensa.com/es/2011/03/31/noticia-el-ejercito-adjudica-al-grupo-jpg-el-mantenimiento-de-tractos-y-semirremolques.html

Desarrollo de un Sistema de Evaluación de Proveedores en la Gestión Lean de la Cadena de Suministro Aeronáutica de Defensa

Martínez-Jurado, Pedro José [1,*], Moyano-Fuentes, José [2] y Ruiz-López, Carlos Luis [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza. Email: pedromj@unizar.es, cruizl@unizar.es
[2] Universidad de Jaén. Email: jmoyano@ujaen.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: pedromj@unizar.es

---

Abstract: El objeto final de este trabajo se enmarca en un proyecto de mayor alcance, donde se pretende diseñar y validar un sistema de evaluación de proveedores en base al sistema de gestión Lean y, en concreto, adaptado a la industria aeronáutica de defensa con el fin de incorporar sus factores contextuales. Para ello se ha diseñado una metodología consistente en tres etapas principales: a) una revisión de la literatura, b) un método delphi junto con un multicriterio, y c) una investigación en acción en tres niveles de la cadena de suministro. Así, en el presente trabajo se presenta la motivación para desarrollar dicho sistema de evaluación, la metodología diseñada para tal fin y, específicamente, los resultados derivados de la primera fase de la metodología planteada, esto es la revisión sistemática de la literatura. En este sentido, se muestran los sistemas de evaluación y el conjunto de indicadores claves empleados en la literatura y, además, se discute sobre la evidencia empírica identificada aportando tanto un conjunto de implicaciones académicas y profesionales, como el input para la siguiente fase de la metodología para ejecutar el proyecto.

Keywords: Lean Management; Cadena de Suministro; Evaluación de Proveedores; Sistema de Indicadores; Industria Aeronáutica de Defensa.

---

1. Introducción

El sistema de gestión Lean (*Lean Management*, LM) tiene como objetivo principal la minimización de despilfarros tanto en el interior de las organizaciones como a nivel de cadena de suministro [8]. Para

tal fin, se actúa sobre las causas de variabilidad e inflexibilidad, lo cual permite lograr mejoras significativas en costes, plazos, tiempos y calidad [12].

Desde su difusión en la industria del automóvil [11], LM ha sido adoptado exitosamente en diversos sectores industriales y de servicios del ámbito civil, sin embargo su aplicación en el sector de seguridad y defensa ha sido algo más tardía, suponiendo un desafío, e incluso inexistente en algunas industrias de dicho sector [5, 7]. En el caso del sector aeroespacial y, específicamente, en la industria aeronáutica de defensa se comenzó a adoptar a finales de la década de los noventa del siglo XX, principalmente en USA, debido a un entorno caracterizado por la contracción de los presupuestos de defensa tras la Guerra Fría, una competencia internacional creciente, a la adaptación a los continuos cambios tecnológicos, y a la formación del consorcio de investigación *Lean Aerospace Initiative* del MIT [3].

Durante los últimos años se ha producido un proceso de desintegración vertical en los principales contratistas de esta industria, cambiando la configuración y la estrategia de la cadena de suministro, adquiriendo los proveedores (en especial los Tier 1 & 2) un papel crucial [2]. Como consecuencia, se ha impulsado la adopción de LM a lo largo de la cadena de suministro como estrategia competitiva. A pesar de ello, algunos agentes de la cadena de suministro aún no han adoptado LM, se encuentran en una fase primigenia del proceso de adopción, o bien se han encontrado con serias dificultades para adoptar, adaptar y avanzar en el nivel de implementación de LM considerando su contexto industrial [4]. Ello se debe, en gran parte, al papel que desempeñan los factores contingentes de dicha industria en el proceso de adopción e implementación de LM tanto a nivel intraorganizativo como de cadena de suministro.

En esta situación, uno de los principales retos de esta industria sigue siendo reducir plazos de entrega y costes, aumentar la fiabilidad de las entregas y la calidad a la primera y, en términos generales, mejorar su eficiencia y eficacia a nivel de cadena de suministro. En este sentido, el General de Brigada Monforte Moreno [5] subraya recientemente que en la gestión de la cadena de suministro y, por tanto, en la gestión logística es crucial adquirir una visión holística con el fin de lograr una alineación estratégica y un lenguaje común entre todos los agentes implicados.

Por todo ello, los esfuerzos dirigidos hacia la adopción y la mejora del nivel de implementación de la gestión Lean de la cadena de suministro requieren del empleo de metodologías adecuadas y sistémicas, constituyendo un pilar clave que todos los integrantes de la cadena de suministro avancen en el nivel de implementación de LM. En este sentido, el empleo de sistemas de evaluación de proveedores adecuados y alineados con la estrategia Lean a lo largo de la cadena de suministro, multidimensionales, que contemplen factores contingentes y evolutivos sigue siendo un reto a nivel científico [6, 10] y, asimismo, a nivel práctico. Estos gaps son aún más acentuados en la industria aeronáutica de defensa, donde se identifica que la literatura científica le ha prestado una atención escasa y obviando la incorporación de los factores contingentes de dicha industria en el desarrollo de un sistema de evaluación adecuado y eficaz. La importancia de desarrollar dicho sistema estriba en la posibilidad de mejorar la toma de decisiones a nivel integral, puesto que sin un seguimiento y control adecuados los esfuerzos de mejora y la política de desarrollo de proveedores Lean tenderán al fracaso [9].

Así, la motivación del presente estudio responde a una necesidad tanto a nivel científico, dadas las inconsistencias y lagunas de la literatura previa, como a nivel práctico, puesto que una evaluación eficaz de los proveedores continúa siendo un reto. Ello, unido a la importancia de la industria aeronáutica de defensa en el contexto económico español y a que la estrategia Lean en la cadena de suministro representa un pilar para mejorar su competitividad, pone de relieve la pertinencia del presente estudio.

1.1. El Sector Aeroespacial y la Industria Aeronáutica de Defensa en España

Cabe mostrar la importancia tanto del sector aeroespacial como, en concreto, de la industria aeronáutica de defensa en el contexto económico español con el fin de argumentar el interés del presente trabajo. El sector aeroespacial en el año 2014[1] supuso un 0,78% del PIB y un 4,9% del PIB industrial, representando la industria aeronáutica de defensa un 0,35% del PIB y un 2,18% del PIB industrial.

En las siguientes figuras se presenta una panorámica de las principales magnitudes del sector y de la industria aeronáutica de defensa. En la Figura 1 se muestra tanto el volumen de facturación como de empleo del sector, y la relevancia de sus industrias en el año 2014. En la Figura 2 se muestra la evolución del mercado de las industrias aeronáuticas de defensa y civil en los últimos catorce años, donde se puede observar que la de defensa ha recuperado la brecha inicial existente (80-20) respecto a la civil, y cómo en los últimos siete años se han equiparado.

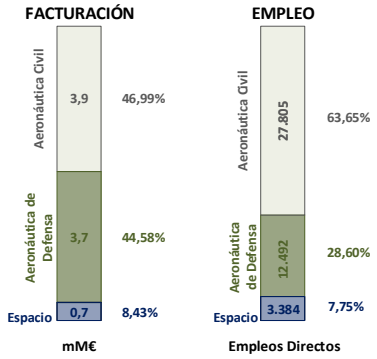


Figura 1. Facturación y Empleo del Sector Aeroespacial (2014).

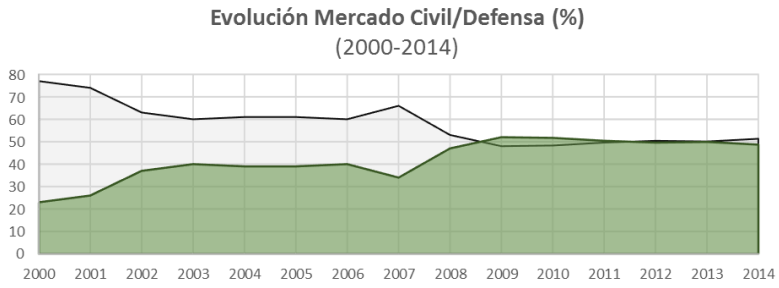


Figura 2. Evolución del Mercado Aeronáutico de Defensa y Civil (2000-2014).

En las siguientes figuras se muestra la evolución tanto del volumen de empleo como de facturación de la industria aeronáutica -defensa y civil- en los últimos catorce años, y cómo ha duplicado su nivel de empleo cuadriplicando su volumen de facturación.

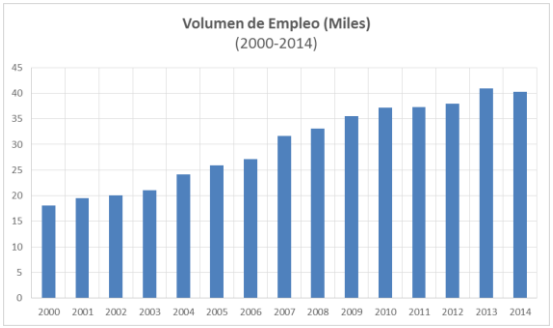


Figura 3. Volumen de Empleo de la Industria Aeronáutica -Defensa y Civil- (2000-2014).

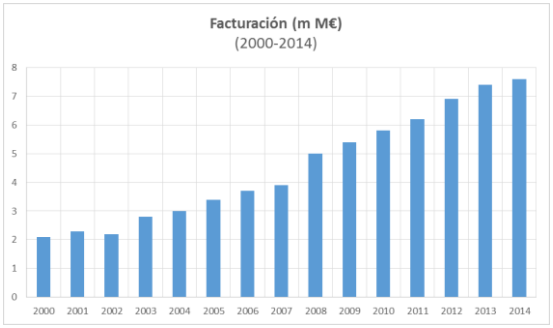


Figura 4. Volumen de Facturación de la Industria Aeronáutica -Defensa y Civil- (2000-2014).

Por último cabe enfatizar que, actualmente, el volumen de empleo en la cadena de suministro de la industria aeronáutica de defensa española se distribuye en un 30 % en contratistas principales y un 70% en la cadena de proveedores, de ahí el papel clave de estos últimos en la industria y en la estrategia Lean a lo largo de la cadena de suministro (Informe Sector Aeroespacial 2014, Fundación Hélice).

[1] Fuente: Informes sectoriales de la Asociación de Empresas Tecnológicas de Defensa, Aeronáutica y Espacio (TEDAE). Año 2014, último dato disponible.

2. Metodología

Con el fin de desarrollar el sistema de evaluación de proveedores Lean se ha diseñado una metodología consistente en tres etapas principales: a) Revisión sistemática de la literatura (*Systematic Literature Review*, SLR), b) método delphi junto con el método multicriterio AHP (*Analytic Hierarchy Process*, AHP), y c) validación industrial mediante un método de investigación en acción en tres niveles de la cadena de suministro. De este modo, se pretende lograr un sistema de evaluación *ad hoc* con el fin de alcanzar las necesidades requeridas por la industria aeronáutica de defensa.

En la siguiente figura se muestran las diferentes fases diseñadas de modo detallado.

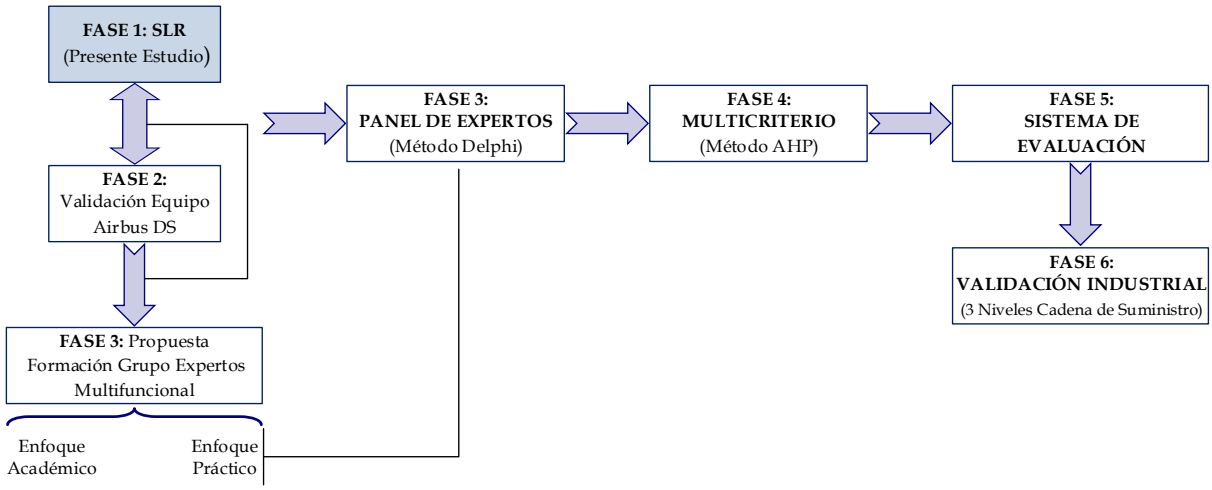


Figura 5. Fases Planteadas en el Diseño y Validación del Sistema de Evaluación.

Así, en el presente trabajo se profundiza en los resultados derivados de la primera fase del proyecto, esto es la revisión sistemática de la literatura con el fin de analizar el estado actual de la investigación sobre los sistemas de evaluación de proveedores Lean. Dicha metodología se caracteriza por su rigurosidad y replicabilidad, permitiendo superar las debilidades de otras metodologías de revisión narrativas tradicionales [1]. En las siguientes figuras se muestra de modo gráfico y sintetizado el objeto de la revisión y las cinco etapas ejecutadas en su desarrollo.

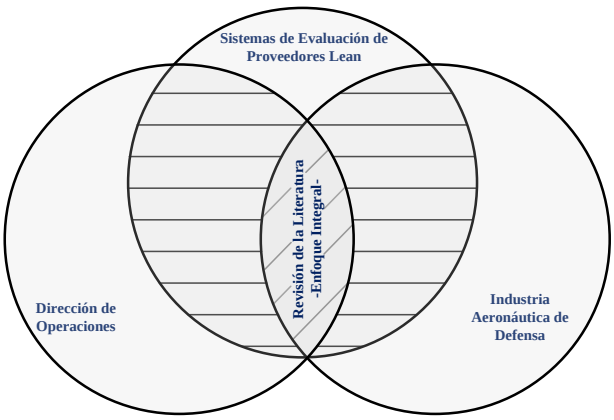


Figura 5. Objeto de SLR.



Figura 6. Etapas empleadas en SLR [1].

Por último, cabe destacar que como resultado del proceso se consideraron sesenta y un trabajos para su análisis y síntesis, mostrándose los principales resultados de modo sintetizado a continuación.

3. Resultados y Discusión

En la siguiente tabla se muestran los cinco tópicos de investigación propuestos tras el análisis de la literatura, junto con los aspectos claves de cada uno de ellos de modo sintetizado.

Tópicos	Aspectos claves
Sistemas de Evaluación Integrados	Sistemas de evaluación diseñados a nivel holístico con el fin de contemplar una serie de métricas de modo integral (intraorganizativas y cadena de suministro). Estructura Organizativa; Nivel Directivo; Nivel Empleados; Factores Humanos; Planta de Producción; Diseño y Desarrollo; Logística Interna; Cadena de Suministro; Nivel de Servicio; Mercado.
Key Performance Indicators (KPIs) aislados	Resultados Operativos y Financieros; Prácticas, Herramientas y Técnicas de Lean (Just in Time –JIT–, Total Productive Maintenance –TPM–, Total Quality Management –TQM–, Human Resource Management –HRM–; Supply Chain Management –SCM–); Factores Contingentes.
Modelos Cualitativos, Cuantitativos y Mixtos	a) Modelos centrados exclusivamente en métricas de corte cualitativo, complejas de evaluar y auditar. b) Modelos centrados exclusivamente en métricas de corte cuantitativo, relativamente sencillas de evaluar y auditar. c) Modelos mixtos, contemplando tanto métricas cualitativas como cuantitativas.
Etapas en el Proceso de Implementación de Lean	Clasifican las métricas en función de la fase en el proceso de implementación de Lean. a) Preparación; b) Expansión; c) Seguimiento y Control; d) Mejora Continua intraorganizativa; e) Cambio Cultural; f) Cadena de Suministro; g) Futuro.
Metodología Empleada	Benchmarking, Value Stream Mapping, Score Model, Fuzzy Logic, AHP, ANP (Analytic Network Process), Bayesian Networks, Simulation, Balanced Scorecard; SMART (Simple Multi Attribute Rating Technique); TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution); DEA (Data Envelopment Analysis); Genetic Algorithms.

Tabla 1. Tópicos de investigación y aspectos claves de los sistemas de evaluación de LM.

Cabe resaltar que se ha elaborado una base de datos donde se contemplan tanto los diferentes conjuntos de prácticas, herramientas y técnicas de Lean y los KPIs o métricas contemplados como la frecuencia de empleo de estos en los trabajos analizados; sin embargo, por motivos de extensión no se muestra en el presente.

Así, en la Tabla 2 se muestra de modo sintetizado las principales métricas empleados para evaluar el grado de implementación de LM. Dichos KPIs son los más empleados en la literatura tras un análisis de las frecuencias comentadas previamente.

Prácticas, herramientas y técnicas: Desarrollo de proveedores y clientes, retroalimentación de clientes y proveedores, entregas JIT, Jidoka, nivelación de procesos, sistema pull, 5S, estandarización, fabricación celular, planificación y control de la producción, tamaño del lote, TPM, resolución de problemas estandarizada, kaizen, Value Stream Mappin (VSM), gestión visual, gestión de la variabilidad, Hoshin Kanri, Andon, gestión de flujos de información y físicos, eficacia equipos de trabajo, compromiso de los trabajadores, formación, delegación, sistema de incentivos, ergonomía, TQM, SMED (Single-Minute Exchange of Die), 5 Whys, root causes, VOC (Voice of Customer), QFD (Quality Function Deployment), FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), Six Sigma, ITs.
Resultados: Tiempo de ciclo, de cambio y de procesamiento, plazos de entrega, fiabilidad de las entregas, capacidad de respuesta, innovación, reducción de actividades NVA (Non Value Activities), utilización de recursos, nivel de inventario, rotación del inventario, no conformidades, desechos y reprocesos, calidad a la primera, indicadores medioambientales, satisfacción del cliente, costes, productividad, cuota de mercado, volumen de ventas, facturación, beneficios, total activos.

Tabla 2. Principales KPIs empleados para evaluar LM.

4. Conclusiones

La principal aportación del presente trabajo estriba en una clasificación de los diferentes sistemas de evaluación de Lean y métricas empleados, así como la frecuencia de uso en la literatura previa. Ello permite arrojar luz sobre los diferentes gaps identificados en la literatura, que junto al sistema de evaluación multicriterio diseñado podrían ser de utilidad tanto a nivel académico como directivo. Ahora bien, el sistema de evaluación tentativo derivado de esta primera fase constituirá la base para validarlo con un grupo de expertos tanto académicos como directivos. Por último, debido a la escasez de estudios que consideran los factores contextuales propios de la industria aeronáutica de defensa, se validará y adaptará mediante una investigación en acción en tres niveles de la cadena de suministro. De este modo, el fin último es desarrollar un sistema de evaluación que contemple las necesidades requeridas por la industria aeronáutica de defensa.

Por último, cabe subrayar que en el contexto actual del sector industrial de seguridad y defensa, la gestión estratégica de la cadena de suministro representa un pilar clave para mejorar su competitividad. No obstante, la adopción de una estrategia Lean en este sector representa un desafío. Por tanto, se considera que los resultados alcanzados en el presente estudio y, principalmente, los derivados de la validación del sistema de evaluación podrían ser útiles no solo para empresas pertenecientes a la industria aeronáutica de defensa, sino también para otras que operen en el sector industrial de seguridad y defensa puesto que pueden compartir factores contingentes similares.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo financiero del proyecto "Estudio de Optimización de la Gestión de la Cadena de Suministro de la Industria Aeronáutica de Defensa a través de la Estrategia Lean Management: Evaluación Inicial, Factores Determinantes y Direcciones Futuras (2013-21)" concedido por el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza.

Referencias directas

1. Denyer, D.; Tranfield, D. Producing a systematic review. In *The Sage Handbook of Organizational Research Methods*; Eds. Buchanan, D.A.; Bryman, A.; Sage Publications: London, UK, **2007**; pp. 671–689.
2. Hallam, C.R.A. Lean enterprise self-assessment as a leading indicator for accelerating transformation in the aerospace industry. *Dissertation* **2003**, Massachusetts Institute of Technology.
3. Lean Advancement Initiative. *LAI Enterprise Self-Assessment Tool (LESAT): Facilitator's Guide- Version 2.0*. Massachusetts Institute of Technology: Cambridge, MA, **2012**.
4. Matawale, C.R.; Datta, S.; Mahapatra, S.S. Leanness estimation procedural hierarchy using interval-valued fuzzy sets (IVFS). *Benchmarking: An International Journal* **2014**, *21* (2), 150–183.
5. Monforte-Moreno, M. Lean logistics: La revolución necesaria en la logística de material. *Revista Ejército* **2014**, *884*, 68–75.
6. Paterson, J.C. *Lean Auditing: Driving added value and efficiency in internal audit*. John Wiley & Sons: Chichester, UK, **2015**.
7. Sacristán-Díaz, M.; Garrido-Vega, P.; García-Ortega, A. Lean production implementation in the suppliers of the aeronautical sector: Dependence or commitment? *Universia Business Review* **2012**, *36* (4), 32–47.
8. Shah, R.; Ward, P.T. Defining and developing measures of lean production. *Journal of Operations Management* **2007**, *25* (4), 785–805.
9. Vinodh, S.; Vimal, K.E.K. Thirty criteria based leanness assessment using fuzzy logic approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2012**, *60* (9-12), 1185–1195.
10. Vinoth, S.; Shama, M.S.; Kamala, V.; Aravindraj, S. Auditing for measuring the extent of lean implementation. In *Handbook of Research on Design and Management of Lean Production Systems*; Eds. Modrák, V.; Semančo, P.; IGI Global book series Advances in Logistics, Operations, and Management Science: Hershey, USA, **2014**; pp. 290–303.
11. Womack, J.P.; Jones, D.T.; Roos, D. *The machine that changed the world*. MacMillan/Rawson Associates: New York, USA, **1990**.
12. Womack, J.P.; Jones, D.T. *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation*. Simon and Schuster: New York, USA, **1996**.

Referencias derivadas de SLR

13. Abdollahi, M.; Arvan, M.; Razmi, J. An integrated approach for supplier portfolio selection: Lean or agile? *Expert Systems with Applications* **2015**, *42*, 679–690.
14. Agarwal, A.; Shankar, R.; Tiwari, M.K. Modeling the metrics of lean, agile and leagile supply chain: An ANP-based approach. *European Journal of Operational Research* **2006**, *173* (1), 211–225.
15. Almomani, M.A.; Abdelhadi, A.; Mumani, A.; Momani, A.; Aladeemy, M. A proposed integrated model of lean assessment and analytical hierarchy process for a dynamic road map of lean implementation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2014**, 72, 161–172.
16. AL-Najem, M.; Dhakal, H.N.; Bennett, N. The role of culture and leadership in lean transformation: A review and assessment model. *International Journal of Lean Thinking* **2012**, *3* (1), 119–138.
17. Alsyouf, I.; Al-Aomar, R.; Al-Hamed, H.; Qiu, X. A framework for assessing the cost effectiveness of lean tools. *European Journal of Industrial Engineering* **2011**, *5* (2), 170–197.
18. Badurdeen, F.; Wijekoon, K.; Marksberry, P. An analytical hierarchy process-based tool to evaluate value systems for lean transformations. *Journal of Manufacturing Technology Management* **2011**, *22* (1), 46–65.
19. Bayou, M.E.; de Korvin, A. Measuring the leanness of manufacturing systems: A case study of Ford Motor Company and General Motors. *Journal of Engineering and Technology Management Journal* **2008**, *25* (4), 287–304.
20. Belekoukias, I.; Garza-Reyes, J.A.; Kumar, V. The impact of lean methods and tools on the operational performance of manufacturing organisations. *International Journal of Production Research* **2014**, *52* (18), 5346–5366.
21. Bhamu, J.; Singh-Sangwan, K. Lean manufacturing: Literature review and research issues. *International Journal of Operations & Production Management* **2014**, *34* (4), 876–940.
22. Bhasin, S. Lean and performance measurement. *Journal of Manufacturing Technology* Management **2008**, *19*, 670–684.
23. Boyer, K.K. An assessment of managerial commitment to lean production. *International Journal of Operations & Production Management* **1996**, *16* (9), 48–59.
24. Buyukozkan, G.; Kayakutlu, G.; Karakadılar; K.S. Assessment of lean manufacturing effect on business performance using Bayesian belief networks. *Expert Systems with Applications* **2015**, *42*, 6539–6551.
25. Camacho-Miñano, M.M.; Moyano-Fuentes, J.; Sacristán-Díaz, M. What can we learn from the evolution of research on lean management assessment? *International Journal of Production Research* **2013**, *51* (4), 1098–1116.
26. Cil, I.; Turkan, Y.S. An ANP-based assessment model for lean enterprise transformation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2013**, *64*, 1113–1130.
27. De Toni, A. and Tonchia, S. Lean organization, management by process and performance measurement. *International Journal of Operations & Production Management* **1996**, *16* (2), 221–236.
28. De Zan, G.; De Toni, A.F.; Fornasier, A.; Battistella, C. A methodology for the assessment of experiential learning lean. *European Journal of Training and Development* **2015**, *39* (4), 332–354.
29. Deif, A. Assessing lean systems using variability mapping. *45th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Athens: Greece, **2012**.
30. Doolen, T.L.; Hacker, M.E. A review of lean assessment in organizations: An exploratory study of lean practices by electronics manufacturers. *Journal of Manufacturing Systems* **2005**, *24* (1), 55–67.
31. El-Baz, M.A. Fuzzy performance measurement of a supply chain in manufacturing companies. *Expert Systems with Applications: An International Journal* **2011**, *38* (6), 6681–6688.

32. Fullerton, R.R.; Wempe, W.F. Lean manufacturing, non-financial performance measures, and financial performance. *International Journal of Operations & Production Management* 2009, *29* (3), 214–240.
33. Guo, Y.; Xu, Z. A model of lean supplier management based on the lean production. In *IFIP International Federation for Information Processing*; Eds. Xu, I.; Tjoa, A.; Chaudhry, S.; Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems II; Springer: Boston, USA, **2007**; Volume 1, pp. 717–726.
34. Gupta, V.; Acharya, P.; Patwardhan, M. A strategic and operational approach to assess the lean performance in radial tyre manufacturing in India: A case based study. *International Journal of Productivity and Performance Management* **2013**, *62* (6), 634–651.
35. Gurumurthy, A.; Kodali, R. Application of benchmarking for assessing the lean manufacturing implementation. *Benchmarking: An International Journal* **2009**, *16* (2), 274–308.
36. Ho, W.; Xu, X.; Dey, P.K. Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. *European Journal of Operational Research* **2010**, *202* (1), 16–24.
37. Karim, A.; Arif-Uz-Zaman, K. A methodology for effective implementation of lean strategies and its performance evaluation in manufacturing organizations. *Business Process Management Journal* **2013**, *19* (1), 169–196.
38. Karlsson, C.; Åhlström, P. Assessing changes towards lean production. *International Journal of Operations and Production Management* **1996**, *16* (2), 24–41.
39. Karvonen, T.; Rodríguez, P.; Kuvaja, P.; Mikkonen, K.; Oivo, M. Adapting the lean enterprise self-assessment tool for the software development domain. *38th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications* **2012**, 266–273.
40. Kollberg, B.; Dahlgaard, J.J.; Brehmer, P.O. Measuring lean initiatives in health care services: Issues and findings. *International Journal of Productivity and Performance Management* **2007**, 56 (1), 7–24.
41. Kumar, S.; Singh, B.; Qadri, M.A.; Kumar, Y.V.S.; Haleem, A. A framework for comparative evaluation of lean performance of firms using fuzzy TOPSIS. *International Journal of Productivity and Quality Management* **2013**, *11* (4), 371–392.
42. Luz-Tortorella. G.; Sanson-Fogliatto, F. Assessment of organizational maturity for lean change. *Sistemas & Gestão* **2013**, *8*, 444–451.
43. Malmbrandt, M.; Åhlström, P. An instrument for assessing lean service adoption. *International Journal of Operations & Production Management* **2013**, *33* (9), 1131–1165.
44. Manotas-Duque, D.F.; Rivera-Cadavid, L. Lean manufacturing measurement: The relationship between lean activities and lean metrics. *Estudios Gerenciales* **2007**, *23* (105), 69–83.
45. Needy, K.L.; Norman, B.A.; Bidanda, B.; Ariyawongrat, P. Assessing human capital: A lean manufacturing example. *Engineering Management Journal* **2002**, *14* (3), 35–39.
46. Österman, C.; Fundin, A. Exploring approaches: How to measure a lean process. *Journal of Management, Informatics and Human Resources* **2014**, *47* (3), 132–142.
47. Raghavan, V.A.; Lam, S.S.; Srihari, K.; Ramakrishnan, S.; Testani, M. A methodology for assessing the adoption rates of an organization's lean transformation. *Proceedings of the 2013 Industrial and Systems Engineering Research Conference*, San Juan: Puerto Rico, **2013**, 998–1005.
48. Ramakrishnan, S.; Testani, M. A methodology to assess an organization's lean readiness for change. *Proceedings of the 2012 Industrial and Systems Engineering Research Conference*, Orlando: FL, **2012**, 1–10.
49. Shan, R.S. The role of assessment in a lean transformation. *Dissertation* **2008**, Massachusetts Institute of Technology.
50. Shetty, S.K.; Componation, P.J.; Gholston, S.E. Content validation of an assessment tool of an individual's perception of lean implementation. *The Journal of Management and Engineering Integration* **2011**, *4* (1), 71–80.
51. Soriano-Meier, H.; Forrester, P.L. A model for evaluating the degree of leanness of manufacturing firms. *Integrated Manufacturing Systems* **2002**, *13* (2), 104–109.
52. Srinivasaraghavan, J.; Allada, V. Application of mahalanobis distance as a lean assessment metric. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2006**, *29*, 1159–1168.
53. Susilawati, A.; Tan, J.; Bell, D.; Sarwar, M. Develop a framework of performance measurement and improvement system for lean manufacturing activity. *International Journal of Lean Thinking* **2013**, *4* (1), 51–64.
54. Susilawati, A.; Tan, J.; Bell, D.; Sarwar, M. Fuzzy logic based method to measure degree of lean activity in manufacturing industry. *Journal of Manufacturing Systems* **2015**, *34*, 1–11.
55. Tahriri, F.; Dabbagh, M.; Ebrahim, N.A. Supplier assessment and selection using fuzzy analytic hierarchy process in a steel manufacturing company. *Journal of Scientific Research & Reports* **2014**, *3* (10), 1319–1338.
56. Taj, S. Applying lean assessment tools in Chinese hi-tech industries. *Management Decision* **2005**, *43* (4), 628–643.
57. Tsai, W.C. Fuzzy measures of supplier evaluation under lean concepts. *Journal of the Operational Research Society* **2009**, *60*, 1005–1011.
58. Unver, H.O. An ISA-95-based manufacturing intelligence system in support of lean initiatives. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2013**, *65*, 853–866.
59. Vimal, K.E.K.; Vinodh, S. Application of artificial neural network for fuzzy logic based leanness assessment. *Journal of Manufacturing Technology Management* **2013**, *24* (2), 274–292.
60. Vinodh, S.; Kumar, D. Development of computerized decision support system for leanness assessment using multi grade fuzzy approach. *Journal of Manufacturing Technology Management* **2012**, *23* (4), 503–516.
61. Wahab, A.N.A.; Mukhtar, M.; Sulaiman, R. A conceptual model of lean manufacturing dimensions. *The 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics* **2013**, 1292–1298.
62. Wan, H.; Chen, F.F. Decision support for lean practitioners: A web-based adaptive assessment approach. *Computers in Industry* **2009**, *60* (4), 277–283.

Importancia adquirida por la certificación sostenible LEED en las actuaciones constructivas de la US Navy y posible adaptación a Defensa

Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier [1]*; Gálvez Valero, María Coral [2]; Arce Fariña, Elena [3]; Núnez-Nieto, Xavier [4]; Rey González, Guillermo [5]; Espada Recarey, Luis [6]

[1] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. fjavierrodriguez@cud.uvigo.es
[2] Oficial de la Armada. coralgalvezvalero@gmail.com.
[3] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. elena.arce@cud.uvigo.es
[4] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. xnnieto@cud.uvigo.es
[5] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. guillermo.rey@cud.uvigo.es
[6] Profesor emérito. Universidad de Vigo. lespada@uvigo.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo.

Abstract: Como bien es conocido, la sensibilidad creciente por la adopción de criterios de sostenibilidad se ha extendido a todos los ámbitos de actividad y está comportando nuevas exigencias de actuación. Actualmente, se pone de manifiesto como los actores involucrados (administraciones, organismos, empresas…) potencian la obtención de la certificación de sus proyectos como instrumento de prestigio y diferenciación. La certificación más desarrollada mundialmente es la certificación LEED (*Líder en Eficiencia Energética y Diseño sostenible*), un sistema voluntario e internacionalmente reconocido que verifica, mediante la revisión por parte de la entidad independiente *US Green Building Council*, que la actuación constructiva de un edificio conlleva el diseño y empleo de criterios encaminados a la sostenibilidad. En este contexto, desde el año 2010, la US Navy se ha propuesto obtener la certificación en sostenibilidad LEED de sus todos sus edificios de nueva construcción (traducido actualmente en unas 212 actuaciones certificadas). Por ello, la presente comunicación analiza proyectos de la US Navy con diferentes niveles de certificación LEED, y pretende simplemente reflexionar acerca del beneficio de la obtención de la Certificación LEED de los proyectos constructivos de Defensa y aportar algunas directrices de actuación.

Keywords: Sostenibilidad, certificación, LEED, créditos, pre-requistos, US Navy.

---

1. Introducción

Como bien es conocido, la sensibilidad creciente por la adopción de criterios de sostenibilidad se ha extendido a todos los ámbitos de actividad y está comportando nuevas exigencias de actuación. Así, la búsqueda del consenso por parte de expertos para normalizar y certificar en sostenibilidad materiales, productos y actuaciones es la mejor demostración de que no se trata de un valor intangible sino cuantificable y valorable. Actualmente, se pone de manifiesto como los actores involucrados (administraciones, organismos, empresas…) potencian la obtención de la certificación de sus proyectos como instrumento de prestigio y diferenciación. En este sentido, no se ha de olvidar que entre los objetivos de las principales organizaciones se han posicionado en los últimos tiempos aquellas medidas encaminadas a la consecución de altas cotas de "*sostenibilidad corporativa*" ("*De la RSC a la sostenibilidad corporativa: una evolución necesaria para la creación de valor*" de Alberto Andreu Pinillos y José Luis Fernández Fernández) con el fin de ganarse el aprecio y la aceptación de sus stakeholders (grupos de interés) y la creación de valor.

Por otra parte, si proyectar y construir de forma sostenible exige un esfuerzo, entonces es esencial que este sea reconocido mediante la adquisición de certificaciones. La certificación más desarrollada mundialmente es la certificación LEED (*Líder en Eficiencia Energética y Diseño sostenible*), un sistema voluntario e internacionalmente reconocido que verifica, mediante la revisión por parte de la entidad independiente *US Green Building Council*, que la actuación constructiva de un edificio conlleva el diseño y empleo de criterios encaminados a la sostenibilidad (posee una serie de niveles en función de los criterios voluntarios conseguidos, además de los pre-requisitos obligatorios). Dentro de los beneficios aportados por las certificaciones de sostenibilidad LEED de las actuaciones constructivas nos encontramos con:

- Reducción de los gastos energéticos y de operación durante la vida útil.
- Aumento de la satisfacción de los usuarios por la mejora del ambiente interno y consecuentemente de sus condiciones de vida y de trabajo (mediante la implementación de estándares de confort ambiental que afectan a su salud y bienestar).
- Acreditar la Responsabilidad Social Corporativa, fácilmente perceptible por la sociedad.
- Prestigio y diferenciación.

En este contexto, desde el año 2010, la US Navy se ha propuesto obtener la certificación en sostenibilidad LEED de sus todos sus edificios de nueva construcción (traducido actualmente en unas 212 actuaciones certificadas).

2. Objetivos

Por ello, la presente comunicación muestra la relevancia que ha adquirido dentro de la US Navy este certificado y como su modelo podría extrapolarse a nuestra propia Armada y a la Defensa española. Así, se analizan los créditos y puntuación de un determinado número de proyectos sostenibles, con diferentes niveles de certificación LEED, pertenecientes a la *US Navy*. Las actuaciones evaluadas han sido los **proyectos *Certified*** *Academic Instruction Building* (14/08/08), *Bachelor Quarters* (2011), *Bremerton BEQ Building 1044* (10/02/06), *Enlisted Dining Facility at Courthouse B* (16/09/10) y *Emergency Control Center* (30/08/10)*;* los **proyectos *Silver*** *Chollas*

Heights Child Development Center (16/12/10), *NAVFAC SE Engineering Operations Center* (17/02/10), *Navy P-302V Hangar NAS Jacksonville* (18/02/10), *P-498 BEQ* (29/08/10) y *P668 Warfare Support Center* (08/03/11)*; los* **proyectos *Gold*** *Aircraft Flight Test & Eval Facility* (19/11/10), *Force Intel Ops Center Ph3-Ci/Ai* (11/11/10), *Navy's Energy & Sustainable Design Demonstration Fac.* (03/03/05), *USN Charles Luke Milam Bachelor Housing* (20/11/09) y *R.A. Burch - Sbt 12* (01/09/10) *y el* **proyecto *Platinum*** *P-1005 Wounded Warrior BEQ* (08/02/11).

Mediante el análisis anterior se pretenden localizar los créditos (de carácter voluntario) más remarcables para la obtención de cada nivel de certificación para un proyecto de la Defensa española. Por otra parte, se exponen los pre-requisitos de obligado cumplimiento. Además, se analizan los diferentes créditos de LEEDv4 (versión más reciente y aún en estado de actualización a la realidad española).

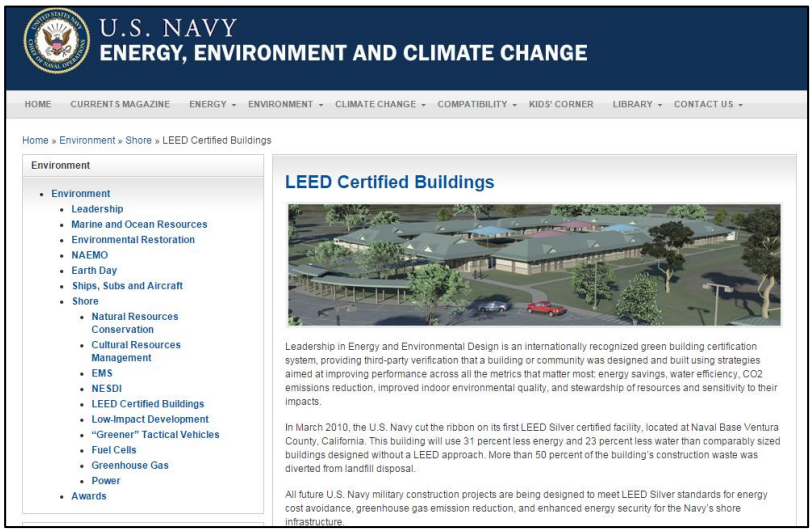
Por tanto, la comunicación pretende simplemente reflexionar acerca del beneficio de la obtención de la Certificación LEED de los proyectos constructivos de Defensa y aportar algunas directrices de actuación.

3. Metodología del estudio

En este apartado conoceremos los recursos bibliográficos principales y las herramientas utilizadas para la elaboración del presente trabajo y la metodología que se ha empleado para ello.

3.1. Recursos

Para realizar la comparativa de los diferentes proyectos de la *US Navy* indicados anteriormente hemos empleado las *scorecards* y *check-list* tomadas de la web perteneciente al *Whole Building Design Guide* (WBDG), un programa del *National Institute of Building Sciences* de Estados Unidos, en la cual se reflejan los 212 edificios con certificaciones sostenibles concedidas por la USGBC (*US Green Building Council*) hasta la fecha de redacción esta comunicación.



La información sobre categorías y criterios de la certificación LEED empleada en este trabajo se extrajo de la publicación del *US Green Building Council* para el 'Diseño y la Construcción de Edificios de la versión LEEDv4 (BD+C, *Building Design and Construction*)'. Toda la información relativa a historia del organismo, versiones, método de registro y pasos para la certificación se encuentra en la web oficial del USGBC y el *GBCEspaña*, respectivamente.

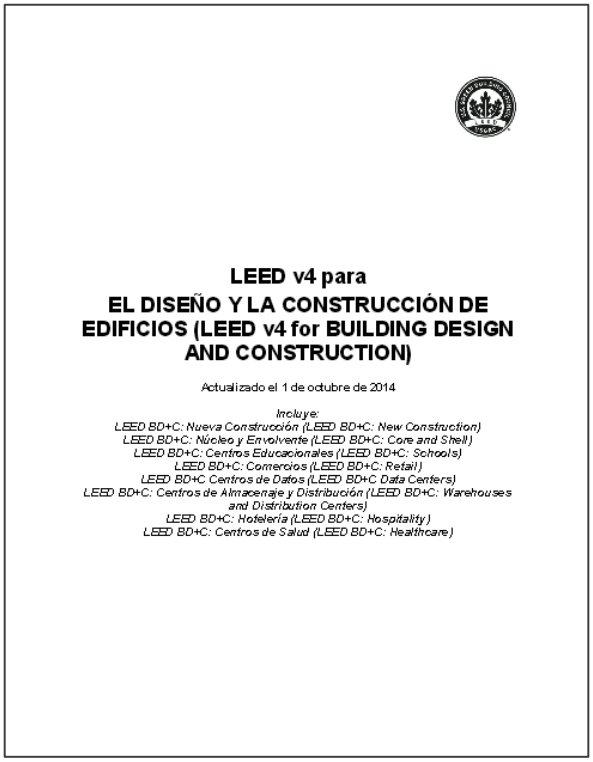


Figura 1. Publicación BD+C de LEEDv4.

La información adicional sobre la *US Navy* se extrajo de su web oficial del NAVFAC *Naval Facilities Engineering Command* [11] y de fuentes de información ajenas. Los datos documentales relacionados con el Ministerio de Defensa español, el 'Sistema de Gestión Ambiental' (SGA) y las normativas que posteriormente se mencionarán, se extrajeron de su página web oficial.

3.2. La Certificación LEED

LEED (acrónimo de *Leadership in Energy & Environmental Design* o 'Líder en Energía y Diseño Medioambiental') es un sistema de evaluación y certificación internacional del desarrollo de edificaciones basadas en criterios sostenibles y de alta eficiencia. Es un marco para determinar **metas tanto a nivel de proyecto como de construcción y en el funcionamiento del edificio**. La organización que desarrolla las directivas LEED es el *U.S. Green Building Council* (USGBC) o Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos. Algunos conceptos básicos son: *Coordinador LEED, Manager LEED de la constructora, Plantillas LEED, Cartas de acciones pendientes y Matriz de Seguimiento LEED* (documento creado, revisado y actualizado por el consultor LEED que identifica el progreso y deficiencias durante el proceso de asesoramiento durante las etapas de diseño y construcción. La tabla indica los requisitos a cumplir, el estado del proyecto en cada revisión y las acciones pendientes, identificando el agente de cada acción). Actualmente se encuentran disponibles los sistemas de graduación de LEEDv4 para:

- Diseño y Construcción de Edificios (BD+C)
- Diseño y Construcción de Interiores (ID+C)
- Operación y Mantenimiento en Edificios (O&M)
- Desarrollos Urbanos (ND)

- Diseño y Construcción de Viviendas (HOMES)

La certificación LEED Se basa en un sistema de puntos obtenidos al satisfacer criterios específicos, clasificados por categorías. En cada una de ellas hay determinados pre-requisitos que los proyectos deben satisfacer obligadoramente. Las nueve categorías son:

- Procesos Integrativos (IP/A&E)
- Localización y Transporte (LT)
- Parcelas Sostenibles (SS)
- Eficiencia en Agua (WE)
- Energía y Atmósfera (EA)
- Materiales y Recursos (M&R)
- Calidad Ambiental de Interiores (IEQ)
- Innovación (I&D)
- Créditos de Prioridad Regional (RP)

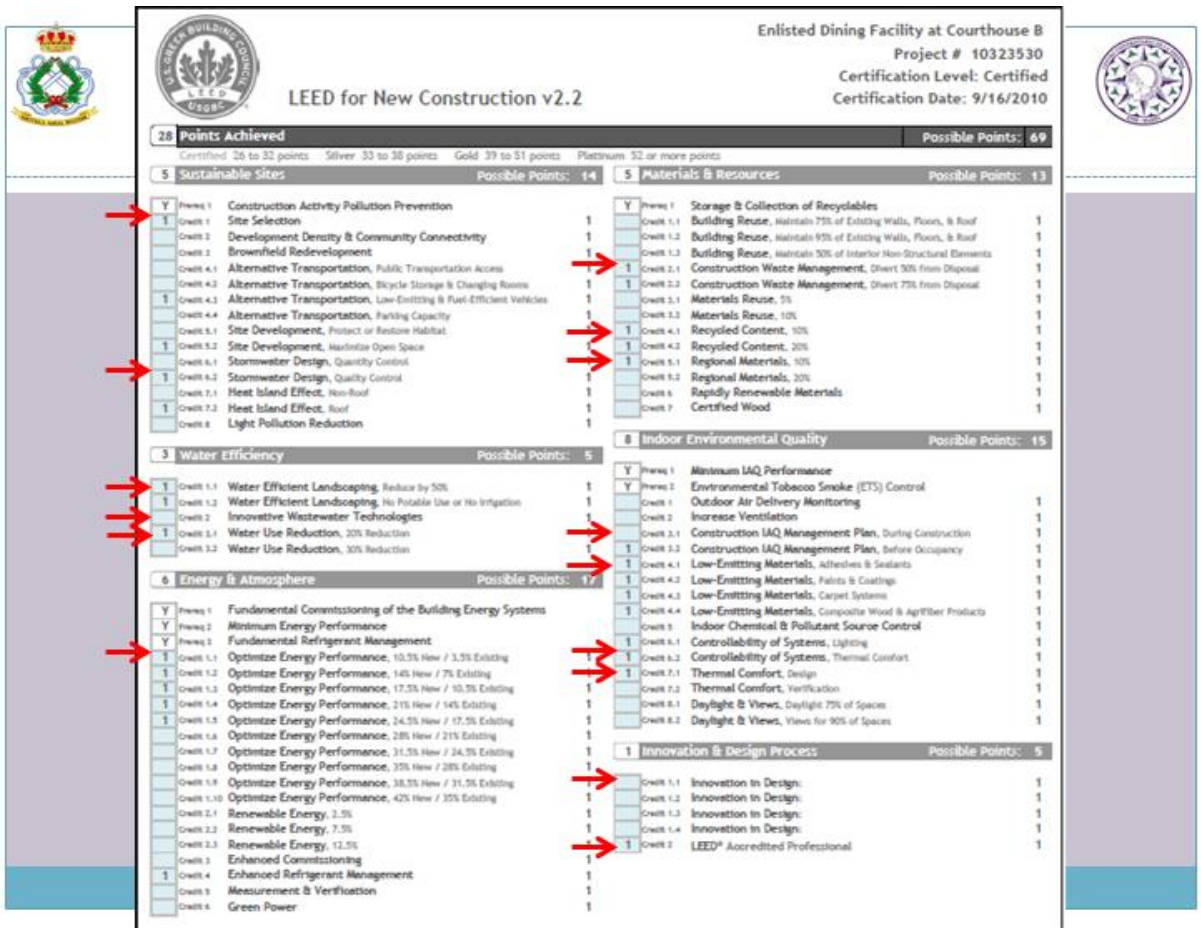
El número de puntos obtenidos por el **proyecto, diseño y ejecución** determina el nivel de certificación LEED que el proyecto recibirá:

- *Certified* (Certificado) LEED: desde 40 a 49 puntos
- LEED *Silver* (plata): desde 50 a 59 puntos
- LEED *Gold* (oro): desde 60 a 79 puntos
- LEED *Platinum* (platino): desde 80 + puntos

Cada categoría de la evaluación LEED se compone de créditos y pre-requisitos. Estos últimos son de obligado cumplimiento y su obtención necesaria para poder optar a la certificación del proyecto. En la evaluación inicial LEED de un proyecto la consultora en sostenibilidad califica previamente cada uno de ellos como: OBLIGATORIO, SEGURO, PROBABLE, DUDOSO, DESCARTADO, NO APLICA.

4. Resultados obtenidos

A continuación se detallan, en los *check* list tipo, los créditos voluntarios más empleados en los proyectos que se han evaluado pertenecientes a la *US Navy*, con diferentes niveles de certificación LEED. A partir de la primera tabla, en rojo se identifican los créditos que, además de los detectados como más empleados para la consecución de la certificación del proyecto en la categoría anterior, permiten el cumplimiento de la categoría de calificación indicada en la parte superior derecha de cada tabla.



Enlisted Dining Facility at Courthouse B
Project # 10323530
Certification Level: Certified
Certification Date: 9/16/2010

LEED for New Construction v2.2

28 Points Achieved — Possible Points: 69

Certified 26 to 32 points Silver 33 to 38 points Gold 39 to 51 points Platinum 52 or more points

5 Sustainable Sites — Possible Points: 14

Y	Prereq 1	Construction Activity Pollution Prevention	
1	Credit 1	Site Selection	1
	Credit 2	Development Density & Community Connectivity	1
	Credit 3	Brownfield Redevelopment	1
	Credit 4.1	Alternative Transportation, Public Transportation Access	1
	Credit 4.2	Alternative Transportation, Bicycle Storage & Changing Rooms	1
1	Credit 4.3	Alternative Transportation, Low-Emitting & Fuel-Efficient Vehicles	1
	Credit 4.4	Alternative Transportation, Parking Capacity	1
	Credit 5.1	Site Development, Protect or Restore Habitat	1
1	Credit 5.2	Site Development, Maximize Open Space	1
	Credit 6.1	Stormwater Design, Quantity Control	1
1	Credit 6.2	Stormwater Design, Quality Control	1
	Credit 7.1	Heat Island Effect, Non-Roof	1
1	Credit 7.2	Heat Island Effect, Roof	1
	Credit 8	Light Pollution Reduction	1

3 Water Efficiency — Possible Points: 5

1	Credit 1.1	Water Efficient Landscaping, Reduce by 50%	1
1	Credit 1.2	Water Efficient Landscaping, No Potable Use or No Irrigation	1
	Credit 2	Innovative Wastewater Technologies	1
1	Credit 3.1	Water Use Reduction, 20% Reduction	1
	Credit 3.2	Water Use Reduction, 30% Reduction	1

6 Energy & Atmosphere — Possible Points: 17

Y	Prereq 1	Fundamental Commissioning of the Building Energy Systems	
Y	Prereq 2	Minimum Energy Performance	
Y	Prereq 3	Fundamental Refrigerant Management	
1	Credit 1.1	Optimize Energy Performance, 10.5% New / 3.5% Existing	1
1	Credit 1.2	Optimize Energy Performance, 14% New / 7% Existing	1
1	Credit 1.3	Optimize Energy Performance, 17.5% New / 10.5% Existing	1
1	Credit 1.4	Optimize Energy Performance, 21% New / 14% Existing	1
1	Credit 1.5	Optimize Energy Performance, 24.5% New / 17.5% Existing	1
	Credit 1.6	Optimize Energy Performance, 28% New / 21% Existing	1
	Credit 1.7	Optimize Energy Performance, 31.5% New / 24.5% Existing	1
	Credit 1.8	Optimize Energy Performance, 35% New / 28% Existing	1
	Credit 1.9	Optimize Energy Performance, 38.5% New / 31.5% Existing	1
	Credit 1.10	Optimize Energy Performance, 42% New / 35% Existing	1
	Credit 2.1	Renewable Energy, 2.5%	1
	Credit 2.2	Renewable Energy, 7.5%	1
	Credit 2.3	Renewable Energy, 12.5%	1
	Credit 3	Enhanced Commissioning	1
1	Credit 4	Enhanced Refrigerant Management	1
	Credit 5	Measurement & Verification	1
	Credit 6	Green Power	1

5 Materials & Resources — Possible Points: 13

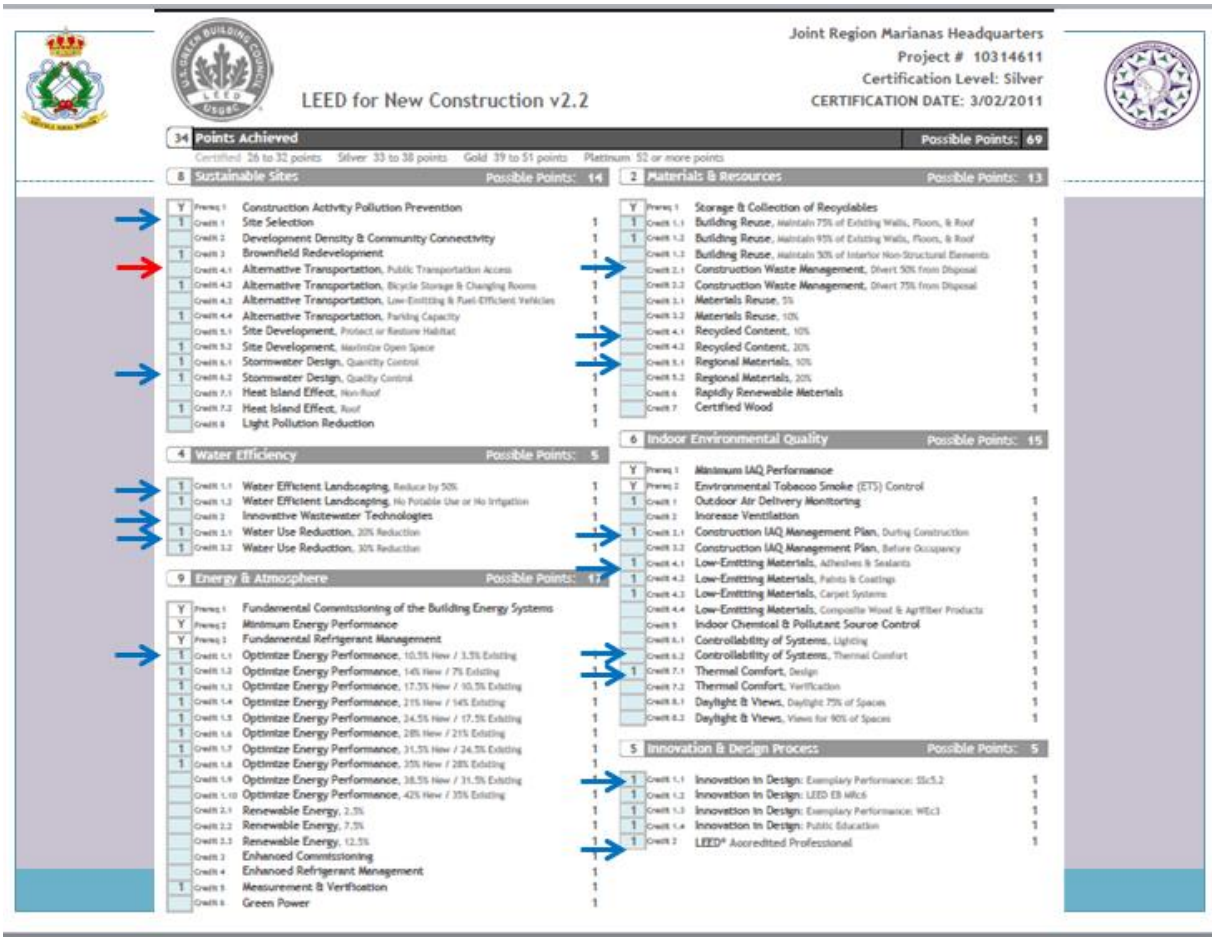
Y	Prereq 1	Storage & Collection of Recyclables	
	Credit 1.1	Building Reuse, Maintain 75% of Existing Walls, Floors, & Roof	1
	Credit 1.2	Building Reuse, Maintain 95% of Existing Walls, Floors, & Roof	1
	Credit 1.3	Building Reuse, Maintain 50% of Interior Non-Structural Elements	1
1	Credit 2.1	Construction Waste Management, Divert 50% from Disposal	1
1	Credit 2.2	Construction Waste Management, Divert 75% from Disposal	1
	Credit 3.1	Materials Reuse, 5%	1
	Credit 3.2	Materials Reuse, 10%	1
1	Credit 4.1	Recycled Content, 10%	1
1	Credit 4.2	Recycled Content, 20%	1
1	Credit 5.1	Regional Materials, 10%	1
	Credit 5.2	Regional Materials, 20%	1
	Credit 6	Rapidly Renewable Materials	1
	Credit 7	Certified Wood	1

8 Indoor Environmental Quality — Possible Points: 15

Y	Prereq 1	Minimum IAQ Performance	
Y	Prereq 2	Environmental Tobacco Smoke (ETS) Control	
	Credit 1	Outdoor Air Delivery Monitoring	1
	Credit 2	Increase Ventilation	1
	Credit 3.1	Construction IAQ Management Plan, During Construction	1
1	Credit 3.2	Construction IAQ Management Plan, Before Occupancy	1
1	Credit 4.1	Low-Emitting Materials, Adhesives & Sealants	1
1	Credit 4.2	Low-Emitting Materials, Paints & Coatings	1
1	Credit 4.3	Low-Emitting Materials, Carpet Systems	1
1	Credit 4.4	Low-Emitting Materials, Composite Wood & Agrifiber Products	1
	Credit 5	Indoor Chemical & Pollutant Source Control	1
1	Credit 6.1	Controllability of Systems, Lighting	1
1	Credit 6.2	Controllability of Systems, Thermal Comfort	1
1	Credit 7.1	Thermal Comfort, Design	1
	Credit 7.2	Thermal Comfort, Verification	1
	Credit 8.1	Daylight & Views, Daylight 75% of Spaces	1
	Credit 8.2	Daylight & Views, Views for 90% of Spaces	1

1 Innovation & Design Process — Possible Points: 5

	Credit 1.1	Innovation in Design:	1
	Credit 1.2	Innovation in Design:	1
	Credit 1.3	Innovation in Design:	1
	Credit 1.4	Innovation in Design:	1
1	Credit 2	LEED® Accredited Professional	1



Joint Region Marianas Headquarters
Project # 10314611
Certification Level: Silver
CERTIFICATION DATE: 3/02/2011

LEED for New Construction v2.2

34 Points Achieved — Possible Points: 69

Certified 26 to 32 points Silver 33 to 38 points Gold 39 to 51 points Platinum 52 or more points

8 Sustainable Sites — Possible Points: 14

Y	Prereq 1	Construction Activity Pollution Prevention	
1	Credit 1	Site Selection	1
	Credit 2	Development Density & Community Connectivity	1
1	Credit 3	Brownfield Redevelopment	1
	Credit 4.1	Alternative Transportation, Public Transportation Access	1
1	Credit 4.2	Alternative Transportation, Bicycle Storage & Changing Rooms	1
1	Credit 4.3	Alternative Transportation, Low-Emitting & Fuel-Efficient Vehicles	1
1	Credit 4.4	Alternative Transportation, Parking Capacity	1
	Credit 5.1	Site Development, Protect or Restore Habitat	1
1	Credit 5.2	Site Development, Maximize Open Space	1
1	Credit 6.1	Stormwater Design, Quantity Control	1
1	Credit 6.2	Stormwater Design, Quality Control	1
	Credit 7.1	Heat Island Effect, Non-Roof	1
1	Credit 7.2	Heat Island Effect, Roof	1
	Credit 8	Light Pollution Reduction	1

4 Water Efficiency — Possible Points: 5

1	Credit 1.1	Water Efficient Landscaping, Reduce by 50%	1
1	Credit 1.2	Water Efficient Landscaping, No Potable Use or No Irrigation	1
	Credit 2	Innovative Wastewater Technologies	1
1	Credit 3.1	Water Use Reduction, 20% Reduction	1
1	Credit 3.2	Water Use Reduction, 30% Reduction	1

9 Energy & Atmosphere — Possible Points: 17

Y	Prereq 1	Fundamental Commissioning of the Building Energy Systems	
Y	Prereq 2	Minimum Energy Performance	
Y	Prereq 3	Fundamental Refrigerant Management	
1	Credit 1.1	Optimize Energy Performance, 10.5% New / 3.5% Existing	1
1	Credit 1.2	Optimize Energy Performance, 14% New / 7% Existing	1
1	Credit 1.3	Optimize Energy Performance, 17.5% New / 10.5% Existing	1
1	Credit 1.4	Optimize Energy Performance, 21% New / 14% Existing	1
1	Credit 1.5	Optimize Energy Performance, 24.5% New / 17.5% Existing	1
1	Credit 1.6	Optimize Energy Performance, 28% New / 21% Existing	1
1	Credit 1.7	Optimize Energy Performance, 31.5% New / 24.5% Existing	1
1	Credit 1.8	Optimize Energy Performance, 35% New / 28% Existing	1
	Credit 1.9	Optimize Energy Performance, 38.5% New / 31.5% Existing	1
	Credit 1.10	Optimize Energy Performance, 42% New / 35% Existing	1
	Credit 2.1	Renewable Energy, 2.5%	1
	Credit 2.2	Renewable Energy, 7.5%	1
	Credit 2.3	Renewable Energy, 12.5%	1
	Credit 3	Enhanced Commissioning	1
	Credit 4	Enhanced Refrigerant Management	1
1	Credit 5	Measurement & Verification	1
	Credit 6	Green Power	1

2 Materials & Resources — Possible Points: 13

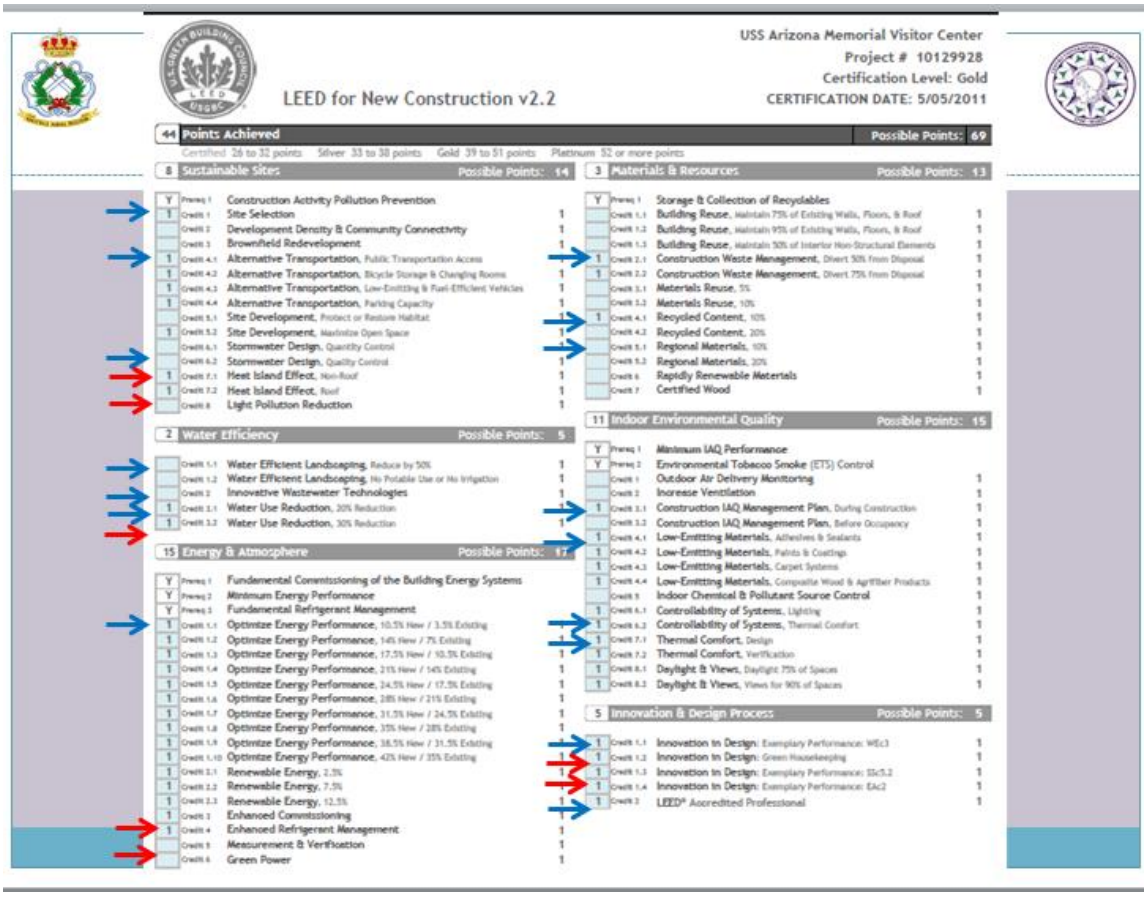
Y	Prereq 1	Storage & Collection of Recyclables	
1	Credit 1.1	Building Reuse, Maintain 75% of Existing Walls, Floors, & Roof	1
1	Credit 1.2	Building Reuse, Maintain 95% of Existing Walls, Floors, & Roof	1
	Credit 1.3	Building Reuse, Maintain 50% of Interior Non-Structural Elements	1
1	Credit 2.1	Construction Waste Management, Divert 50% from Disposal	1
	Credit 2.2	Construction Waste Management, Divert 75% from Disposal	1
	Credit 3.1	Materials Reuse, 5%	1
	Credit 3.2	Materials Reuse, 10%	1
1	Credit 4.1	Recycled Content, 10%	1
	Credit 4.2	Recycled Content, 20%	1
1	Credit 5.1	Regional Materials, 10%	1
	Credit 5.2	Regional Materials, 20%	1
	Credit 6	Rapidly Renewable Materials	1
	Credit 7	Certified Wood	1

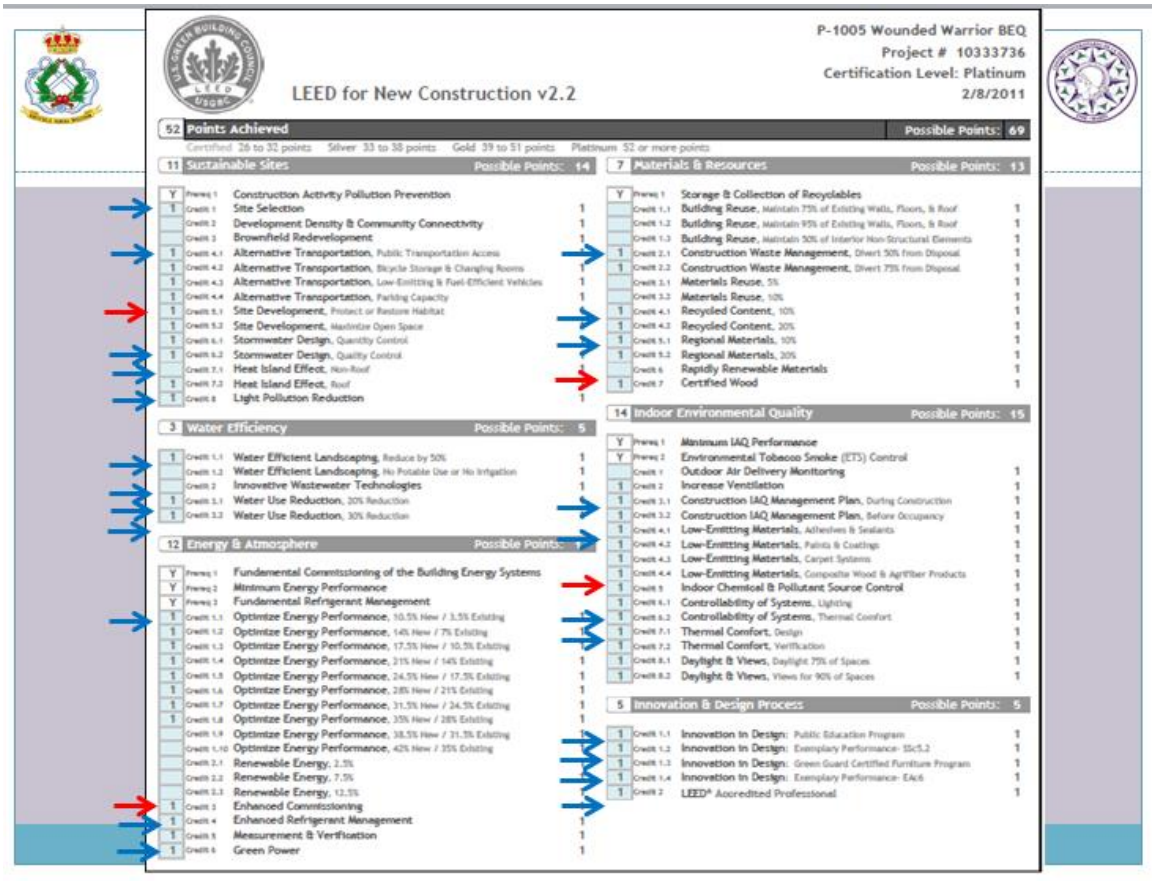
6 Indoor Environmental Quality — Possible Points: 15

Y	Prereq 1	Minimum IAQ Performance	
Y	Prereq 2	Environmental Tobacco Smoke (ETS) Control	
1	Credit 1	Outdoor Air Delivery Monitoring	1
	Credit 2	Increase Ventilation	1
1	Credit 3.1	Construction IAQ Management Plan, During Construction	1
	Credit 3.2	Construction IAQ Management Plan, Before Occupancy	1
1	Credit 4.1	Low-Emitting Materials, Adhesives & Sealants	1
1	Credit 4.2	Low-Emitting Materials, Paints & Coatings	1
1	Credit 4.3	Low-Emitting Materials, Carpet Systems	1
	Credit 4.4	Low-Emitting Materials, Composite Wood & Agrifiber Products	1
	Credit 5	Indoor Chemical & Pollutant Source Control	1
	Credit 6.1	Controllability of Systems, Lighting	1
1	Credit 6.2	Controllability of Systems, Thermal Comfort	1
1	Credit 7.1	Thermal Comfort, Design	1
	Credit 7.2	Thermal Comfort, Verification	1
	Credit 8.1	Daylight & Views, Daylight 75% of Spaces	1
	Credit 8.2	Daylight & Views, Views for 90% of Spaces	1

5 Innovation & Design Process — Possible Points: 5

1	Credit 1.1	Innovation in Design: Exemplary Performance: SSc5.2	1
1	Credit 1.2	Innovation in Design: LEED EB MRc6	1
1	Credit 1.3	Innovation in Design: Exemplary Performance: WEc3	1
1	Credit 1.4	Innovation in Design: Public Education	1
1	Credit 2	LEED® Accredited Professional	1





Figuras 2 a 5. Créditos LEED de las diferentes categorías

5. Algunas conclusiones: Posibilidad de aplicación en la Defensa española

El Ministerio de Defensa en las últimas décadas ha ido asumiendo y divulgando nuevas y mejores políticas ambientales que son un reflejo de su compromiso creciente por el cuidado y respeto del medio ambiente, mejorando su imagen y mostrando voluntad por la mejora en lo relativo a este ámbito. Una muestra de lo anterior fue la implantación del Sistema de Gestión Ambiental (SGA) de la normativa ISO 14000, con 139 actuaciones certificadas. Esta es ya una actuación que facilita en gran medida el paso siguiente: obtener un certificado de sostenibilidad de un organismo independiente de gran prestigio que suponga otorgar una visión de calidad y compromiso. Así pues, podemos concluir algunos puntos a tener en consideración:

- Que un proyecto tenga previamente el SGA es una gran ventaja a la hora de obtener la certificación (al menos nivel *Certified* o el nivel LEED *Silver*, el resto es dudoso porque exigen criterios más exigentes y mayor detalle que el aportado por el propio SGA) de modo que gran parte del trabajo principal estará hecho.
- En relación con lo anterior, se recomendaría que, en caso de desear los niveles LEED *Gold* o *Platinum*, estos se proyecten desde la fase de diseño del proyecto; es decir, limitarnos a proyectos de nueva planta, para así asegurar el retorno de la inversión realizada así como la reducción de los plazos de amortización.
- Aunque hemos alabado la metodología LEED, la cual ha sido el núcleo en el que se ha basado el trabajo, debemos comentar que no es la única metodología presente en el mercado (aunque sí la de mayor prestigio y también difícil de obtener).

Luego, la respuesta a si es asequible y abarcable un proyecto con esta certificación es afirmativa; aunque costoso, es realizable, pero es aconsejable seguir las consideraciones anteriores sobre en qué proyectos, cuándo y a qué nivel aspirar. Así, antes de iniciar un proyecto constructivo de estas características, sería ampliamente recomendable la realización de un análisis exhaustivo de los costes de construcción y ahorro energéticos de un edificio con finalidad semejante al nuevo proyecto constructivo que se desee proyectar. De este modo, conseguiríamos una buena comparativa desde el inicio y un punto de partida para el estudio de viabilidad de otros proyectos futuros. Ello no significa que la arquitectura sostenible o la construcción en base a una certificación en sostenibilidad, no sólo LEED, deje de potenciarse. En este sentido, han de considerarse las ventajas para los grupos de interés y la buena imagen por la contribución práctica a la *sostenibilidad corporativa*, que acrecientan el hecho de que el Ministerio de Defensa esté implicado en la máxima implantación y divulgación de su política ambiental. Ignorar o mantenerse al margen de la tendencia actual por la sensibilidad creciente por la adopción de criterios de sostenibilidad no sólo se podría considerar contraproducente desde el punto de vista económico sino también social, pues la opinión de los grupos de interés de una organización incide decisivamente en el apoyo y desarrollo de nuevos objetivos y proyectos futuros.

Referencia

1. María Coral Gálvez Valero. *"Criterios de sostenibilidad que ha de incluir un proyecto constructivo de la Defensa para conseguir su acreditación en sostenibilidad LEED: El ejemplo de la US Navy",* Trabajo Fin de Grado, Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar.

Plan de Marketing ENM

Vega Hernando, Guillermo [1], Ulloa Sande, Carlos [2,*], Arce Fariña, Elena [2], y Rodríguez Rodríguez, Fco. Javier [2]

[1] Armada Española; Email: gvegher@fn.mde.es (G.V.H.)

[2] Centro Universitario de la Defensa (CUD), Escuela Naval Militar (ENM), Plaza de España 2, 36920, Marín. Emails: carlos.ulloa@cud.uvigo.es (C.U.S.), elena.arce@cud.uvigo.es (M.E.A.F.), fjavierrodriguez@cud.uvigo.es (F.J.R.R.)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: carlos.ulloa@cud.uvigo.es (C.U.S.);

Abstract: El papel del marketing en la sociedad de hoy en día es cada vez más importante. Hace tiempo, esta herramienta sólo era utilizada por grandes compañías para llegar a sus clientes potenciales. Sin embargo, en la actualidad, las empresas que recurren a estas técnicas son tan dispares que llegan a ser empleadas incluso por partidos políticos, universidades, fuerzas armadas u ONGs. En el año 2010 se modifican los planes de estudios en las academias militares, generándose gran desconocimiento sobre cómo son formados los futuros oficiales de las Fuerzas Armadas desde entonces. Este trabajo está centrado en transmitir toda esa nueva información necesaria hacia dos grandes conjuntos: las futuras unidades de la Armada Española que acogerán a los nuevos Alféreces de Navío y a los jóvenes españoles que puedan ingresar en la Escuela Naval Militar. Como en otras muchas ocasiones, la Armada Española se va a adaptar a los tiempos que corren. Para ello se desarrolla la metodología de un plan de marketing aplicado a una institución de enseñanza militar, realizando las analogías correspondientes, e identificando las variables clave. Después de fijar el objeto del proyecto, se analiza el contexto económico-social de nuestro país y todas las variables que pueden influenciar en la toma de decisiones de las distintas estrategias a seguir, finalizando el plan al marcarse las distintas acciones a llevar a cabo por parte de la Escuela Naval Militar.

Keywords: plan de marketing; formación; Alférez de Navío; estrategia; imagen

---

1. Introducción

1.1. Historia y evolución del Marketing

En los últimos años se ha incrementado el uso y empleo del término marketing. Esta palabra, que la Real Academia Española asocia a mercadotecnia, no es otra cosa que el conjunto de principios y prácticas que buscan el aumento del comercio, especialmente de la demanda. Esta definición, muchos expertos como P. Kotler de la Northwestern University [1], la consideran vaga, pues el marketing engloba muchos más aspectos que el simple aumento del comercio, prefiriendo tomar válidas otras más completas, como la dada por la American Marketing Association, en la que se entiende esta ciencia como la actividad o grupo de entidades y procedimientos para crear, comunicar, entregar e intercambiar ofertas que tienen valor para los consumidores, clientes, socios y la sociedad en general. También se pueden aceptar otras definiciones comúnmente empleadas, y socialmente más intuitivas como puede ser el entendimiento del marketing como un proceso social por el cual tanto grupos como individuos obtienen lo que necesitan y desean mediante la creación, oferta y libre intercambio de productos y servicios de valor con otros grupos e individuos [1].

La aclaración de este concepto es de vital importancia porque de esta manera se evitará asociar el marketing a solamente la venta de un producto, como se hacía en los años iniciales, con el uso de la prensa o las revistas donde se persuadía a las personas para convertirlas en consumidores.

Serían innumerables las variables que intervienen en el marketing de cualquier producto. Una simplificación, comúnmente aceptada, es la que elaboró McCarthy y en la que presenta cuatro aspectos fundamentales en todo análisis. Esta teoría, conocida como las cuatro Ps de marketing está compuesta por: producto, precio, plaza y promoción. Aunque en los últimos años se está tendiendo a 4Ps adaptadas al siglo XXI: personas, procesos, programas y performance [1].

La tendencia actual, como se ha analizado en el punto anterior, no es solamente vender el producto sino algo más, como conseguir la plena satisfacción del cliente. Esto se consigue con el empleo y la puesta en práctica de los planes de marketing, siendo este un documento escrito en el que se desarrollan unos objetivos comerciales a conseguir en un periodo de tiempo determinado, de forma estructurada y mediante el uso de distintas estrategias o acciones siguiendo una serie de pasos.

1.2. El Marketing en el ámbito educativo y militar

En el ámbito militar se encuentran estudios como el de Jules I. Borack [2], donde se analizan los resultados de una encuesta efectuada a 4000 jóvenes norteamericanos y en la que se obtienen datos en función de sus edades, raza, región del país, educación recibida, ingresos actuales, estado civil o su grado de satisfacción con su trabajo actual. Durante esta encuesta, les proponen mejorar las condiciones de la vida militar para hacer esta más atractiva a través de medidas como: aumentos de sueldo, bonus, mejora de su educación con cursos y titulaciones o la oferta de contratos de larga duración para probar si con estas medidas se incrementaban los aspirantes a entrar en el cuerpo.

Otro trabajo que sirve como referencia en este campo es el elaborado por Stephen L. Mehay y William R. Bowman en 2002 [3] y que trata de las capacidades que tiene un oficial de marina de la U. S. Navy y las que tiene un titulado en posesión de una carrera universitaria, haciéndose una comparación entre ambos.

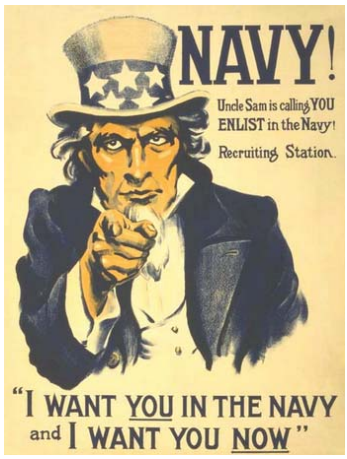


Figura 1. Cartel publicitario empleado por la Marina de los Estados Unidos [4]

Existen otros dentro de la Marina Estadounidense, como los que explican las posibilidades de trabajo y de carrera en la Marina de los EE.UU. y los distintos puestos a ocupar, para los cuales se desarrollarán unas capacidades profesionales determinadas vinculadas a estos. El trabajo muestra los empleos que se pueden desarrollar dentro de la carrera militar a partir de una formación determinada [5].

Otro estudio de Derek B. Stewart [6], donde se encuesta a 12264 jóvenes en instituciones militares americanas y se desarrolla cuestiones sobre el modo de vida y los programas militares a nivel interno.

Existe un trabajo cuyo perfil es más cercano que los anteriores, elaborado por la Unidad de Reclutamiento del Ejército de Tierra de los Estados Unidos [7], donde se trata la posibilidad de una cooperación entre el ejército y distintos centros educativos del país.

Fuera de la Marina Estadounidense existen pocos documentos, uno de ellos, bastante interesante, es el que redacta la Armada del Perú a través de su "Plan Operativo para los años 2012-2016" [8] donde se marcan unos objetivos a cumplir en ese intervalo de tiempo.

Por último, en ciertas instituciones sí que se alcanza la entidad de plan de como es el caso de la Escuela Naval del Perú [9], donde se busca la captación de alumnos en los centros educativos del país.

Otro ejemplo es el Plan de marketing de la Universidad de Jaime I [10] que es muy similar al objeto del trabajo pero en una universidad pública. Se pueden aplicar muchas de las técnicas empleadas por esta universidad al caso de estudio de la Escuela Naval Militar ya que comparten muchas características.

Por último el Plan de marketing de la Biblioteca de la Universidad de Córdoba [11]. Al igual que el anterior, su empleo es muy útil ya que son instituciones parecidas. También realiza un análisis DAFO con el fin de poder sacar el máximo partido a esta sección de la Universidad. Son objetivos menos ambiciosos que los establecidos por la Universidad Jaime I, ya que sólo afectan a un sector pequeño de la institución pero que sin duda es un elemento que va a marcar si un centro está a la altura de los mejores.

2. Análisis estratégico

2.1. Objeto del análisis

Dentro de la Armada, la Escuela Naval Militar (ENM) es la encargada de formar a los nuevos Alféreces de Navío que iniciarán su carrera militar en sus primeros destinos tras recibir los despachos, al finalizar sus estudios. Se analizó el proceso de formación de un Alférez de Navío en sentido crítico y se comprobó si realmente está preparado para salir destinado a las unidades que les requieren. Aunque este objetivo es importante, no es el principal del trabajo, pues este se centró en mostrar a esas unidades futuras que ya están preparados y que no deben existir inquietudes por haberse modificado el plan de estudios de los oficiales de las Fuerzas Armadas. Esta modificación supone una variación en su modelo de formación para que se garantice lo establecido en la legislación actual [12, 13].

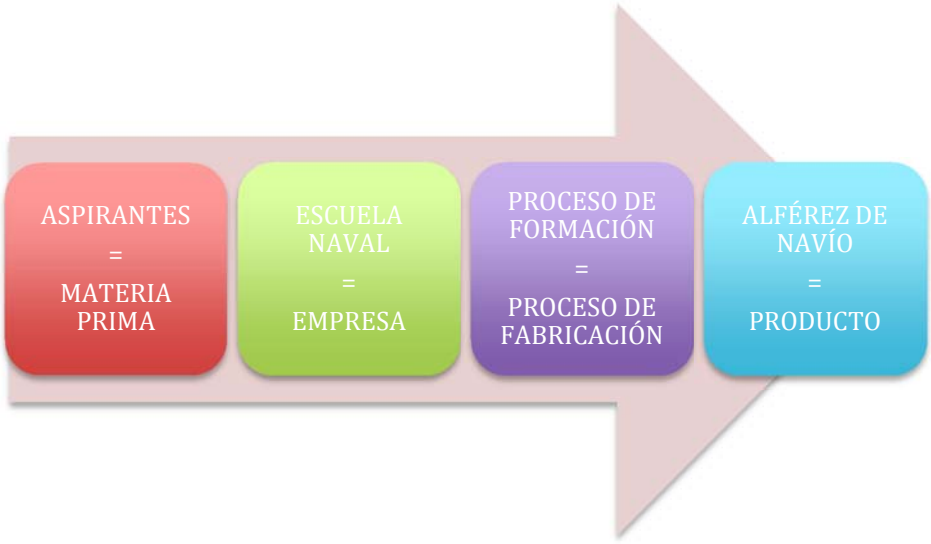


Figura 2. Relación de términos equiparables a la realidad

Para conseguir este objetivo final, es necesario, en primer lugar, definir cuál será el objeto de análisis durante todo este proceso. En este trabajo, se analizó un producto adaptado a las condiciones ámbito de la ENM. Por esa razón, se debe entender como tal al futuro oficial de las Fuerzas Armadas, en concreto, a un futuro Alférez de Navío, que es formado, o "fabricado" en una empresa llamada Escuela Naval Militar, la cual es experta en ese sector.

La Figura 2 se debe tener en mente a lo largo de todo el trabajo, ya que se mencionarán únicamente términos como Aspirantes, ENM, proceso de formación y Alférez de Navío en lugar de materia prima, empresa, proceso de fabricación y producto.

Existe un segundo objetivo del trabajo, que surge como consecuencia del primero: mejorar la captación de aspirantes para poder tener a los mejores alumnos en el proceso de formación. Por tanto, es fundamental dar a conocer la Armada como institución, tal y como propuso el Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada en las "Líneas Generales de la Armada 2012" [14], convirtiéndose la comunicación en el sexto objetivo de su mandato.

2.2. Variables a analizar

En todo plan de marketing es fundamental saber qué información es importante para conocer la situación actual del producto, su evolución en los últimos años y qué perspectivas de futuro tiene. Si esta recopilación de información fuera incompleta, errónea o irrelevante se tendrá un grave problema a la hora de valorar el resultado final. Es por eso que una parte importante del trabajo, por no decir la

más, consiste en identificar aquellas variables que puedan influenciar en la correcta evolución del producto. Se siguió un análisis coherente, desde aquellos factores externos a los internos para, poco a poco, ver cuáles de ellos van a proporcionar ventajas, cuáles de ellos no y cuáles serán neutros, es decir, aquellos que en principio se deberán analizar, pero no van a tener ningún peso en la toma de decisiones.

Es importante tener una visión clara y concisa de qué se desea obtener, porque la recopilación de estos datos es un proceso lento y que en muchos casos va a requerir de mucho tiempo, no sólo para obtener esa información sino también para procesarla, evaluarla y presentarla. Resulta de vital importancia tener una planificación previa e ir evolucionando de manera que se pueda tener toda la información en el momento que se necesite y no olvidar el objetivo final del trabajo, que será la línea que se debe seguir en todo momento.

El objetivo de este análisis será la construcción de una matriz DAFO, en la cual se presentan todos estos datos de una manera objetiva, resumida y rápida. A partir de los datos recogidos en esta matriz, se sacan unas conclusiones que llevarán a la toma de unas estrategias que harán cumplir con los objetivos del plan de marketing.

Por último, una vez se tengan decididas las estrategias a seguir, se redactó el plan de marketing como tal, en el que se dan unas recomendaciones a la Escuela Naval Militar para que en el futuro ponga en práctica y así mejorar su imagen frente a las unidades de la Armada Española que serán sus clientes.

2.2.1. Análisis externo

Se realizó un análisis de entorno incluyendo todas las variables que pudieran influir en el proceso. Se realizó un estudio del entorno desde diferentes ámbitos: económico, demográfico, político-legal y socio-cultural.

Se hizo un estudio de la demanda del producto en el mercado, teniendo en cuenta la tasa de crecimiento del mercado en los últimos años y la segmentación existente.

También se realizó un estudio del comportamiento del consumidor en este mercado, analizando las personas que intervienen en el proceso de compra.

Dentro de esta analogía se estudiaron también competidores y proveedores.

Todo el análisis externo se realizó empleando fuentes de información secundarias. Este tipo de fuentes de información se encuentra disponible en estadísticas y bases de datos oficiales, estudios previos o fuentes sindicadas. Dentro de este tipo de fuentes destacan el BOE (Boletín Oficial del Estado); BOD (Boletín Oficial de Defensa); CIS (Centro de Investigaciones Sociológicas); Ministerio de Defensa, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte o el Centro Universitario de la Defensa de Marín entre otros.

2.2.2. Análisis interno

El análisis más exhaustivo realizado fue el interno, donde se estudiaron a fondo los aspectos productivos de la organización (la Escuela Naval Militar en este caso), desgranando el proceso de fabricación (plan de estudios). Se realizó también un análisis de los aspectos organizativos, y de costes de la organización.

Para el análisis interno se emplearon también fuentes de información secundarias. Estas fuentes no fueron suficientes para conocer en profundidad el funcionamiento de la ENM, de manera que se realizaron una serie de técnicas para recopilación de información de fuentes primarias.

3. Obtención y procesado de información

Se establecieron unos objetivos relativos a la formación universitaria del CUD, la formación militar impartida en el ENM y sobre generalidades del proceso formativo, y se planteó la realización de entrevistas a responsables de la ENM. Se entrevistó al Subdirector del CUD, al Secretario del Jefe de Estudios de la ENM, y al Secretario del Jefe de Instrucción. También se realizó una encuesta a los Comandantes de las Brigadas presentes en la escuela en el momento de realizar el estudio.

Además de esta información obtenida directamente se realizó una encuesta a los alumnos presentes en la ENM. Aunque resulte ambiguo realizar los dos métodos de obtención de información y aunque con las encuestas se consiguieron la mayoría de los objetivos, con las entrevistas se reforzaron estos datos.

3.1. Encuestas a los alumnos y comandantes de brigada

Se realizó una ficha de la encuesta, incluyendo el objetivo de la misma, que no es otro que conocer la visión del alumnado y los mandos del plan de estudios y su ejecución. En la ficha se contemplaron también el ámbito, el universo, el tamaño de la muestra, el muestreo realizado, el procedimiento de recogida de información y la fecha de realización del trabajo.

Se realizaron pruebas de verificación de las encuestas que permitieron corregir errores de cara al trabajo de campo.

3.2. Entrevistas a los mandos

Gran parte de la información se extrajo de las encuestas realizadas. Sin embargo, para reforzar estos datos se realizaron entrevistas a personal con puestos de gran responsabilidad, como son el Subdirector del Centro Universitario de la Defensa de Marín, el Secretario del Jefe de Estudios del Centro y el Secretario del Jefe de Instrucción, a los que se les realizó una entrevista previamente elaborada, con el fin de obtener información valiosa e incluso atendiendo a todo aquello que puedan aportar más allá de los objetivos mínimos.

3.3. Procesamiento y análisis de los datos

Los resultados obtenidos en las encuestas se procesaron con el programa estadístico SPSS, realizando varias pruebas de análisis: análisis global de comparación de medias, análisis de varianza y segregación por conjuntos.

4. Resultados y diagnóstico

Con los resultados obtenidos en la obtención de información primaria y secundaria se realizó un análisis DAFO. Con el empleo de la matriz DAFO se pueden recoger de forma clara y concisa las principales debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades identificadas en el análisis estratégico.

De este modo se sintetizaron, de manera objetiva, todos los elementos estudiados durante el análisis estratégico y se expusieron en una matriz para poder consolidar aquellos que son beneficiosos para la institución, pero sobre todo, mejorar aquellos que resulten perjudiciales.

AMENAZAS	**OPORTUNIDADES**
Otras escuelas/academias. Desinformación de la Escuela Naval. Crisis económica = Bajos presupuestos.	Demografía. Nueva ley que regula la enseñanza militar. Centros de reclutamiento. Mejora de la calidad de la materia prima.
Plan de estudios exigente. Tiempo de espera para una nueva venta. No se cubre la demanda inicial. Inversión comercial. Afianzamiento de conocimientos.	Adquisición de alta titulación. Mejora continua del producto. Conocimiento del destino del producto. Grado de desarrollo tecnológico. Imagen del producto y de la marca. Estabilidad de los empleados.
DEBILIDADES	**FUERZAS**

Figura 3. Matriz DAFO

5. Planificación estratégica y conclusiones

5.1. Objetivos del plan de marketing

La Escuela Naval Militar, a diferencia de muchas empresas, no trabaja por predicción de la demanda sino bajo pedido, lo que quiere decir que no obtiene mayor beneficio promocionando a un mayor número de oficiales, sino que su máximo rendimiento será cuando coloque todos sus productos, de alta calidad, sin perder ninguno en la línea de producción, empleándose los menores costes posibles. Con esto se quiere decir que cuánto más preparado esté el Alférez de Navío, menos alumnos se queden en el camino de ser oficiales en el proceso de formación y menos recursos se tengan que emplear para ello, mejor será el sistema de producción.

Por estas razones, no tiene sentido fijar más objetivos que los comerciales cualitativos, que serán, entre otras cosas, los que mejoren la imagen de la Escuela Naval Militar. Las unidades de la Armada no esperan tener un producto con una buena relación calidad/precio sino que se quiere obtener la máxima calidad. Los costes son importantes pero no deben ser un criterio base a la hora de las tomas de decisión.

Los objetivos fijados, así como las acciones planificadas posteriormente para conseguir esos objetivos, tratan de aprovechar las fortalezas de la organización y las oportunidades que ofrece el entorno, y convertir las debilidades en fortalezas y las amenazas en debilidades. Se redactaron en forma de objetivos concretos y se materializaron en la propuesta de acciones a corto y medio plazo.

	OBJETIVO	SE DIRIGE A:
1	Aumento 1% en el concepto imagen muy buena de las encuestas del CIS.	SOCIEDAD
2	Mejorar el porcentaje de alumnos de nuevo ingreso que no hayan tenido ninguna relación directa con las Fuerzas Armadas en un 10%.	SOCIEDAD
3	Reducción del número de alumnos que requieran de un curso "0" en un 10%.	SOCIEDAD
4	Aumentar 10000 visitas en el video institucional de la ENM.	SOCIEDAD
5	Reducir un 25% los problemas de los alumnos fuera de la ENM.	SOCIEDAD
6	Aumentar en un 10% el número de personas no militares que visitan la ENM, independientemente del motivo.	SOCIEDAD
7	Incrementar las visitas en ferias de educación, como AULA, en un 5%	SOCIEDAD
8	Dar a conocer al personal destinado en los buques de la Armada el nuevo modelo de enseñanza de los Alféreces de Navío.	UNIDADES
9	Recibir visitas de oficiales destinados en otras unidades para presenciar actividades de los alumnos.	UNIDADES
10	Implementar un canal de comunicación entre las unidades a las que irán destinados los alumnos en sus periodos de embarque y la Escuela Naval Militar y obtener una valoración de los alumnos.	UNIDADES
11	Mejorar un 5% en los resultados obtenidos en las encuestas de los alumnos.	UNIDADES

Tabla 1. Objetivos del plan de marketing.

5.2. Acciones del plan de marketing

Para poder alcanzar los objetivos propuestos se planificaron acciones a llevar a cabo en el corto y en el medio plazo. Se establecieron 15 acciones a corto plazo y 12 a medio plazo. Entre las acciones a corto plazo cabe destacar las destinadas a mejorar la imagen de la ENM en la sociedad, como impulsar una mejora en las acciones sociales. Muchas acciones se orientaron hacia la mejora del proceso productivo, como realizar embarques de corta duración en unidades de la armada. También se pretendió con muchas de ellas mejorar la satisfacción del cliente, proponiendo, por ejemplo, el embarque de oficiales ajenos a la ENM en las lanchas de instrucción con el fin de mejorar el desempeño de la actividad. Dentro de las acciones a medio plazo se contemplan actividades que requieren algo más de planificación, pero que están en la línea de las acciones a corto.

Las acciones propuestas se presentaron en formato ficha, donde se incluye la información relevante como: los objetivos a cumplir con el desarrollo de la acción, destinatario de la acción, descripción, fecha de realización, requisitos personales y materiales, y presupuesto.

5.2. Conclusiones

Son muchas las ideas y conceptos adquiridos sobre marketing, pero sobre todo, qué partes del marketing se podrían llevar a cabo de manera interna por parte de la Escuela Naval Militar para mejorar, tanto la captación de alumnos, como la opinión de los oficiales de la Armada respecto al nuevo plan de estudios.

Se puede concluir que la Escuela Naval Militar dispone de todos los medios necesarios para ser un centro de excelencia y un referente a nivel mundial de cómo formar Oficiales de Marina de manera exitosa. El exhaustivo estudio realizado pone de manifiesto esta capacidad. Además, la aplicación de herramientas de marketing a la docencia militar es una excelente forma de mejorar la calidad de los procesos y de los productos obtenidos. Para terminar, muchas de las acciones propuestas en el plan de marketing se deben de llevar a cabo de manera inmediata por parte de la Escuela Naval si se quiere mejorar, de manera rápida y económica, la imagen de la institución.

Agradecimientos

Al personal y alumnos de la ENM por su colaboración en la realización de este estudio.

Referencias

1. Kotler, P.; Keller, K. *Dirección de marketing* 14ª ed.; Addison-Wesley; Pearson Educación, Madrid, España, 2012.
2. J. I. Borack, «eric.ed.gov,» Septiembre 1982. [En línea]. Available: eric.ed.gov/?id=ED220676. [Último acceso: 15 enero 2015].
3. Mehay, S. L.; Bowman, W. R. College Quality and employee Job performance. *Industrial & labor relations review,* **2002;** 55-4.
4. *Actividades diarias de la NAVY* [En línea]. Available: http://www.journeyofanavywife.com/2010_01_01_archive.html. [Último acceso: 14 enero 2015].
5. McDermott, M. *eric.ed.gov Junio 1975*. [En línea]. Available: eric.ed.gov/?id=ED113530. [Último acceso: 15 enero 2015].
6. Stewart, D. B.; Military Education: Student and Faculty Perceptions of Student Life at the Military Academies. *House of Represenatives*, **2003**.
7. Education Liaison Branch Advertising & Sales Promotion Directorate, *Proyect AHEAD. A new program in Cooperative Education,* **1975**.
8. Página web institucional de la Escuela Naval de la Armada del Perú [En línea]. Available: www.escuelanaval.edu.pe/archivos/Plan_operativo.pdf. [Último acceso: 10 enero 2015].
9. E. D. M. Campos. [En línea]. Available: http://www.buenastareas.com/ensayos/Solo-Si/60776344.html. [Último acceso: 18 enero 2015].
10. Página web oficial de la Universidad Jaime I [En línea]. Available: http://www.uji.es/bin/infoinst/projectes/pmk/esp/pmk.pdf. [Último acceso: 20 enero 2015].
11. Biblioteca de la Universidad de Córdoba [En línea]. Available: http://www.uco.es/servicios/biblioteca/eyc/plandemarketing.pdf. [Último acceso: 20 enero 2015].
12. España, Ley 39/2007, de 19 de diciembre, de la carrera militar, Boletín Oficial del Estado num. 278 de 20 de noviembre de 2007.
13. España, Real Decreto 1393/2007 de 29 de octubre, Boletín Oficial del Estado núm. 260, de 30 de octubre de 2007.
14. Sitio web oficial del Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada [En línea]. Available: http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/conocenos_ajema/prefLang_es/04_LineasGenerales. [Último acceso: 20 febrero 2015].

Sesión II-A

Adquisición de Información y Procesado

Twicus: Herramienta para el Análisis y Detección de Ciberbullying en Twitter

Suárez Varela, Joaquín [1], Burguillo Rial, Juan Carlos [1,*], Sotelo Seguín, Gonzalo [2], Torres Meira, José [2] y Costa Montenegro, Enrique [1]

[1] Universidade de Vigo.
[2] Equipo de Investigación Tecnológica, Comandancia de la Guardia Civil, Pontevedra

* Autor responsable del trabajo; E-Mail: J.C.Burguillo@uvigo.es (JCBR)

Abstract: En este trabajo vamos a centrarnos en las posibilidades de detectar y analizar, en la medida de lo posible, los episodios de *Ciberbullying* que ocurran en la red social Twitter. Se considera un caso de *Ciberbullying* cuando un/a menor amenaza, hostiga, humilla o molesta a otro/a mediante el uso de algún medio telemático. Para detectar y analizar este tipo de conductas hemos desarrollado el prototipo Twicus, que es una herramienta que permite monitorizar los mensajes en Twitter mediante dos modos de funcionamiento: a) Búsqueda por usuario, donde se introducirá un usuario en concreto para intentar comprobar si él o alguien de su entorno está cometiendo o sufriendo *Ciberbullying*; y b) búsqueda por palabras clave, donde se buscarán *tweets* que contengan una serie de palabras o frases clave que se desee buscar y, a partir de ahí, se procederá a detectar y analizar aquellos mensajes que sean potencialmente considerados como un caso de acoso en la red.

Keywords: ciberbullying, redes sociales, Twitter, TIC.

---

1. Introducción

Con más de 500 millones de usuarios [1] en todo el mundo - más de 200 millones de ellos activos- , Twitter es en la actualidad una de las redes sociales más importantes y más consolidadas. Desde su creación, en marzo de 2006, esta red social basada en la publicación de mensajes no superiores a 140 caracteres – popularmente conocidos como *tweets* - ha sufrido un crecimiento vertiginoso, convirtiéndose en una de las herramientas más populares y utilizadas con

independencia de la edad, el sexo o la situación geográfica de sus usuarios. Además, esta red social no solo es utilizada por personas, si no que cada vez es más frecuente que empresas e instituciones empleen este medio para darse a conocer y ofrecer información.

En España, existen aproximadamente cinco millones de personas que publican diariamente sus *tweets*, que pueden ser leídos por sus seguidores o *followers*. Generalmente, estas publicaciones suelen tener carácter público, lo que las hace visibles para cualquier usuario.

A su vez, es cada día mayor el uso de estas redes sociales por parte de la gente joven, por lo que resulta interesante poder desarrollar una herramienta que ayude a detectar, en la medida de lo posible; un uso inadecuado, o incluso potencialmente delictivo, de una red social.

El prototipo que presentamos en esta comunicación tiene como objetivo el desarrollo de una herramienta capaz de detectar, analizar y procesar potenciales patrones de acoso en la red a través de Twitter. Para ello, utilizaremos una serie de instrumentos que nos ayuden, por una parte, a localizar posibles episodios de *Ciberbullying* y, por otro, a captar, almacenar y presentar la información de los presuntos acosadores de la mejor forma posible.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente forma. En la sección 2 introducimos la red social Twitter y en la sección 3 el concepto de *Ciberbullying*. En la sección 4 se presenta el prototipo Twicus y sus modos de operación. En la sección 5 se concluye la comunicación y se indican algunas líneas futuras que barajamos.

2. Twitter

Twitter [4] fue creado por Jack Dorsey, Evan Williams y Biz Stone en Marzo de 2006 como un servicio gratuito de publicación de mensajes cortos (no superiores a 140 caracteres) o *microblogging* a través de la web.

Twitter es una red social basada en dicho *microblogging*, que permite a los usuarios mandar mensajes en texto plano, no superiores a 140 caracteres, llamados *tweets* - o bien tuits adaptando el término al castellano -, que se muestran en la página principal del usuario, otorgándole la oportunidad de comunicar de manera concisa, clara, sencilla y creativa aquello que desee. Los usuarios pueden suscribirse a los tuits de otros usuarios – a esto se le llama *follow* o seguir - y a los suscriptores se les llaman seguidores o *followers*.

Por defecto los mensajes son públicos, aunque es posible restringir su publicación de tal modo que sean accesibles solo para los seguidores. Los usuarios pueden *twittear* desde la web del servicio, aplicaciones oficiales externas (desarrolladas para *smartphones*), o bien por el Servicio de Mensajes Cortos (SMS) disponibles en ciertos países.

A diferencia de otras redes sociales, en Twitter no es necesario un contacto previo entre usuarios y, al contrario que *Whatsapp*, tampoco un número de teléfono. Es fácil de instalar y de utilizar, gratuito, no pide datos personales a la hora de registrarse ni revela relaciones personales. Además, permite compartir fotos y vídeos, integrarse en otras redes sociales y no usa publicidad invasiva.

En resumen, ofrece una serie de ventajas y oportunidades que hacen de Twitter una red social atractiva para diferentes tipos de público, entre ellos, los adolescentes.

3. Ciberbullying

El *Ciberbullying* [2] es el uso de medios telemáticos (Internet, telefonía y videojuegos online principalmente) para ejercer el acoso psicológico entre iguales. No se trata aquí el acoso de índole sexual ni de casos en los que intervengan personas adultas. Por tanto, tiene que haber menores en ambos extremos del ataque para que se considere *Ciberbullying*; si hay algún adulto, entonces estamos ante otros tipos de ciberacoso [3].

Por tanto, estamos ante un caso de *Ciberbullying* cuando un o una menor (en su mayoría entre 12 y 17 años) atormenta, amenaza, hostiga, humilla o molesta a otro/a mediante el uso de Internet, teléfonos móviles, *tablets* u otra tecnología telemática. Además, el uso generalizado de *smartphones* y de las redes sociales hacen que estos episodios que podríamos definir como de acoso escolar traspasen las fronteras del centro educativo, convirtiéndose en un problema permanente para sus víctimas.

Las fuerzas de seguridad han señalado públicamente que la cantidad de casos, y las denuncias por delitos cometidos contra la intimidad, la propia imagen y el honor; que se han cometido a través de Internet, las redes sociales y las nuevas tecnologías, ha aumentado gravemente durante estos últimos años, en los que también han aumentado notablemente las peticiones de ayuda con respecto a estos delitos. Este aumento encuentra sus causas, entre otras, en el incremento desbordado de la utilización de *smartphones*, el uso de redes sociales y de aplicaciones de mensajería instantánea.

4. El prototipo Twicus

La herramienta Twicus tiene como objetivos detectar, analizar y procesar potenciales patrones de acoso en la red a través de Twitter. Para ello, utilizaremos una serie de instrumentos que nos ayuden, por una parte, a localizar posibles episodios de Ciberbullying y, por otro, a captar, almacenar y presentar la información de los presuntos acosadores de la mejor forma posible. En los siguientes apartados se describen sus funcionalidades en mayor detalle.

4.1. Búsqueda por usuario

Este modo de funcionamiento consistirá en la búsqueda y análisis de patrones de comportamiento inadecuado en los círculos de un determinado usuario. Para iniciar el estudio lo único que habrá que realizar es introducir el nombre o *nick* que la persona a analizar posee en Twitter. A partir de este momento comienza la ejecución del programa, consistente en los siguientes puntos (ver Figura 1):

1. Inicialización de las listas de seguidores y de seguidos.
2. Creación del árbol de búsqueda.

3. Filtrado y eliminación de ramas del árbol.
4. Obtención y análisis de los *tweets* de cada elemento del árbol.
5. Procesado de los *tweets*.

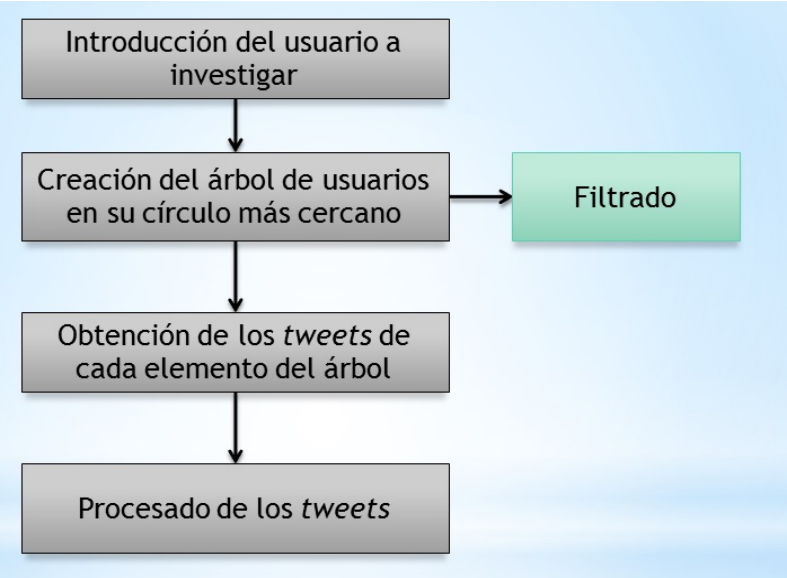


Figura 1. Proceso de búsqueda por usuario

4.1.1. Inicialización de las listas de seguidores y seguidos

Al introducir el nombre del usuario que se desea analizar, lo primero que hará el programa será almacenar en dos listas distintas todos aquellos seguidores y seguidos de la persona en cuestión.

4.1.2. Creación del árbol de búsqueda. Filtrado y eliminación de ramas del árbol

Obtenidas las dos listas, se procede a crear un árbol de búsqueda, que contendrá tantas ramas como elementos tengan ambas listas (ver Figura 2). Resulta conveniente realizar un filtrado que reduzca este número de ramas, puesto que algunas no resultarán de interés, dado que las limitaciones de la API de Twitter [5] podrían hacer que la ejecución del programa tardase un tiempo elevado.

El primer filtrado que se aplicará será el de usuarios repetidos, dado que es bastante común que una cuenta pueda aparecer en las dos listas (*following* y *followers*). A continuación se realizará un filtrado por número de seguidores, con el que se descartarán cuentas muy populares, como las asociadas a medios de comunicación, instituciones o personajes famosos. Por norma general, este tipo de cuentas no serán utilizadas para cometer *Ciberbullying*, y en el hipotético caso de que sean empleadas para esto, el episodio alcanzaría tal repercusión que no sería preciso un programa como *Twicus* para detectarlo. Por ello, se ha fijado la cantidad de 300 seguidores o más como límite para realizar este segundo filtrado. Esta cantidad ha sido escogida en base a un análisis de múltiples

cuentas, tanto de manera manual como a través de ejecuciones del programa. De cualquier modo, se trata de un parámetro que sería sencillo de modificar en caso de considerarlo conveniente.

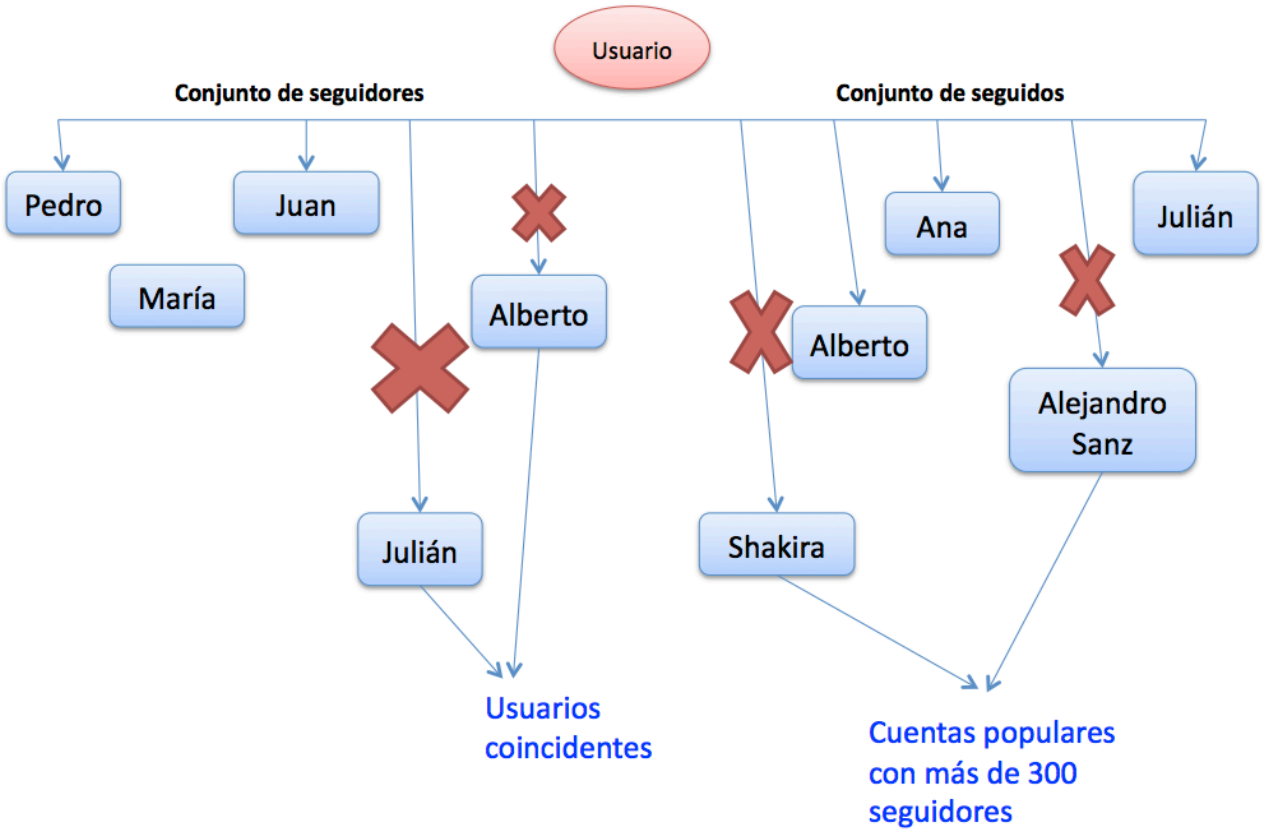


Figura 2. Proceso de filtrado

4.1.3. Obtención y análisis de los *tweets* de cada elemento del árbol

Una vez obtenido el árbol de búsqueda, continuamos con el siguiente paso, que consiste en obtener los últimos 200 *tweets* de cada elemento del árbol. Es decir de cada seguidor o seguido que haya superado los filtros anteriores. Estos *tweets* y todos los datos asociados a ellos se almacenarán para su posterior análisis.

4.2. Búsqueda por contenido

Con este modo, se intentará detectar posibles patrones de acoso en Twitter en su conjunto, sin limitarse a un usuario específico. Dependiendo del nivel de acceso se podrán efectuar las siguientes operaciones:

- *Modo Administrador*. Se podrá ver y editar la base de datos de palabras o frases clave, obtener información de usuarios sospechosos y ejecutar el programa.

- *Modo Usuario*. La única acción que se podrá realizar será ejecutar el programa. La ejecución de este modo consistirá en los siguientes pasos (ver Figura 3):
    1. Creación de la lista de palabras o frases clave.
    2. Búsqueda de *tweets*.
    3. Procesado de los *tweets*.
    4. Almacenamiento de resultados que son sean firmes.

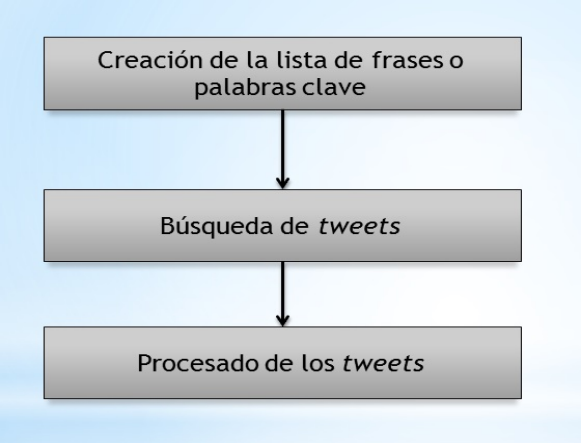


Figura 3. Proceso de búsqueda por contenido

4.2.1. Creación de la lista de palabras o frases clave

Al iniciar este modo de funcionamiento se procede a la lectura del fichero donde tenemos almacenados los patrones a buscar y se almacenan en una lista para la búsqueda posterior.

4.2.2. Búsqueda de *tweets* en Twitter

Para cada elemento de la lista de frases o palabras clave haremos una búsqueda en la que Twitter nos devuelva hasta 2.000 *tweets* que contengan o estén relacionados con cada elemento de la lista. Cabe destacar que la API de Twitter no nos provee de todas las coincidencias, ni devuelve las mismas salidas ante entradas iguales, en distintos periodos de tiempo por lo que habrá que realizar una búsqueda refinada durante distintos intervalos de tiempo.

4.2.3. Almacenamiento de resultados no resolutorios

Si la búsqueda por contenido no obtiene la suficiente información, como para señalar a determinado usuario como un potencial acosado, se añadirá a una lista en cuarentena para un posterior análisis del potencial afectado ejecutando, por ejemplo, el modo de búsqueda por usuario.

4.2.4. Base de datos de palabras o frases clave

La base de datos de palabras, o frases clave, consistirá en un simple fichero de texto en el que en cada línea se aparece una frase o palabra clave para su búsqueda.

4.3. Bases de datos creadas

Para la realización del prototipo se han utilizado cuatro bases de datos:

- **Acosados**: Almacena simplemente el nombre del posible acosado y le asigna un identificador único.

- **Datos Acosadores**: Almacena el nombre y el *nick* de cada potencial acosador y también le asigna un identificador único.

- **Relación Acosados-Acosadores**: En esta tabla se almacenan el resto de datos de interés sobre el posible acosador y se relaciona la información de las dos bases de datos anteriores.

- **Cuarentena**: En esta base de datos se guardan todos los resultados no concluyentes, pero susceptibles de una investigación en profundidad.

4.4. Informe en formato PDF

Tras la ejecución del prototipo se genera un informe en formato PDF con los resultados obtenidos.

El informe contiene una cabecera con el título y fecha en la que se realiza el informe. Para cada presunto acosado se creará una tabla distinta, que contendrá tantas entradas como presuntos acosadores hayamos obtenido, y tendrá las mismas columnas que la base de datos que relaciona acosados con acosadores. Los datos que se proporcionan de cada potencial acosador son los siguientes:

- Nombre proporcionado en su perfil.
- *Nick* utilizado en Twitter.
- *Tweet* publicado.
- Fecha en la que se publicó el *tweet*.
- Lugar desde el que publica el *tweet*.
- Fuente o dispositivo desde el que accede a Twitter.
- Descripción del usuario.
- Zona Horaria obtenida de su perfil.
- URL proporcionada en su perfil.
- *Link* a la imagen de su perfil de usuario.

5. Conclusiones y líneas futuras

La conclusión final es que se ha desarrollado una herramienta de gran utilidad potencial, que da respuesta a necesidades actuales, fruto de la irrupción y relevancia de las redes sociales y de términos como el *Ciberbullying*.

En cuanto a las líneas futuras creemos que el proyecto tiene potencial para poder ser trasladado a otras redes sociales con facilidad. Además, debido a su implementación, podría ser adaptado para su utilización en cualquier idioma, lo que dota al proyecto de una gran portabilidad.

Referencias

1. comScore Analytics. Accesibles en: http://www.comscore.com
2. Cyberbullying. Accesible en: http://www.ciberbullying.net
3. II Plan Estratégico Nacional de Infancia y Adolescencia 2013- 2016 (II PENIA). Aprobado en el Consejo de Ministros de 5 de abril de 2013.
4. José Luis Orihuela. Mundo Twitter. Editorial Alienta. 2011.
5. API de Twitter para desarolladores. Accesible en: http://twitter4j.org

Primeros experimentos para evaluar la calidad de fuentes de información en Twitter

Sánchez Fernández, Luis [1,*], Miñana Rontomé, Tello [1], Fernández García, Norberto [2], Basanta Val, Pablo [1], Arias Fisteus, Jesús [1], Congosto, Mariluz [1], Fuentes-Lorenzo, Damaris [1]

[1] Departamento de Ingeniería Telemática,
Universidad Carlos III de Madrid
Av. Universidad, 30, E-28911 Leganés (Madrid)
webtlab@inv.it.uc3m.es
[2] Centro Universitario de la Defensa
Escuela Naval Militar
Plaza de España, s/n, 36920 Marín (Pontevedra)
norberto@cud.uvigo.es

* Autor responsable del trabajo; luiss@it.uc3m.es

Abstract: Las redes sociales en línea gozan de una gran popularidad. A su vez, es bien conocido que buena parte de la información que se difunde en dichas redes es en muchos casos de baja calidad, rumores o simplemente información falsa. En esta comunicación se presentan los primeros resultados de un trabajo que se está realizando para evaluar la calidad de fuentes de información en línea.

Keywords: Seguridad; redes sociales; Twitter; calidad de fuentes de información

---

1. Introducción

Las redes sociales en línea [1] están suponiendo una revolución en la difusión y crecimiento de la información accesible a través de Internet adicional a la que supuso el propio desarrollo de la Web [2,3]. Al igual que pasa con la Web, la naturaleza abierta de estas redes es una de las causas de su éxito. A su vez, también es una de sus debilidades: cualquiera puede difundir información en una red social y no hay ninguna garantía de que dicha información sea verídica [4–6]. En otras ocasiones, las redes sociales son utilizadas por organizaciones y empresas como medio para intentar influir en la opinión pública [7,8] o con fines publicitarios [9]. Desafortunadamente, también pueden darse situaciones en que las redes sociales sean una herramienta en la comisión de delitos [10].

En diferentes ámbitos (búsqueda de información [11], protección contra mensajes basura (spam) [12], seguridad [10], análisis de opinión [13], salud pública [14], etc.), es interesante disponer de herramientas que puedan ayudar a evaluar la (buena o mala) calidad de fuentes de datos de redes sociales.

Esta comunicación presenta los resultados de algunos experimentos que se han realizado con datos tomados de un conjunto de cuentas Twitter, con el objetivo de avanzar en el desarrollo de herramientas que ayuden a evaluar la calidad de fuentes de información en Twitter.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma. La sección 2 enuncia un conjunto de hipótesis de las que se parte. La sección 3 describe la metodología que se va a utilizar para validar dichas hipótesis. La sección 4 describe los tipos de cuentas en Twitter que se han analizado así como las principales fuentes que se han utilizado para su selección. La sección 5 presenta los resultados que se han obtenido en los experimentos realizados. La siguiente sección presenta una somera discusión de dichos resultados. La comunicación termina presentando algunos trabajos relacionados y detallando las conclusiones obtenidas en este estudio, así como posibles líneas futuras de continuación del mismo.

2. Hipótesis de partida

El primer paso en el trabajo que se ha realizado es plantear algunas hipótesis cuya validez pueda permitir identificar fuentes de información de calidad. Las hipótesis que vamos a explorar parten de la idea de que las fuentes de información de calidad (medios de comunicación, investigadores, periodistas, escritores, etc.) utilizan un lenguaje más culto que el de los usuarios normales y las fuentes de información poco fiables. Vamos a explorar esta idea desde dos puntos de vista. Por una parte vamos a evaluar la complejidad de la estructura sintáctica de las sentencias escritas en una cuenta de Twitter. Por otra parte, vamos a medir el registro lingüístico de cada cuenta (es decir, el número de palabras distintas utilizadas).

En resumen, planteamos las siguientes dos hipótesis:

H1 Las fuentes de información de calidad utilizan estructuras sintácticas más complejas que los usuarios normales y los difusores de información falsa.

H2 Las fuentes de información de calidad utilizan registros lingüísticos más amplios.

3. Metodología utilizada

Es posible definir multitud de indicadores relacionados con las dos hipótesis presentadas en la sección anterior. En este primer trabajo hemos analizado solamente tres.

Los primeros dos indicadores están relacionados con la primera hipótesis y tratan de medir la complejidad sintáctica.

1. Indicador 1: porcentaje de tuits de una cuenta que contienen oraciones subordinadas.

2. Indicador 2: número medio de sintagmas adjetivales que contiene cada tuit de la cuenta.

Para medir estos dos indicadores se ha utilizado un analizador sintáctico para procesamiento de lenguaje natural desarrollado en la Universidad de Stanford [15].

Para medir la calidad del registro lingüístico se ha utilizado la siguiente estrategia. Se ha utilizado una lista de frecuencias del uso de las palabras tomada del Wiktionary [16]. Esta lista cuenta la frecuencia de

aparición de las palabras más frecuentes en todos los libros que aparecen en el proyecto Gutenberg [17] (más de 35,000 palabras). El indicador 3 mide el porcentaje de las 20,000 palabras menos frecuentes utilizadas en esta lista que han sido utilizadas en alguno de los últimos 1,000 tuits de la cuenta estudiada.

Para evaluar la validez de las hipótesis de partida se han medido estos indicadores para un conjunto de cuentas de Twitter suficientemente grande como para que los resultados sean estadísticamente significativos clasificados en diferentes tipos. A continuación los valores de los indicadores obtenidos para cada tipo de cuenta se han presentado en forma de box-plot, tal y como se describe en la sección de resultados.

4. Recolección de datos

Para realizar los experimentos se seleccionaron cuentas en Twitter de los siguientes tipos:

- Cuentas de medios de comunicación, todas ellas verificadas oficialmente por Twitter y obtenidas de [18].
- Cuentas de investigadores, profesores de universidad y periodistas, obtenidas de los seguidores de cuentas de universidades prestigiosas del mundo como Stanford y Cambridge.
- Cuentas de personajes famosos (políticos, actores, deportistas, etc.) y verificadas.
- Cuentas "fake": cuentas que parodian a los personajes de la categoría anterior, la mayoría de ellas obtenidas de [19–21].
- Cuentas bot (cuyos tuits son producidos por programas de ordenador), obtenidas de [22] y otras por medio de búsqueda manual.
- Cuentas aleatorias. La idea de esta categoría es disponer de cuentas de usuarios normales que no pertenezcan a ninguna de las categorías anteriores. Para obtener las cuentas aleatorias nos conectamos al `Stream API` de Twitter [23] y escogimos las primeras 40 cuentas en inglés y que hayan tuiteado al menos 10 veces desde que se creó la cuenta para tener algunos datos con los que poder realizar el análisis.

Para cada tipo de cuenta de Twitter se han analizado 40 cuentas. Esto debe ser suficiente, por ejemplo, para entrenar un clasificador con la técnica clásica del análisis discriminante de Fisher [24] utilizando muestras de 20 dimensiones [25].

Como tenemos 6 tipos de cuentas y 40 cuentas de cada tipo, en total se han analizado 240 cuentas.

Debido a que las herramientas que se han utilizado en este estudio están diseñadas para procesar texto en inglés, solamente se han considerado cuentas de Twitter que tuitean principalmente en inglés.

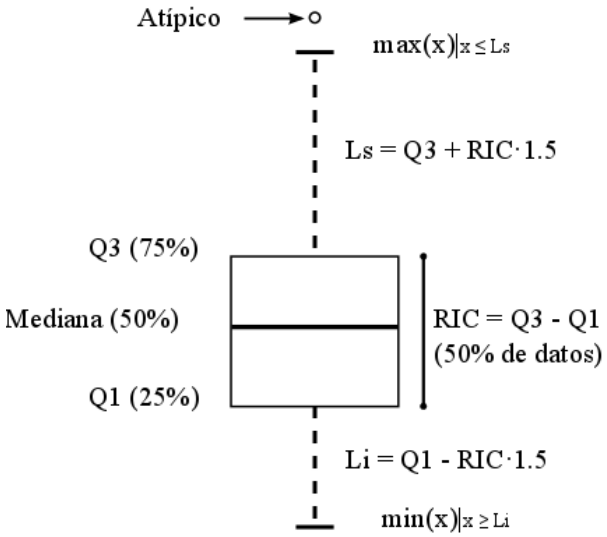
5. Resultados obtenidos

Cada uno de los tres indicadores descritos en la sección 3 se ha calculado para cada una de las 240 cuentas consideradas. Para visualizar los resultados obtenidos estos se presentan por medio de un diagrama de cajas o box-plot [24].

La figura 1[1] representa un diagrama de caja. Un diagrama de caja es un gráfico, basado en cuartiles, mediante el cual se visualiza un conjunto de datos. Está compuesto por un rectángulo, la "caja", y dos brazos, los "bigotes". La información que suministra el diagrama de caja, como se puede ver en la figura 1 es la siguiente:

- Primer cuartil (Q1)
- Segundo cuartil o mediana. Es la raya dentro de la caja.
- Tercer cuartil (Q3)
- Los bigotes, las líneas que se extienden desde la caja, se extienden hasta los valores máximo y mínimo de la la serie o hasta 1.5 veces el Rango Inter Cuartílico (Q3 - Q1).
- Cuando los datos se extienden más allá de esto, significa que hay valores atípicos en la serie, que se marcan con pequeños círculos.

Figure 1. Diagrama de caja o box-plot



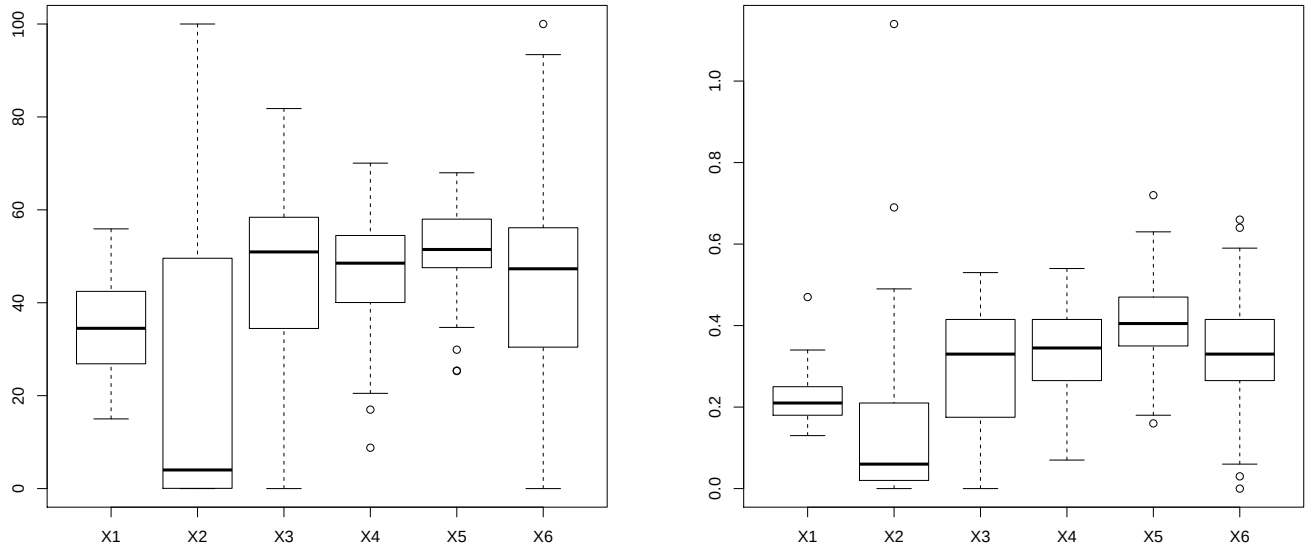
Los resultados obtenidos para cada uno de los indicadores se presentan en las figuras 2 y 3. En cada una de estas figuras, el significado de las etiquetas en el eje de abscisas es el siguiente: `X1`: cuentas de medios de comunicación; `X2`: cuentas bot; `X3`: cuentas fake; `X4`: cuentas de famosos; `X5`: cuentas de investigadores, profesores y periodistas; `X6`: cuentas aleatorias.

6. Discusión

El trabajo presentado en esta comunicación debe servir para identificar cuáles de los 3 indicadores considerados deben de formar parte del conjunto de indicadores adecuados para detectar fuentes de información de calidad y cuáles no.

[1] "Boxplot" de Jumanbar - Trabajo propio. Disponible bajo la licencia CC BY-SA 3.0 vía Wikimedia Commons - http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boxplot.svg#/media/File:Boxplot.svg

Figure 2. Resultados para los indicadores sintácticos



(a) Indicador 1

(b) Indicador 2

Los resultados obtenidos para el indicador 1 no permiten distinguir las cuentas de unos tipos y otros, por lo que este indicador no debe ser incluido en el conjunto de indicadores para detectar fuentes de información de calidad.

Los resultados para el indicador 2 se pueden calificar de moderados, porque se observan valores mayores en la categoría de profesores, investigadores y periodistas frente a las demás, aunque las diferencias no sean demasiado significativas.

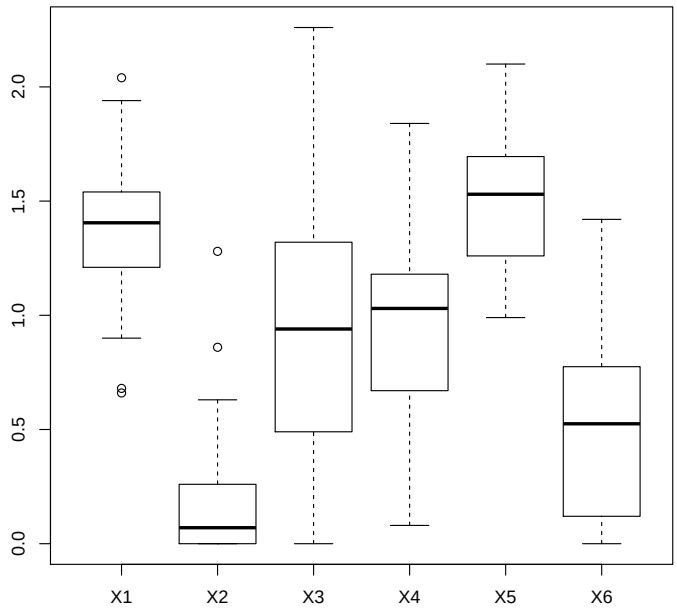
Finalmente, los resultados para el indicador 3 distinguen de forma clara a las cuentas de medios de comunicación y las de profesores, investigadores y periodistas. Consideramos ambos tipos de cuentas como cuentas de calidad y por lo tanto el indicador 3 también se considera válido.

El hecho de que el indicador 2 no distinga los medios de comunicación de los demás tipos de cuentas debería ser tenido en cuenta. Una posibilidad es procesar las cuentas en dos etapas, de manera que en una primera etapa se identifiquen los medios de comunicación (y no se utilice el indicador 2) y a las cuentas restantes se les aplique un segundo procesado en el que se incluirían (entre otros) los indicadores 2 y 3.

7. Trabajos relacionados

Existen varios trabajos relacionados con el estudio de la fiabilidad de la información difundida en redes sociales. En [26] se analiza la fiabilidad de los tuits difundidos durante el desastre de Fukushima. Este estudio se centra en los denominados tuits sintetizados, en los que un usuario sintetiza información proveniente de cierta fuente de información (en contraposición a un retuiteo puro) y que utilizaban el hashtag `#fukushima`. Se encontró que el 70% de los tuits provenian de fuentes de información fiables, con un porcentaje más bajo cuando los tuits provenían de cuentas con un perfil anónimo.

Figure 3. Resultados para el indicador 3: Porcentaje de las 20,000 palabras menos frecuentes utilizadas



Otro trabajo en la misma línea es el de [4]. En este trabajo se analizó la difusión de tuits en el terremoto de Chile de 2010. En este estudio se concluyó que los rumores en Twitter tienden a ser más cuestionados que las noticias verídicas, lo que puede ser un instrumento en si mismo para su detección.

La detección de spammers puede considerarse como un apartado dentro del análisis de la fiabilidad de fuentes de información que ha sido estudiado en numerosos trabajos [12,27].

8. Conclusiones y Trabajo Futuro

En el estudio que presentamos en este trabajo se han evaluado tres indicadores con el objetivo de identificar fuentes de información de calidad de Twitter. De los tres indicadores considerados, uno no ha proporcionado los resultados esperados mientras que los resultados obtenidos para los otros dos son prometedores (mejores en el caso del indicador 3 que en el del 2).

Como se ha explicado en la introducción, el estudio que se presenta en este trabajo es un primer paso que debe ser continuado en trabajos posteriores. A continuación se esbozan varias líneas de trabajo que planeamos desarrollar en el futuro. En primer lugar, es necesario ampliar el conjunto de indicadores que se utilizan. Dentro de este apartado se deben ampliar los indicadores sintácticos y del registro del lenguaje. Asimismo, se podrían considerar otros tipos de indicadores, como ejemplo estudiar los patrones de comportamiento temporal de los tuits de una cuenta.

Una vez que se disponga de un conjunto de indicadores adecuado, será necesario entrenar un clasificador utilizando técnicas de aprendizaje máquina.

Finalmente, será necesario realizar una evaluación del clasificador así obtenido utilizando datos de un volumen de cuentas elevado (cientos de miles) para poder garantizar que los resultados obtenidos sean fiables.

La explotación en un entorno realista de una herramienta como la que se pretende desarrollar involucraría el procesado de grandes volúmenes de datos (Big Data) para aplicar estas técnicas a un gran número de cuentas de Twitter. Para tratar con esto sería interesante utilizar modelos predecibles de procesado distribuido de flujos, como el propuesto en [28].

Agradecimientos

Este trabajo está parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto "HERMES-SMARTDRIVER" (TIN2013-46801-C4- 2-R) y por la Comunidad de Madrid a través del proyecto "eMadrid" (S2013/ICE-2715).

Referencias

1. N. B. Ellison *et al.*, "Social network sites: Definition, history, and scholarship," *Journal of Computer-Mediated Communication*, vol. 13, no. 1, pp. 210–230, 2007.
2. T. Berners-Lee, M. Fischetti, and M. L. Foreword By-Dertouzos, *Weaving the Web: The original design and ultimate destiny of the World Wide Web by its inventor*. Harper Information, 2000.
3. B. A. Huberman and L. A. Adamic, "Internet: growth dynamics of the world-wide web," *Nature*, vol. 401, no. 6749, pp. 131–131, 1999.
4. M. Mendoza, B. Poblete, and C. Castillo, "Twitter under crisis: Can we trust what we rt?" in *first workshop on social media analytics*. ACM, 2010, pp. 71–79.
5. D. Mocanu, L. Rossi, Q. Zhang, M. Karsai, and W. Quattrociocchi, "Collective attention in the age of (mis)information," *Computers in Human Behavior*, no. 0, pp. –, 2015. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0747563215000382
6. A. Bessi, M. Coletto, G. A. Davidescu, A. Scala, G. Caldarelli, and W. Quattrociocchi, "Science vs conspiracy: collective narratives in the age of (mis) information," *PLoS ONE*, vol. 10, no. 2, 2015.
7. M. L. Congosto, "Elecciones europeas 2014: Viralidad de los mensajes en twitter," *Redes: revista hispana para el análisis de redes sociales*, vol. 26, no. 1, pp. 23–52, 2015.
8. M. L. Congosto, "Viralidad de los mensajes en twitter en las campañas electorales," in *III Congreso Internacional en Comunicación Política y Estrategias de Campaña*, 2014.
9. J. A. Chevalier and D. Mayzlin, "The effect of word of mouth on sales: Online book reviews," *Journal of marketing research*, vol. 43, no. 3, pp. 345–354, 2006.
10. C. C. Yang and T. D. Ng, "Terrorism and crime related weblog social network: Link, content analysis and information visualization," in *Intelligence and Security Informatics, 2007 IEEE*. IEEE, 2007, pp. 55–58.
11. S. P. Borgatti and R. Cross, "A relational view of information seeking and learning in social networks," *Management science*, vol. 49, no. 4, pp. 432–445, 2003.
12. D. Gayo-Avello, "Nepotistic relationships in twitter and their impact on rank prestige algorithms," *Information Processing & Management*, vol. 49, no. 6, pp. 1250–1280, 2013.

13. F. Li and T. C. Du, "Who is talking? an ontology-based opinion leader identification framework for word-of-mouth marketing in online social blogs," *Decision Support Systems*, vol. 51, no. 1, pp. 190–197, 2011.
14. S. A. Moorhead, D. E. Hazlett, L. Harrison, J. K. Carroll, A. Irwin, and C. Hoving, "A new dimension of health care: systematic review of the uses, benefits, and limitations of social media for health communication," *Journal of medical Internet research*, vol. 15, no. 4, 2013.
15. D. Klein and C. D. Manning, "Accurate unlexicalized parsing," in *Proceedings of the 41st Annual Meeting on Association for Computational Linguistics-Volume 1*. Association for Computational Linguistics, 2003, pp. 423–430.
16. "Wiktionary:frequency lists," http://en.wiktionary.org/wiki/Wiktionary:Frequency_lists#English (visitado el 12 de mayo de 2015), 2015.
17. "Free ebooks - project gutenberg," https://www.gutenberg.org/wiki/Main_Page (visitado el 12 de mayo de 2015), 2015.
18. N. Bremmen, "The 100 most influential news media twitter accounts," http://memeburn.com/2010/09/the-100-most-influential-news-media-twitter-accounts/ (visitado el 7 de mayo de 2015), 2010.
19. C. McCann, "The list: Ten fake twitter accounts," http://www.ft.com/cms/s/2/c843804c-3b21-11e2-b3f0-00144feabdc0.html#axzz2jz08haZW (visitado el 7 de mayo de 2015).
20. I. Paul, "15 fake and funny twitter accounts," http://www.pcworld.com/article/159492/fake_funny_twitter.html (visitado el 7 de mayo de 2015), 2009.
21. E. Levine, "The 15 best fake twitter accounts of 2012," http://heavy.com/comedy/2012/12/the-15-best-fake-twitter-accounts-of-2012/ (visitado el 7 de mayo de 2015), 2012.
22. K. Knibbs, "The 8 best twitter bots you aren't following," http://www.digitaltrends.com/social-media/the-10-best-twitter-bots-you-arent-following/ (visitado el 7 de mayo de 2015), 2013.
23. "The streaming apis," https://dev.twitter.com/streaming/overview (visitado el 7 de mayo de 2015), 2015.
24. D. Peña, *Análisis de datos multivariantes*. Mc Graw Hill Interamericana de España, S.A.U., 2002.
25. S. J. Raudys and A. K. Jain, "Small sample size effects in statistical pattern recognition: Recommendations for practitioners," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 13, no. 3, pp. 252–264, 1991.
26. R. Thomson, N. Ito, H. Suda, F. Lin, Y. Liu, R. Hayasaka, R. Isochi, and Z. Wang, "Trusting tweets: The fukushima disaster and information source credibility on twitter," in *9th International ISCRAM Conference*, 2012, pp. 1–10.
27. G. Stringhini, C. Kruegel, and G. Vigna, "Detecting spammers on social networks," in *26th Annual Computer Security Applications Conference*. ACM, 2010, pp. 1–9.
28. P. Basanta, N. Fernandez-Garcia, A. Wellings, and N. Audsley, "Improving the predictability of distributed stream processors," *Future Generation Computing Systems*, 2015.

Despliegue de una red MANET entre lanchas de instrucción

Marín López, Manuel* y Asorey Cacheda, Rafael[1]

1 Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar de Marín; Email: marinlopezm@gmail.com, rasorey@cud.uvigo.es

* Autor responsable del trabajo; marinlopezm@gmail.com

Abstract: En un escenario donde los nodos tienen un carácter móvil las comunicaciones inalámbricas por microondas de arquitectura punto-multipunto se convierten en una opción muy conveniente. Este tipo de redes es conocido por el término MANET(*del ingles, Mobile Ad-hoc Network*). Una red MANET está constituida por múltiples nodos inalámbricos que utilizan enlaces ad-hoc basados en el estándar 802.11 de manera que no existe un único encaminador del tráfico. La función del encaminador es realizada por el algoritmo de encaminamiento instalado en cada uno de los interfaces de red de forma que cada nodo conozca en todo momento la topología, dinámica en el caso de redes móviles.

Keywords: MANET; Red Mallada; Redes *Ad-hoc*; Encaminamiento; IEEE 802.11; OLSR.

---

1. Introducción

El escenario actual referente a las tecnologías de la información en buques militares requiere enlaces seguros de alta capacidad que permitan a los buques intercambiar gran cantidad de información para su posterior evaluación y toma de decisiones. En las comunicaciones militares es un factor de relevancia la disponibilidad de los sistemas, incluso en las condiciones más adversas. Por ello, un sistema de comunicaciones militares debe buscar la mayor independencia posible de infraestructuras externas a él. Un ejemplo de un sistema de comunicaciones muy extendido podría ser la telefonía móvil GSM donde la fiabilidad del enlace de voz no está únicamente supeditada al terminal móvil, sino también a toda la infraestructura desplegada por las compañías telefónicas. Es por ello que las comunicaciones navales buscan resistencia y redundancia en sus sistemas ya que si no se tuviera en cuenta, surgiría la pregunta de por qué nuestros buques siguen equipando sistemas HF para transmisión de voz y datos cuando las comunicaciones satelitales ofrecen unas capacidades muchísimo mayores. La respuesta es que las comunicaciones navales intentan, en la media de lo posible, depender lo menos posible de infraestructura de terceros para sus enlaces de voz y datos.

Una tecnología en auge en las comunicaciones inalámbricas aunque todavía sin estándares finales preparados para ser desplegados es conocida en el mundo de las telecomunicaciones como "*Wireless Mesh Networks*", cuya traducción sería "Redes Inalámbricas Malladas".

Las posibilidades que ofrece este tipo de redes radica en la posibilidad de poder mallar las conexiones entre los nodos que la compongan, de forma que una fuerza naval con todas sus unidades que se encuentren en alcance radio entre ellas, establezcan un enlace punto-multipunto. No hay un solo camino por el que deba viajar la información, sino que será el transmisor del buque quien de forma autónoma evalúe el mejor camino para llegar del buque A al buque B. Los posibles caminos por los que la información puede viajar son directamente proporcionales al numero de buques (nodos) que el nodo A tenga en alcance radio. Puede darse el caso que el buque A y B no estuviesen en alcance radio debido, posiblemente, a que se encuentran fuera del horizonte respectivo de cada buque. En este caso, un buque intermedio podría retransmitir la información de manera automática.

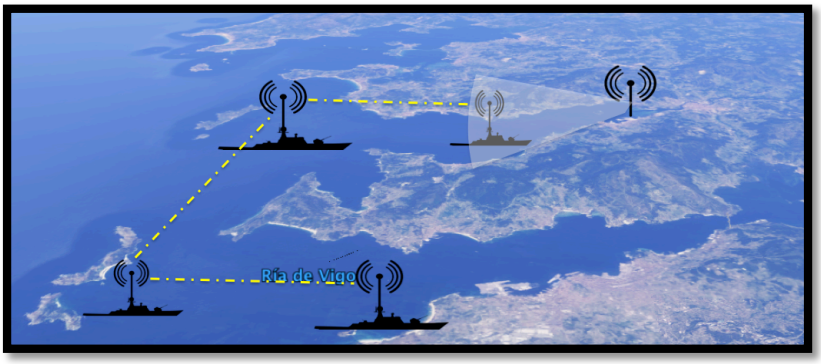


Figura 1 Simulación gráfica del escenario de una MANET

2. Funcionamiento y despliegue de la red.

Los nodos embarcados serán dotados de un transceptor basado en software Linux embebido y una antena omnidireccional de alta ganancia que trabajará utilizando la banda ISM en el espectro de 2,4 Ghz. La estación de radio dispuesta en tierra será preferiblemente una antena sectorial que trabaje en la misma banda.

El *software* libre basado en Linux, permite configurar el protocolo de encaminamiento el cual gestionará los enlaces *ad-hoc* entre todos los nodos que compongan la red. Dada la movilidad de los nodos en la red, el concepto de *Mesh Networking* [1] puede ser concretado en un tipo de redes que reciben el nombre de MANET (del inglés *Mobile Ad-Hoc Networking*). El concepto MANET es el que mejor define la naturaleza del objetivo a conseguir en este artículo, pues los nodos son móviles. El modo IBSS contemplado en el estándar IEEE 802.11 [2], también conocido como *IEEE Ad-hoc Mode,* representa el punto de partida que fundamenta las redes malladas. El término multisalto es el que diferencia a las redes malladas con el modo IBSS. Para que el multisalto pueda suceder en una red con enlaces *ad-hoc* es necesario un protocolo de encaminamiento.

2.1 Encaminamiento OLSR

Las redes MANET son las que más se distinguen de las redes inalámbricas convencionales. A este nivel, los protocolos de encaminamiento [3] se deben de adaptar rápidamente a los cambios de la topología de la red para poder mantener una ruta en todo momento que garantice la comunicación de los nodos. En redes MANET los nodos encaminan el tráfico retransmitiendo paquetes como si fueran encaminadores y actualizan sus tablas de encaminamiento en tiempo real.

El encaminamiento tradicional mantiene la idea de que todos los equipos dentro de la misma subred siempre utilizan la misma ruta, lo cual significa que todas las máquinas de una subred están disponibles en un solo salto, típicamente a través de encaminadores o conmutadores. En redes multisalto no es el caso.

OLSR es un protocolo de encaminamiento [4] para redes malladas basado en tablas proactivas de encaminamiento que utiliza un sistema de optimización llamado "retransmisión multipunto por inundación". Este mecanismo consiste en elegir un conjunto de nodos vecinos que cubren el acceso de nodos distantes a 2 saltos o más.

Los protocolos proactivos tienen la ventaja de que mantienen las tablas de encaminamiento actualizadas en todo momento. Presentan la desventaja de que requieren una carga adicional en la red inalámbrica debido a la transmisión periódica de mensajes de control.

El intercambio de mensaje de control en una red mallada puede provocar congestión y suponer un grave problema en las comunicaciones. Para solucionarlo, OLSR utiliza los *Multi Point Relay* (MPR). Los MPR son nodos encargados de retransmitir paquetes *broadcast*. El número de MPR que retransmiten un paquete *broadcast* es siempre inferior al número total de nodos. Con esta técnica se aminora considerablemente el coste de las inundaciones *broadcast*. Sin embargo, el protocolo sigue proporcionando caminos óptimos, pues dichos paquetes llegan a todos los nodos.

Es importante entender que OLSR no encamina tráfico, únicamente actualiza las tablas de encaminamiento. OLSR no es el único que lo hace, sino que toda la pila de protocolos de encaminamiento para MANET siguen el mismo patrón.

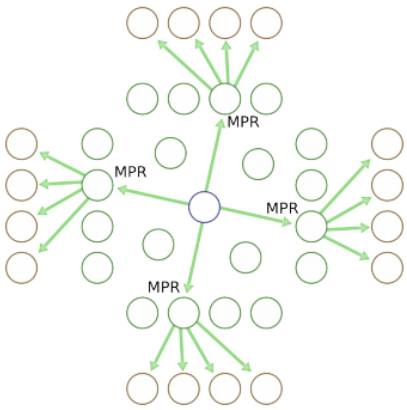


Figura 2 Selección de nodos MPR

Existen diferentes tipos de mensajes que son utilizados por el algoritmo de encaminamiento con el fin de conocimiento de la topología de la red, detección de vecinos y mantenimiento del estado de enlace entre nodos.

Mensaje HELLO

Son los responsables del el estado del enlace, detección de nodos vecinos y señalización de las retransmisiones MPR.

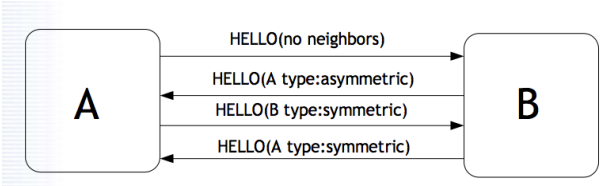


Figura 3 Escenario simplificado de detección de vecinos

Cada nodo genera dos tablas con la información obtenida de los paquetes HELLO. Una primera donde se encuentran todos sus nodos vecinos. Es decir, todos los nodos de los que recibe los paquetes HELLO. Junto a la dirección del nodo, se guarda además, el estado del enlace que mantiene con ellos. Los posibles valores que puede tomar este atributo son: MPR, bidireccional o unidireccional. El enlace se considera asimétrico cuando el nodo recibe paquetes HELLO pero no se encuentra incluido en ellos como vecino.

Con la información de la tabla anterior, más el conocimiento de los nodos que se encuentran a dos saltos y el vecino que los conecta se genera una segunda tabla. Para ello, se emplea un algoritmo de mínimos conjuntos, teniendo en cuenta la disponibilidad de los nodos, y se calcula cuáles son sus nodos MPR. Una vez realizados los cálculos, en esta segunda tabla se guardan los nodos de dos saltos y a través de qué nodo MPR se accede ellos. Por lo tanto, con los mensajes HELLO, se tiene un conocimiento completo de la red a una distancia de dos saltos. Aparte de la información de los nodos vecinos, los mensajes HELLO añaden cuáles han sido seleccionados por el nodo emisor para que sean sus MPR. Así, cuando se recibe un paquete HELLO, además de conocer la topología de la red de uno o más saltos, sabe si ha sido seleccionado por su vecino como MPR y por tanto está obligado a retransmitir los mensajes de control que reciba a partir de ese momento.

Mensajes TC (de control de la topología)

Este tipo de mensajes realizan la tarea de la difusión de la topología. Cuando un nodo detecta la llegada de un mensaje de control OLSR, comprueba si el nodo vecino que le ha enviado el mensaje se encuentra en su lista de MPR. En caso afirmativo, vuelve a enviar el mensaje por *broadcast* de manera que todos sus enlaces MPR que no hayan recibido el mensaje vuelven a enviarlo de nuevo, extendiéndose el mensaje por la red sucesivamente.

Todos los nodos de la red envían de forma asíncrona un mensaje TC. Si cualquier nodo detecta que la red no ha sufrido ningún cambio puede omitir retransmitirlo. Con la información contenida en los mensaje TC, que al menos contienen la tabla de los MPR seleccionados por el nodo fuente, los nodos generan un tercera tabla denominada "de topología" con información concerniente a toda la red, al igual que tienen una con los vecinos (un salto de distancia) y otra con los nodos a dos saltos de distancia.

2.2 Seguridad

En general, para conseguir seguridad en los mecanismos de encaminamiento de tráfico [5] es necesario preocuparse de aspectos de la seguridad como la integridad o la disponibilidad del servicio. Por lo tanto, hay que considerar cómo un nodo debe generar y verificar una firma digital que establezca confianza entre los mensajes de control intercambiados entre los nodos. En este aspecto, la criptografía se podría dejar a un lado ya que requiere más carga de computación en los nodos y la confidencialidad en los mensajes de control intercambiados no es necesaria. Esto no es así siempre, puesto que en escenarios militares la información referente al encaminamiento son también parámetros tácticos de suma relevancia para el enemigo. En redes MANET se tienen en cuenta varias cuestiones. Algunas, son problemas que especialmente afectan a la redes inalámbricas mientras que otros son aplicables también a las redes cableadas.

OLSR es un protocolo de encaminamiento proactivo que periódicamente difunde información acerca de la topología de la red. Si la red MANET no estuviese desprotegida totalmente, la topología se revelaría a cualquier usuario que escuche los mensajes de control. En situaciones donde la topología de la red sea confidencial se debe utilizar técnicas como el intercambio de mensajes de control de tráfico cifrados para evitar que nodos no autorizados lean estos mensajes.

En las redes MANET basadas en OLSR, cada nodo inyecta a la red información topológica mediante la transmisión de mensajes HELLO y, en el caso de algunos nodos, mensajes TC. Si por cualquier razón, un nodo inyecta de manera malintencionada tráfico de control erróneo, la integridad de la red se vería comprometida. A continuación, se exponen ejemplos de situaciones que pueden ocurrir debido a la falta de integridad:

1. Un nodo genera mensajes TC anunciando enlaces a nodos que no son vecinos.
2. Un nodo genera mensajes TC pretendiendo ser otro nodo.
3. Un nodo genera mensajes HELLO anunciando nodos que no son vecinos.
4. Un nodo genera mensajes HELLO pretendiendo ser otro todo.
5. Un nodo reenvía mensajes que han sido alterados previamente.
6. Un nodo se niega a reenviar los mensajes de control de OLSR.
7. Un nodo reenvía una topología antigua de otro nodo.

Una contramedida utilizada en las situaciones 2, 4 y 5 es la autenticación por parte del nodo originante de los mensajes de control. Para los casos 1 y 3 se deber autenticar los enlaces individuales anunciados en los mensajes de control. Sin embargo, para prevenir que los nodos

repitan información antigua, es necesario un atributo temporal que permita identificar los paquetes anticuados.

La solución final más factible es finalizar todos los paquetes OLSR con un mensaje firmado. El contenido del mensaje se puede observar en la figura 4.

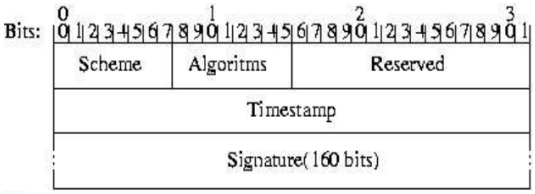


Figura 4 Esquema del mensaje de seguridad en OLSR

2.3 Despliegue de la red

La mayoría de buques de la Armada disponen de equipos de transmisión de datos de radiodifusión HF, enlaces tácticos LOS (*Line of Sight*) y NLOS (*Non Line of Sight*) y enlace satélite con soporte del protocolo TCP/IP, ventajoso dada su facilidad de interacción con otras máquinas.

Dado el propósito docente de las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar y su limitada capacidad de almacenamiento de víveres y de combustible, la distancia a costa está limitada. Es por ello que adaptar un sistema de comunicación satélite como en los buques de la Armada de mayor porte, resulta poco provechoso para la aplicación requerida y económicamente inviable.

En ese sentido, un enlace *LOS (Line of Sight)* mediante microondas de arquitectura punto-multipunto, que utilice estándares extendidos, es una solución adecuada para el propósito requerido. Un enlace de datos inalámbrico basado en el estándar 802.11 [2] que permita la comunicación directa (un solo salto) hasta los límites de la ría de Pontevedra aportaría infinidad de aplicaciones posibles en el ámbito docente. Además, explicado el concepto de red MANET, se deduce rápidamente que ese alcance puede escalarse siempre y cuando la disposición espacial de los nodos sea la debida.

2.3.1 Equipos utilizados

Cada una de las embarcaciones esta dotada de un conjunto formado por un monopolo vertical y un sistema embebido de transmisión para exteriores en la banda de 2,4 GHz.

En lo que se refiere al segmento pasivo del montaje, consta de una antena omnidireccional de exteriores fabricada con un revestimiento de fibra de vidrio y una base de aluminio que permite el anclaje a cualquier tubo cilíndrico de no más de 10 cm de diámetro. La elevada longitud del monopolo vertical en relación a la longitud de onda con la que trabaja provoca como parámetro a resaltar, un haz de radiación vertical muy estrecho. Este último parámetro es el principal motivante para la elección de esta antena en concreto, ya que al tratarse de una antena cuyo patrón de radiación en el plano horizontal es de 360º, si se requiere una antena de alta ganancia hay que sacrificar irremediablemente la apertura del lóbulo de radiación en el plano vertical.

El patrón de radiación es una de las variables más importantes a la hora de valorar qué antena elegir para los enlaces inalámbricos entre las lanchas. La estrechez de su lóbulo principal de radiación vertical, de nueve grados, la convierte en una solución viable de cara a equipar los buques con antenas punto-multipunto. Una antena omnidireccional es la solución más económica para el propósito requerido, de tal manera que también se evaluaron otras alternativas como un array de antenas sectoriales. Esta alternativa supone la utilización de algoritmos de gestión de la transmisión, esquemas de multiplexado espaciales que eviten la producción de ruido en la antena vecina que estaría cubriendo el sector adyacente, así como un encarecimiento sustancial en el presupuesto de adquisición de equipos.

El sistema embebido de transmisión consta de un transmisor de radiofrecuencia situado en la banda ISM de 2,4 GHz. Está fabricado por *Ubiquiti Networks y* dotado con un conector N, igual que el de la antena. Este concepto se denomina *Zero Variable Deployment,* que hace referencia a la ventaja que ofrece despreocuparse de cables coaxiales. En este tipo de transmisores radio, los cables coaxiales desaparecen. El transmisor va directamente conectado al conector N de la antena. Esta característica es fundamental para el éxito del despliege de la red, pues permite elimina pérdidas adicionales que se producirían con el empleo de cables coaxiales y conectores de adaptación.

Dispone de un interfaz de red *ethernet* que, aparte de extender la red inalámbrica a cualquier otra máquina, también es el medio de alimentación del transmisor mediante PoE *(Power over Ethernet)*. Esto representa una amplía ventaja en la instalación de cada uno de los transmisores de manera que solo es necesario un cable CAT5 para extender la red MANET y para alimentar el hardware.

2.3.2 Pruebas empíricas

NODO	TRANSMISOR	ANTENA	PIRE	DIRECCIÓN IP	
				WLAN0	ETH0
TIERRA-1	Bullet M2	Antena Omnidireccional AOA-2415	42 dBm	192.168.1.30/24	192.168.3.200/22
LANCHA-1				192.168.1.10/24	10.0.10.10/16
LANCHA-2				192.168.1.40/24	10.0.40.10/16
LANCHA-3				192.168.1.20/24	10.0.20.10/16

Tabla 1 Relación de nodos

En la primera prueba el nodo TIERRA-1 se instala en la fachada norte del cuartel Almirante Francisco Moreno. El principal inconveniente de este escenario de radica en que el edificio del Centro de Medidas Electromagnéticas se encuentra en la trayectoria del haz de la antena hacia el exterior de la ría de Pontevedra. Este nodo es la puerta de enlace de acceso a Internet de toda la red MANET, extendiendo la red del cuartel Almirante Francisco Moreno que se encuentra en la subred 192.168.0.0/22.

Los nodos embarcados denominados como LANCHA-X se instalan provisionalmente en el puente alto de las lanchas de instrucción. Se procura que el haz omnidireccional de la antena

tenga en visión a todo horizonte para que no haya ángulos muertos que condicionen al gobierno de la embarcación.

A pesar de los sectores sin visión directa de la ría, se alcanza una distancia máxima sin retransmisiones de 8,2 Km. La tablas de encaminamiento se actualizan satisfactoriamente experimentándose un retardo de no más de 10 segundos en la actualización de la topología de la red. La realidad en este escenario es que se producen grandes pérdidas debido a la cercanía de los obstáculos en las proximidades de la antena. Otro hecho determinante es el uso de una antena omnidireccional en lugar de un sistema embebido de transmisión con una antena sectorial.

La herramientas utilizada para examinar la topología de la red en tiempo real se corresponde con el modulo "olsr-viz", que realiza una representación gráfica de la topología tal y como se observa en la imagen.

La tasa de transferencia en enlace directo resultó ser de 6 Mbps y una latencia de no más de 60ms. Esto permitía hacer un uso fluido de servicios disponibles en Internet como navegación normal *web* e incluso la visualización de vídeos en *streaming*, lo cual demuestra la capacidad del radioenlace para soportar otras aplicaciones.

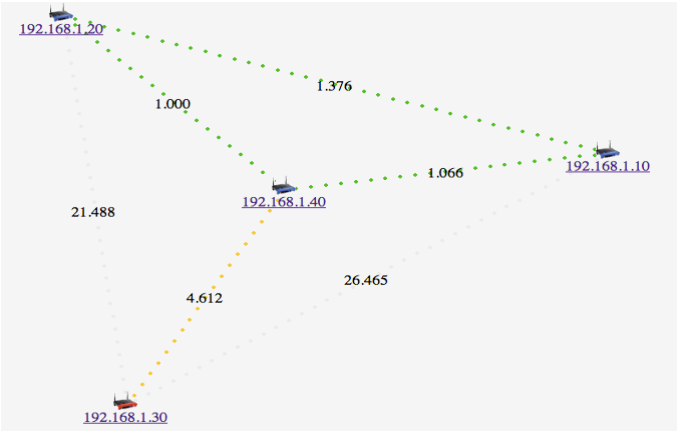
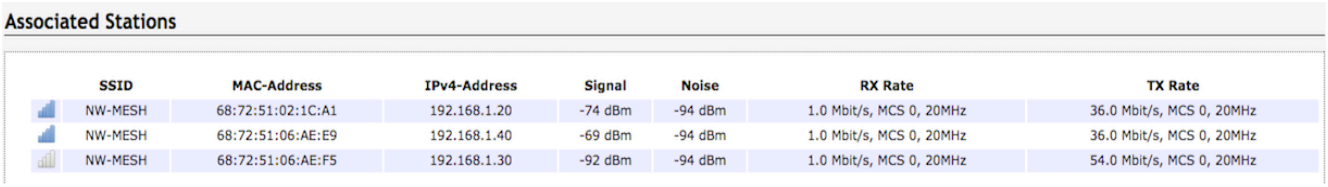


Figura 5 Representación de la topología en tiempo real mediante software

La figura 2-6 muestra la situación en la cual el nodo "LANCHA-2" (IP: 192.168.1.40) es el único en alcance radio con el nodo en tierra. Esta situación se monitoriza remotamente desde el nodo "LANCHA-1"(IP: 192.168.1.10).

A continuación se exponen los criterios seguidos por el algoritmo de encaminamiento para la elaboración de las tablas de encaminamiento.

LQ: *Success rate of packages received from the neighbour*
NLQ: *Success rate of packages sent to the neighbour*
ETX: *Expected retransmission count*
Green*:Very good (ETX < 2)*
Yellow*:Good (2 < ETX < 4)*
Orange*:Still usable (4 < ETX < 10)*
Red*:Bad (ETX > 10)*



Associated Stations

SSID	MAC-Address	IPv4-Address	Signal	Noise	RX Rate	TX Rate
NW-MESH	68:72:51:02:1C:A1	192.168.1.20	-74 dBm	-94 dBm	1.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz	36.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz
NW-MESH	68:72:51:06:AE:E9	192.168.1.40	-69 dBm	-94 dBm	1.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz	36.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz
NW-MESH	68:72:51:06:AE:F5	192.168.1.30	-92 dBm	-94 dBm	1.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz	54.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz

Figura 6 Potencia Rx a bordo de "LANCHA-1"

En la figura 6 se observa la baja potencia recibida del nodo en tierra: -92dBm de potencia en la recepción no es suficiente para que el transmisor enlace directamente con tierra. Automáticamente, "LANCHA-2" comienza a retransmitir hacia los demás nodos fuera de alcance.

Durante la segunda prueba los nodos en tierra fueron recolocados, eliminando en la medida de lo posible obstáculos que negaran la visión directa de la ría. Pese a que las condiciones meteorológicas eran de lluvia intensa, la antena omnidireccional AOA-2415 del nodo "TIERRA-1" demostró tener un alcance de 11 km. En esta situación de enlace a dos saltos de distancia en el punto más lejano donde el sistema demostró seguir teniendo enlace se logró una tasa de transferencia de 1,3 Mbps con una latencia en torno a 100 ms.

3. Conclusiones

Este artículo representa la gran capacidad de proyección que las redes malladas de nodos móviles tienen dentro de el ámbito de las fuerzas navales. La portabilidad hacia frecuencias menores de este tipo de estándares supondría la posibilidad de aumentar la potencia transmitida, disminuir las perdidas por atenuación del medio e irremediablemente aumentar el alcance radio hasta la frontera física del horizonte. Asimismo, profundizar en el estudio de la seguridad sería factor fundamental antes de la implantación de estos estándares para un uso profesional. La confidencialidad e integridad de la información es un parámetro fundamental a tener en cuenta en este tipo de redes inalámbricas. Esta confidencialidad en la información debe tener relevancia no sólo en personas externas a la red MANET que puedan perturbar la capa física o incluso afectar la capa de enlace inyectado falsas tramas que suplanten la identidad de usuarios ya autenticados, sino también en usuarios propios de la MANET que por la naturaleza de la red funcionen de retransmisores de la información. Para solucionar este problema sería útil la implantación túneles seguros haciendo uso del estándar IPSEC [6].

4. Referencias

[1] Auerbach Publications, *Wireless Mesh Networking*, Jijun Luo, Honglin Hu Yan Zhang, Ed. New York, 2007.

[2] IEEE Standars Associaton, "Part 11: Wireless Lan Medium Access Layer and Physical Layer".

[3] K. Petteri, *Classification of ad hoc routing protocols*. Finland: Finish Defence Forces,

Naval Academy, 2002.

[4] P. Jacquet T. Clausen. RFC3626. [Online]. https://tools.ietf.org/html/rfc3626

[5] Andreas Tonessen. (2004) Securing OLSR. [Online]. http://www.olsr.org/docs/report_html/node156.html

[6] S.Kent and R.Atkinson, *Security architecture for the Internet Protocol. RFC 2401*.

SAGA
Sistema Automático de Geolocalización basado en los Astros

González-Aller Rodríguez, Gerardo [1]; González-Aller Rodríguez, Santiago [1]; Fernández García, Norberto [1]* y Barragáns Martínez, Belén [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar; Plaza de España S/N, CP 36920, Marín, Pontevedra, España.

* Autor responsable del trabajo; norberto@cud.uvigo.es

Abstract: Los sistemas de navegación global por satélite se usan a día de hoy en las fuerzas armadas de prácticamente todos los países del mundo, incluyendo la Armada Española, que emplea el GPS americano. A pesar de las ventajas que estos sistemas ofrecen, su uso no está carente de problemas. Por un lado, este sistema está totalmente controlado por los EEUU, lo que supone una dependencia estratégica. Por otro lado, las señales GPS son débiles cuando llegan a la Tierra lo que permite que sean relativamente fáciles de perturbar o suplantar. Estas vulnerabilidades y dependencias nos hacen pensar que es necesario un sistema de geolocalización auxiliar. En particular, en este trabajo se ha explorado la viabilidad de emplear técnicas de navegación astronómica, para lo que se ha creado una aplicación móvil llamada SAGA (Sistema Automático de Geolocalización basado en los Astros). Los resultados de la evaluación empírica de esta aplicación demuestran la viabilidad del enfoque y abren la puerta a continuar su desarrollo en el futuro.

Keywords: Geolocalización; Navegación astronómica; Aplicación móvil; Android

---

1. Introducción

Desde que en 1964 el Departamento de Defensa de Estados Unidos pusiera en funcionamiento el sistema TRANSIT (*Technology Review Assistance Notification Standards Integration and Testing*) [1], los sistemas de posicionamiento por satélite han avanzado muy rápidamente. En la actualidad, sistemas como el GPS (*Global Positioning System* o Sistema de Posicionamiento Global) americano o el GLONASS (*Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema* o Sistema Global de Navegación por Satélite) ruso están plenamente integrados en los vehículos y plataformas de las fuerzas armadas de

prácticamente todos los países del mundo. En particular, en el caso de la Armada Española se utiliza ampliamente el GPS americano.

A pesar de su innegable utilidad, el uso del GPS en la Armada Española no está desprovisto de problemas. Por un lado, este sistema está totalmente controlado por los EEUU, lo que supone una dependencia estratégica considerable hasta que Europa ponga en funcionamiento el sistema Galileo (que además no contará con frecuencias de uso exclusivamente militar). Por otro lado, las señales GPS son débiles cuando llegan a la Tierra. Experimentos recientes han demostrado que es fácil impedir su uso por parte de cualquier usuario en una zona determinada, emitiendo ruido para perturbar las frecuencias correspondientes (*GPS jamming*). Además, emitiendo señales cerca del receptor iguales a las que recibiría de los satélites del sistema GPS, no solo se puede inhibir el sistema, sino que se podría suplantar (*GPS spoofing*), haciendo que las coordenadas calculadas sean distintas a aquellas en las que realmente se encuentra el receptor.

Todas estas vulnerabilidades y dependencias nos hacen pensar que es necesario un sistema de geolocalización auxiliar, sobre todo para las navegaciones oceánicas lejos de la costa. Dado que antes del desarrollo de los sistemas de posicionamiento por satélite los marinos utilizaban los astros para definir su posición, el objetivo de este trabajo es revisar esta forma de navegación, aplicando nuevas tecnologías a la misma. En particular, se ha creado una aplicación móvil para sistemas Android llamada SAGA (Sistema Automático de Geolocalización basado en los Astros) cuyo objetivo es automatizar en la medida de lo posible el mecanismo de cálculo astronómico de posición.

Tras haber implementado la aplicación SAGA, se realizaron pruebas para evaluar su funcionamiento. Los resultados demuestran la viabilidad del enfoque y abren la puerta a continuar su desarrollo en el futuro. El objetivo final es llegar a desarrollar un sistema totalmente automático e independiente, capaz de obtener la posición incluso en una plataforma móvil, como puede ser, por ejemplo, un barco.

El resto del presente artículo se estructura como sigue: la sección 2 presenta un breve repaso a las técnicas de navegación marítima, prestando especial atención a los sistemas de navegación por satélite y a las técnicas de navegación astronómica; la sección 3 describe la implementación del sistema SAGA; la sección 4 muestra los resultados obtenidos en la evaluación de dicho sistema y, por último, la sección 5 resume las principales conclusiones extraídas de la realización del presente estudio, así como potenciales líneas futuras de continuación del mismo.

2. Estado del Arte

En esta sección haremos una introducción a las diferentes técnicas de navegación marítima (sección 2.1) para posteriormente centrarnos en las técnicas de mayor interés en el contexto de este trabajo: los sistemas de radionavegación por satélite (sección 2.2) y las técnicas de navegación astronómica (sección 2.3).

2.1. Técnicas de navegación marítima

Como se describe en el Manual de Ayudas a la Navegación de la IALA/AISM (*International Association of Lighthouse Authorities* o Asociación Internacional de Señalización Marítima), los principales métodos de navegación marítima se pueden clasificar de la siguiente manera [2]:

Navegación por estima Navegación basada en el control de la velocidad, el tiempo transcurrido y la dirección seguida desde una posición conocida. Este método se basa en el registro de los rumbos mantenidos durante diferentes intervalos de tiempo a unas velocidades concretas, a las que se añaden correcciones aproximadas calculadas debido a elementos perturbadores como el viento y la corriente. De entre todas las técnicas de navegación, ésta es, con diferencia, la de mayor error a medio y largo plazo (puede llegar a estar en el rango de las millas).

Navegación costera o terrestre Navegación calculada por medio de información obtenida por la observación visual o mediante radar de elementos notables de la costa o marcas situadas en tierra. Con ella se puede llegar a conseguir una gran precisión (en el rango de algunos metros) en zonas cercanas a la costa.

Navegación celeste o astronómica Navegación que utiliza la información obtenida de diferentes astros (por ejemplo, el Sol, la Luna, los planetas o las estrellas). Esta navegación obtiene precisión de, al menos, una milla náutica en alta mar.

Radionavegación Navegación que utiliza señales de radio para determinar la posición del buque (por ejemplo, el uso de la señal satélite del GPS o del GLONASS). Debido a su precisión (unos pocos metros) es, en la actualidad, el sistema de navegación más extendido y de mayor uso.

Navegación inercial La navegación inercial[1] es el proceso de medir la velocidad, orientación y desplazamiento de un vehículo desde un punto de partida conocido mediante la detección de las aceleraciones que actúan sobre él en direcciones conocidas. Es un sistema muy preciso, pero que presenta el inconveniente de que los pequeños errores que se producen se van acumulando con el tiempo, con lo que hay que corregir la situación con otros medios cada cierto tiempo.

2.2. Sistemas de navegación global por satélite

Como se indicó con anterioridad (sección 2.1), los sistemas de navegación global por satélite (*Global Navigation Satellite Systems*, GNSS), como el GPS americano, el GLONASS ruso o los sistemas en desarrollo Galileo (europeo) y Beidou (chino), permiten determinar una posición con una gran precisión. Para ello el receptor cuya posición se pretende determinar debe localizar una serie de satélites en órbita (en el caso del GPS, un mínimo de 4 de un total de 24 disponibles [3]). Estos satélites emiten una señal con información temporal y de posición. Con esta información el receptor puede calcular el tiempo que tardan en llegar las señales, medir las distancias a los satélites y determinar su posición. Debido a la elevada precisión que se obtiene con este mecanismo, los sistemas GNSS se consideran el estado del arte actual en técnicas de navegación.

Sin embargo, para poder operar este tipo de sistemas se necesita una infraestructura satelital costosa. Debido a esto, el despliegue de esta clase de sistemas sólo está al alcance de grandes potencias, siendo el resto de usuarios dependientes tecnológicamente de quien hace el despliegue. Desde la perspectiva

[1] Aunque el manual de la AISM no contempla la navegación inercial, ya que su uso no está totalmente extendido en el mundo de la navegación marítima, en este proyecto se ha considerado por completitud.

militar esta dependencia supone un problema, puesto que quien controle el sistema podría en cualquier momento apagar la señal en una zona determinada o bajar la precisión de manera artificial.

Por otro lado, las señales que los satélites envían hacia la Tierra son débiles cuando llegan a la superficie, y por tanto son fáciles de perturbar. Ejercicios recientes en los que ha participado la Armada Española demuestran que con equipos comerciales relativamente asequibles es posible inhibir la recepción de la señal de GPS, tanto civil como militar. Además, diversos estudios [4] han demostrado que es posible suplantar las señales del GPS comercial, lo que permitiría por ejemplo alterar el rumbo de sistemas automatizados como UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) para poder dirigirlos donde se desee [5].

2.3. Navegación astronómica

Para poder situarse en un momento concreto utilizando las técnicas de navegación astronómica es necesario medir la posición aparente en el cielo en la que se observan uno o varios cuerpos celestes desde la ubicación a determinar. Para ello se mide la altura[2] y el azimut[3] de los astros de interés. Utilizando los datos medidos y con la ayuda de un almanaque naútico, que nos permite calcular la posición de esos mismos astros respecto al meridiano de Greenwich (horario del astro en Greenwich) y al ecuador (declinación) en ese mismo momento, podemos obtener la longitud y latitud de la posición de observación.

Este mecanismo de navegación era el más utilizado hasta hace unas décadas, cayendo en desuso con el desarrollo de los sistemas de navegación electrónica. Aún así, existen ejemplos relativamente recientes de uso de estos mecanismos, como puede ser el sistema NAS-14V2 ANS desarrollado en los años 60 para ser empleado en el avión de reconocimiento estratégico SR-71 Blackbird [6] o el proyecto STELLA de la Armada de EEUU [7] que, desarrollado en los años 90, tenía como objetivo la implementación de software que, aplicando algoritmos de resolución astronómica, permitía obtener la situación en un momento dado.

3. El sistema SAGA

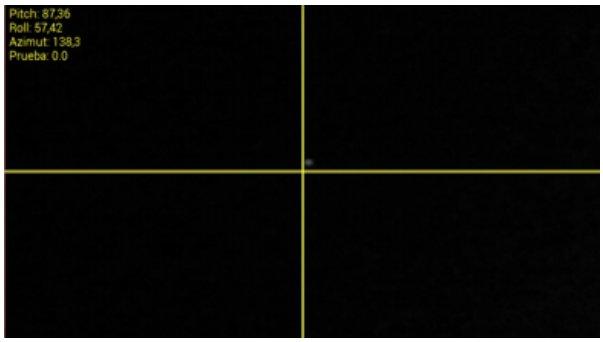
Tras el análisis del estado del arte presentado en la sección 2 se puede concluir que los sistemas de navegación global por satélite son actualmente los más utilizados. Sin embargo, se indicó también que presentan problemas, que hacen necesario buscar algún mecanismo complementario de navegación. En este trabajo se explora la viabilidad de emplear técnicas de navegación astronómica implementadas a través de una aplicación móvil, que se describe en la presente sección. Dicha aplicación se ha estructurado en dos módulos diferentes: uno encargado de la adquisición de datos de los astros (descrito en la sección 3.1) y otro encargado de estimar la posición en base a estos datos y presentar los resultados al usuario (sección 3.2). Toda la aplicación se ha implementado en el lenguaje de programación Java, de forma que se pueda ejecutar en dispositivos móviles con sistema operativo Android.

3.1. Adquisición de datos

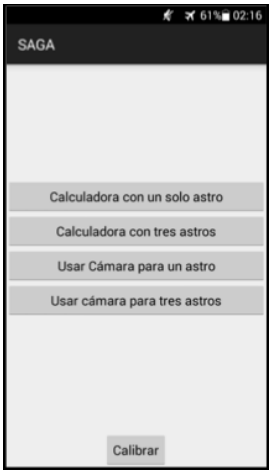
[2] Ángulo o longitud de arco medido desde el horizonte hasta el astro

[3] Ángulo o longitud de arco medido sobre el horizonte celeste que forman el punto cardinal norte y la proyección vertical del astro sobre el horizonte del observador

Figura 1. Capturas de la interfaz gráfica de SAGA.



(a) Interfaz de localización de astros.



(b) Interfaz de inicio de la aplicación.

A efectos prácticos el objetivo fundamental del módulo de adquisición de datos [8] consiste en obtener la altura y el azimut de un astro en un determinado instante de tiempo. Para ello este módulo hace uso de los sensores integrados en el teléfono móvil[4]. En particular, para el desarrollo del módulo de adquisición se empleó la información proporcionada por las siguientes fuentes:

Cámara Para poder obtener los datos de azimut y elevación de un astro, es necesario que el usuario pueda observar el astro a través del móvil y apuntar hacia él. Para permitir esta funcionalidad se ha hecho uso de lo que se conoce como una *Preview*, que hace posible acceder a la vista previa de la cámara del dispositivo. Sobre esta vista previa se pueden superponer elementos dibujados, lo que permite implementar funcionalidades de realidad aumentada. En nuestro caso esto se utilizó para representar un puntero en forma de cruz, que facilita al usuario centrar el astro en la pantalla (véase Figura 1(a)). Adicionalmente, con el propósito de permitir una mejor observación nocturna de los astros se realizaron una serie de ajustes de los parámetros de la cámara: se configuró el zoom a su valor máximo posible; el enfoque de la cámara se estableció en el infinito y se activó el modo nocturno de la cámara. Por último, con el objetivo de mejorar el contraste entre los astros brillantes y el cielo oscuro se realizó un procesado de la imagen de la vista previa para mostrarla en escala de grises.

Acelerómetro, Giróscopo y Brújula A partir de estos sensores la aplicación SAGA obtiene la información de azimut y elevación. En particular:

- Para el cálculo del azimut se utiliza el tipo de sensor *TYPE_ROTATION_VECTOR* de Android, que representa un sensor virtual que internamente utiliza información proporcionada por el acelerómetro, el giróscopo y la brújula del móvil.
- Para el cálculo de la elevación se utiliza el tipo de sensor *TYPE_GRAVITY* de Android, que proporciona acceso a los datos del acelerómetro del dispositivo móvil. A partir de estos datos

[4]En este trabajo se utilizó un Huawei Ascend G630 como plataforma de desarrollo y pruebas.

en crudo se lleva a cabo un filtrado paso bajo para eliminar componentes ruidosas y se calcula el ángulo de elevación (en grados) respecto al horizonte aplicando la ecuación[5]:

$$Elevacion = 90 - atan(\frac{Ac(x)}{\sqrt{Ac(y)^2 + Ac(z)^2}}) \quad (1)$$

Donde $Ac(\cdot)$ representa el valor obtenido del acelerómetro para un eje determinado (x, y o z).

Reloj del sistema Para poder realizar el cálculo de posición es necesario obtener el instante de tiempo UTC (*Coordinated Universal Time*) en el que se toman las medidas de azimut y elevación. Para ello el módulo de adquisición de datos ha hecho uso del reloj del sistema. Para acceder a los datos del mismo se utiliza la clase *Calendar* proporcionada por Android, a través de la que se puede obtener fácilmente la información necesaria para el módulo de procesamiento (año, mes, día, hora, minuto y segundo de cada observación).

3.2. Procesamiento y presentación de datos

El módulo de procesamiento y presentación de datos [9] lleva a cabo, fundamentalmente, dos operaciones:

1. Procesa los datos de entrada proporcionados por el módulo de adquisición de datos, para determinar las coordenadas del observador. En particular, este módulo implementa dos formas de cálculo de posición:
   - A partir de la altura y azimut de un único astro (y el instante de observación de estos datos), resolviendo un triángulo esférico oblicuángulo del que, gracias a los datos de entrada y a la información obtenida de un almanaque naútico, se conocen dos lados y el ángulo opuesto a uno de ellos.
   - A partir de las alturas de tres astros (y sus instantes de observación) empleando el denominado método de las bisectrices. A pesar que este método necesita más información de entrada y por tanto es más complejo para el usuario que el anterior, presenta la ventaja de que ofrece una estimación de la ubicación más precisa y robusta a errores de medición.
2. Implementa la interfaz gráfica (Figura 1(a, b)) a través de la que el usuario puede controlar toda la aplicación: seleccionar el modo de operación (uno o tres astros), especificar el nombre de cada astro a observar (a partir de una base de datos de los astros más relevantes), capturar los datos de cada astro, etc. Muestra además los resultados obtenidos (coordenadas GPS calculadas).

4. Evaluación

Una vez implementada la aplicación se procedió a evaluar su funcionamiento de manera experimental. En particular el proceso de evaluación de la herramienta se dividió en tres partes:

[5] Asumiendo que el móvil está orientado horizontalmente.

1. Pruebas del módulo de adquisición de datos: se comparó el azimut obtenido con el proporcionado por otras aplicaciones móviles con funcionalidad de brújula[6] y se comparó la altura con la obtenida a través del programa *Navigator*[7]. En el caso del azimut se observó que los datos obtenidos, aunque similares a los ofrecidos por otras aplicaciones, no tenían demasiada exactitud (siendo habituales errores de 1 o 2 grados). En el caso de las alturas, la serie de medidas realizadas resultó en precisión de alrededor de 0.1 grados (con el móvil anclado a un trípode para evitar el movimiento del pulso del usuario). Esta precisión resulta aceptable para los objetivos de la aplicación.

2. Pruebas del módulo de procesamiento y presentación: se probó el mecanismo de cálculo de posición tomando como base la información de azimut y elevación proporcionada por el programa *Navigator* y comparando la posición con la obtenida a través de GPS. En el caso del método de un astro los errores obtenidos estaban entre 0.3 y 4.5 millas náuticas, mientras que en el caso del método de las bisectrices los errores se encontraban entre las 0.5 y las 2 millas náuticas.

3. Pruebas de integración: en estas pruebas la información de entrada del módulo de procesamiento y presentación proviene del módulo de adquisición. En este caso se realizaron pruebas utilizando la posición del Sol como referencia (método de un sólo astro) obteniendo errores de entre 30 y 50 millas náuticas, que en su mayor parte se deben a la limitada precisión del azimut ofrecido por el terminal móvil. De hecho, un análisis a posteriori de los datos reflejó que corrigiendo apropiadamente el azimut se hubiera llegado a errores de menos de 10 millas náuticas, lo que supone unos resultados aceptables.

5. Conclusiones y líneas futuras

A pesar de que los sistemas de navegación global por satélite se consideran a día de hoy el estado del arte en técnicas de navegación debido a su elevada precisión, este tipo de sistemas presentan algunas vulnerabilidades que hacen deseable disponer de alguna alternativa a la que recurrir en caso de fallo. En este trabajo se ha explorado como alternativa el uso de las técnicas de navegación astronómica. Para ello se ha implementado la aplicación móvil SAGA que, utilizando la información ofrecida por los sensores del dispositivo, es capaz de calcular la posición del observador. A pesar del bajo coste de la solución implementada (requiere únicamente un *smartphone* para su operación) las pruebas realizadas indican que se podrían obtener estimaciones de entre 30 y 50 millas náuticas de error en la posición, y que este error se podría reducir hasta menos de 10 millas náuticas en caso de disponer de información de azimut de mayor calidad. Es por ello por lo que los resultados obtenidos en esta primera experiencia se consideran satisfactorios.

Sin embargo, de cara a la posible utilización de este tipo de técnicas en entornos militares, donde se requeriría una estimación de posición de mayor calidad, serían recomendables una serie de mejoras de distinto tipo: mejoras en los equipos sensores, empleando por ejemplo cámaras infrarrojas o telescopios en lugar de la cámara del teléfono móvil; mejoras en el procesamiento de la información obtenida de los sensores, recurriendo a técnicas como podrían ser los filtros de Kalman o de técnicas de procesado

[6] Como *Compass Pro* o *MagnetMeter*.

[7] En línea: http://www.tecepe.com.br/nav/ [15/07/2015]

de imagen que facilitarían la localización de los astros; mejoras en la interfaz, por ejemplo incluyendo mecanismos de identificación automática de astros, o mejoras en la plataforma de observación, que en el presente trabajo se asumía fija (el suelo), pero en entornos realistas (por ejemplo, en los navíos de la Armada) podría ser móvil, lo que requeriría corregir los efectos de este movimiento.

Referencias

1. Smithsonian Institution. Time and Navigation: The First Satellite Navigation System. En línea: http://timeandnavigation.si.edu/satellite-navigation/reliable-global-navigation/first-satellite-navigation-system [15/07/2015]
2. Dirección de Planificación y Desarrollo Portuario de Puertos del Estado, Edición española del *Manual de Ayudas a la Navegación de la IALA/AISM*, 5ª Edición, 2006.
3. Ahmed El-Rabbany. *Introduction to GPS: The Global Positioning System, Second Edition*, Artech House Publishers, ISBN: 978-1596930162, 2006.
4. Tippenhauer, N.; Pöpper, C.; Rasmussen, K.B.; Capkun, S. On the requirements for successful GPS spoofing attacks. En *Proceedings of the 18th ACM Conference on Computer and Communications Security* (CCS'11). ACM, New York, NY, USA, pp. 75-86.
5. Andrew J. Kerns; Daniel P. Shepard; Jahshan A. Bhatti; Todd E. Humphreys. Unmanned aircraft capture and control via GPS spoofing. *Journal of Field Robotics*, **2014**, 4 (31), pp. 617-636.
6. Smithsonian Institution. Time and Navigation: Nortronics NAS-14V2 Astroinertial Navigation System. En línea: http://timeandnavigation.si.edu/multimedia-asset/nortronics-nas-14v2-astroinertial-navigation-system [15/07/2015]
7. George H. Kaplan. New Technology for Celestial Navigation. *Actas de Nautical Almanac Office Sesquicentennial Symposium*, U.S. Naval Observatory, 3-4 Marzo, 1999; pp. 239–254.
8. González-Aller Rodríguez, S. Sistema automático de geolocalización basado en los astros: módulo de adquisición de datos. Trabajo de fin de grado, Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, 2015. En línea: http://calderon.cud.uvigo.es/handle/11621/32/ [15/07/2015]
9. González-Aller Rodríguez, G. Sistema automático de geolocalización basado en los astros: módulo de procesamiento y presentación de datos. Trabajo de fin de grado, Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, 2015. En línea: http://calderon.cud.uvigo.es/handle/11621/31/ [15/07/2015]

Aplicación de un enfoque sistemático para el estudio y categorización de comandos de bandas terroristas

Barreras Peral, Álvaro[1], **Bernardi, Simona**[1], **Dranca, Lacramioara**[1], **López Castelló, Pedro A.**[2], **Oller Marcén, Antonio M.**[1], **Umpiérrez Rodríguez, Francisco J.**[2], **Velasco Cebrián, M. Pilar** [1]* **y Vigara Benito, Rubén**[1]

[1] CUD Zaragoza; Emails: {albarrer,simonab,licri,oller,velascom,rvigara}@unizar.es
[2] Guardia Civil; Emails: {plopezcastello,fjumpierrez}@guardiacivil.es

* Autor responsable del trabajo; velascom@unizar.es

Abstract: La disponibilidad de herramientas software de apoyo al análisis es imprescindible para obtener información útil en la lucha antiterrorista, sin embargo no es suficiente. También se necesitan enfoques sistemáticos para adquirir, procesar de manera integrada, analizar e interpretar la distinta información relacionada con el terrorismo. En este trabajo presentamos el enfoque que hemos utilizado para la integración y análisis de datos heterogéneos relacionados con los comandos legales de la banda terrorista ETA desarticulados entre los años 2000 y 2011. El objetivo principal es proporcionar un método para identificar diversos tipos de comandos, así como las variables que los determinan, y caracterizar las acciones perpetradas en base a diferentes perspectivas.

Keywords: base de datos; ETL; SQL; análisis de componentes principales; terrorismo

---

1. Introducción

Uno de los principales problemas que tienen que enfrentar los Servicios de Información de la Guardia Civil es el tratamiento de un gran volumen de datos sobre las acciones cometidas por grupos terroristas y las personas involucradas. En [10] presentamos un estado del arte sobre la aplicación de técnicas de minería de datos para el análisis en el ámbito de la informática contra el terrorismo [1]. En particular, existen en la literatura trabajos que utilizan diversas técnicas de análisis estadístico multivariante para el análisis de grupos terroristas. Por ejemplo, en [3] se utiliza el análisis de componentes principales para determinar factores comunes y específicos de cada país en cuanto al terrorismo transnacional durante el periodo 1970-2007. En [2] se utilizan técnica del análisis de conglomerados para clasificar las acciones

terroristas almacenadas en la base de datos del Departamento de Estado de los EEUU *Chronology of Significant Terrorist Incidents* correspondientes al año 2003. Los estudios anteriores persiguen, por una parte, dar una clasificación de grupos o acciones terroristas en distintas categorías y, por otra, determinar las variables más importantes que determinan la pertenencia a esas categorías. Este tipo de análisis permite *identificar tendencias, patrones y cuestiones para investigaciones posteriores* [3].

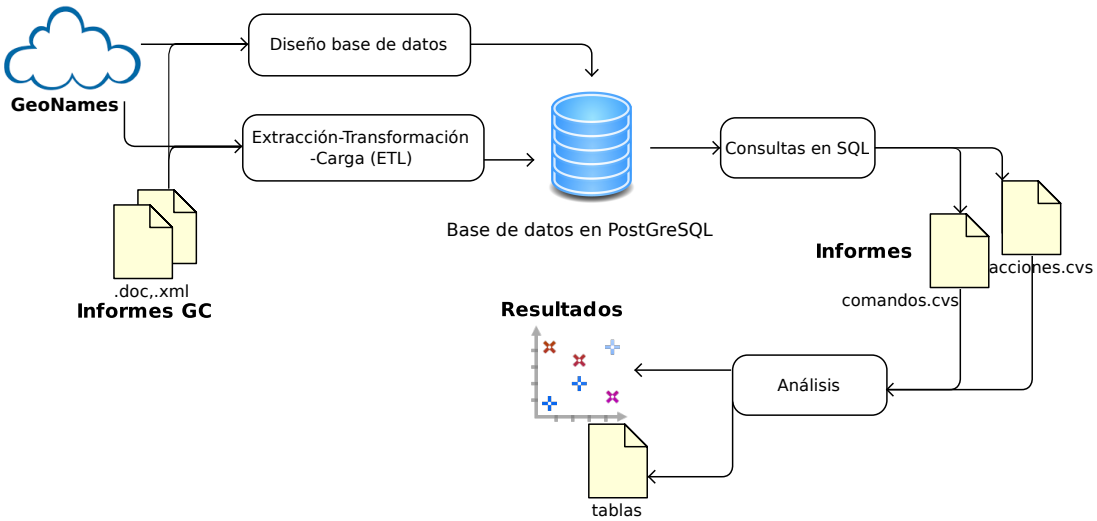
La disponibilidad de herramientas software de apoyo al análisis es imprescindible para obtener información útil en la lucha antiterrorista. Sin embargo, no es suficiente. También es necesario adoptar enfoques sistemáticos para adquirir, procesar de manera integrada, analizar e interpretar la distinta información relacionada con el terrorismo. En este trabajo presentamos el enfoque que hemos utilizado para la integración y análisis de datos heterogéneos relacionados con los comandos legales de la banda terrorista ETA desarticulados entre los años 2000 y 2011. El objetivo principal es proporcionar un método para identificar diversos tipos de comandos, así como las variables que los determinan, y caracterizar las acciones perpetradas en base a diferentes perspectivas.

La organización del trabajo es la siguiente: la Sección 2 presenta una visión de conjunto del método utilizado y describe en detalle cada actividad. La Sección 3 incluye algunos resultados obtenidos con el análisis de los comandos y acciones. La Sección 4 presenta las conclusiones.

2. Método y actividades

La Figura 1 proporciona una visión de conjunto del método: cada actividad necesita datos en entrada, produce datos elaborados en salida y se lleva a cabo utilizando herramientas software con el propósito de automatizar cuanto más posible el proceso de integración y análisis.

Figura 1. Visión de conjunto.



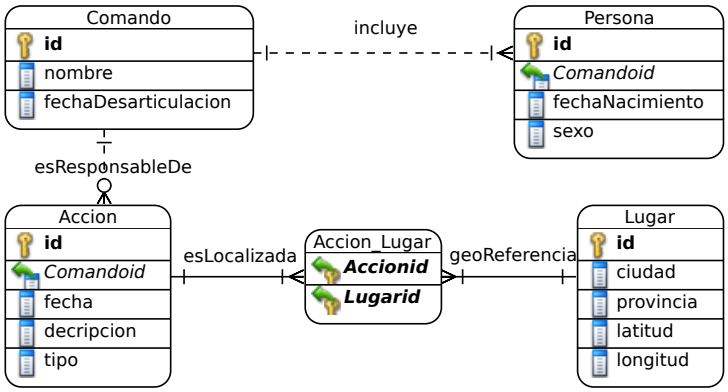
Los datos de origen se concretan principalmente en los informes proporcionados por la Guardia Civil (*Informes GC*). También se ha recurrido a fuentes externas, en concreto la base de datos geográfica pública *GeoNames* [12] para complementar los lugares de las acciones terroristas con sus coordenadas. Estos datos han sido explotados tanto para el *diseño de la base de datos*, adaptada a los objetivos del

análisis, como para poblar la implementación de la misma en *PostGreSQL* [8]. Además de proceder de fuentes diferentes, los datos de origen tienen también diferentes formatos por lo tanto ha sido necesario llevar a cabo un proceso de *extracción, transformación y carga (ETL)* de los mismos en la base de datos. A través de *consultas en SQL* (Structured Query Language) de la base de datos se han obtenidos informes ad-hoc para los dos tipos de *análisis* planteados, es decir, el análisis basado en comandos y el análisis basado en las acciones.

2.1. Diseño de la base de datos

La Figura 2 muestra las principales entidades y relaciones identificadas a partir de los datos proporcionados por la Guardia Civil y considerando los objetivos del análisis. Un comando está compuesto por una o más personas y es responsable de cero o varias acciones terroristas. Una acción terrorista puede haber abarcado más que un lugar y en un lugar puede haber ocurrido más que una acción. Hemos utilizado la herramienta Visual Paradigm [11] para crear el modelo entidad-relación de la Figura 2 y generar automáticamente el código SQL para la implementación de la base de datos en *PostGreSQL*.

Figura 2. Esquema de la base de datos



2.2. Extracción, tranformación y carga

Para poblar con datos la base de datos diseñada en el paso anterior, se ha utilizado principalmente el informe .doc proporcionado por la GC. Para su procesado se ha desarrollado código en el lenguaje Python (utilizando sobre todo la potencia de las expresiones regulares) para extraer de manera automática la información de los comandos (entidad *Comando* en la Figura 2) y sus acciones (entidad *Accion* en la Figura 2). Algunas operaciones de transformación han sido necesarias -por ejemplo, en el caso de las fechas- para uniformizar formatos y posteriormente cargar los datos en sus correspondientes tablas en la base de datos.

A continuación, la descripción textual de cada acción extraída en el paso anterior se ha procesado con el fin de: 1) geo-referenciar las acciones y 2) categorizarlas en base a un listado predefinido.

Para estas tareas se ha utilizado en primer lugar una herramienta software de Procesamiento del Lenguaje Natural (en inglés Natural Language Processing, NLP). Teniendo en cuenta que el texto a analizar se presenta en español, dentro de las diferentes herramientas de este tipo disponibles, se ha

recurrido a la librería de código abierto FreeLing [7] desarrollada en el centro TALP de la Universidad Politécnica de Cataluña.

La herramienta se ha utilizado en las siguientes tareas:

- Lematización. A partir del texto inicial se obtiene un nuevo texto donde las palabras están en la forma canónica (lemas: es decir la palabra en la forma que nos la encontraríamos como entrada en un diccionario). En este paso además se eliminan preposiciones, artículos y conjunciones.

- Reconocimiento de Nombres de Entidades (en inglés Named Entity Recognition, NER). Consiste en la extracción del texto de elementos atómicos representando, por ejemplo, nombres de personas, localizaciones, etc.

- Clasificación de Nombres de Entidades (en inglés Named Entity Classificaction, NEC). Consiste en una primera clasificación de las entidades obtenidas en el paso anterior a un grupo predefinido: persona, lugar, organización o sin identificar.

Para la tarea de geo-referenciar las acciones, la atención se ha centrado en mejorar la calidad de los resultados de la extracción de las localizaciones de las acciones a nivel de núcleos poblacionales.

Para ello, se ha intentado en primer lugar mejorar los resultados del NER/NEC aplicados mediante *transformaciones en el texto original* surgidas por sus particularidades (por ejemplo: "C/" trasformarlo a "calle").

En segundo lugar, la lista de posibles localizaciones obtenida ha pasado por un proceso de *validación*. Para esta tarea se ha recurrido a un diccionario geográfico [4] con el fin de validar las localizaciones obtenidas y eliminar aquellas que no aparecieran en el diccionario geográfico. Concretamente, se ha utilizado GeoNames [12] como diccionario geográfico, al tratarse de una fuente pública, con datos a nivel mundial (incluidos España y Francia, los territorios que aparecen en el texto objeto de análisis) y con actualizaciones periódicas. Las localizaciones que aparecieran entre paréntesis han sido consideradas provincias en este proceso. Para este trabajo se ha considerado únicamente la primera localización válida encontrada en el texto de cada acción. En aquellos casos donde no ha sido posible encontrar de manera automática ninguna localización (sea por necesidad de desambiguar la localización y separar la parte referente a una localidad, texto sin referencia a una localidad en concreto, localidad que no apareciera en el diccionario geográfico), el etiquetado se ha hecho manualmente a partir de la información encontrada en el texto, información encontrada en la fuente .xml y de información publicada en los periódicos, en su caso.

A continuación, a las acciones etiquetadas con su lugar asociado se les han asignado las coordenadas (latitud y longitud: entidad *Lugar* en la Figura 2). Normalmente este paso requiere un proceso de desambiguación, puesto que pueden existir múltiples entradas en el diccionario geográfico con el mismo nombre. Al tratarse de localizaciones limitadas al territorio de España y Francia y referidas en general en el texto a una provincia en concreto, este proceso de desambiguación se ha visto simplificado. Sin embargo, para casos como "Madrid" -puede referirse a la comunidad o a la ciudad- se ha dado prioridad a la designación más específica. En aproximadamente el 4,5 % de los casos la carga de las coordenadas en la base de datos se ha hecho manualmente a partir de otros diccionarios geográficos, al tratase de localizaciones inexistentes en GeoNames.

Finalmente, la fuente de datos .xml se ha utilizado para extraer datos relacionados con las personas asociadas a cada comando (entidad *Persona* en la Figura 2).

Para la tarea de categorizar las acciones (atributo tipo, entidad *Accion* en la Figura 2) se ha considerado una clasificación de acciones como: *arma* (acciones que implicaban el uso de armas de fuego), *explosión* (acciones relacionadas con el uso de artefactos explosivos) y *logística*; clasificación sugerida por la GC. Para determinar el tipo de cada acción se ha utilizado su descripción textual en su forma canónica y comprobado la existencia de determinadas palabras clave.

2.3. Consultas

Sobre la base de datos diseñada y poblada con datos se han ejecutado diferentes consultas en lenguaje SQL para elaborar dos tipos de informes: uno relacionado con las acciones registradas (*acciones.csv* en la Figura 1) y otro relacionado con los comandos que los hayan perpetrado (*comandos.csv*).

Concretamente, el informe *acciones.csv* recoge información sobre: tipo de acción, fecha de acción, día de la semana, mes, número de personas involucradas, número de hombres involucrados, número de mujeres involucradas, media de edad de las personas involucradas, edad de la persona mayor, edad de la persona menor, nombre lugar asociado, latitud, longitud, latitud y longitud del baricentro de las acciones del comando responsable, distancia del lugar de la acción hasta el baricentro del comando responsable, años desde la realización de la acción hasta la desarticulación del comando responsable.

Por otra parte, el informe *comandos.csv* recoge información relacionada con cada comando sobre: fecha de desarticulación, número de integrantes, número de integrantes hombres, número de integrantes mujeres, media de edad de los integrantes, edad de la persona mayor, edad de la persona menor, número de acciones perpetradas, número de acciones por tipo (arma, explosión, logística), años desde la primera hasta la última acción, años desde la primera acción hasta desarticulación, baricentro de sus acciones (latitud y longitud), dispersión de sus acciones.

2.4. Análisis

A partir de los informes elaborados en el paso anterior, se procede a analizar la información recogida en los mismos. Para llevar a cabo ese análisis se utilizan distintos programas informáticos, como Excel [6], R [9] o SPSS[5], según el tipo de análisis que se pretenda realizar. Esencialmente, los datos obtenidos se pueden analizan bajo dos puntos de vista diferentes, aunque complementarios, en función de dónde se centre el interés de la investigación:

1. Análisis centrado en los comandos. Este tipo de análisis está orientado hacia la caracterización, en cierto modo, de los comandos estudiados. En particular, se puede tratar de identificar cuáles de las variables seleccionadas permiten explicar una mayor proporción de la variabilidad entre los comandos, se pueden buscar posibles clasificaciones de los comandos estudiados bajo diferentes criterios, etc.

2. Análisis centrado en las acciones. En este caso se consideran las acciones globalmente, sin tener en cuenta qué comando las llevó a cabo. En este contexto podemos estar interesados en aspectos

tales como la relación entre el tipo de acción y la edad de quienes la cometieron, la evolución en el tiempo del tipo de acciones realizadas, etc.

3. Algunos resultados

3.1. Análisis de los comandos en función de las acciones cometidas

Como ya se ha mencionado, las acciones cometidas por los comandos analizados se clasificaron en tres tipos: acciones que implicaban el disparo de armas de fuego (arma), acciones relacionadas con el uso de artefactos explosivos (explosión) y acciones de tipo logístico (logística). Tras el procesado de los datos, se obtuvieron 33 comandos que habían realizado alguna acción. De ellos, únicamente 3 cometieron acciones de tipo logístico (en uno de los casos éstas eran sus únicas acciones, de hecho) y sólo 12 cometieron acciones relacionadas con armas de fuego. Sin embargo, todos excepto 3 cometieron acciones utilizando artefactos explosivos.

Mediante un análisis de componentes principales (ACP) se identificaron dos variables que permiten explicar el 80 % de la variabilidad observada en este contexto (ver Figura 3).

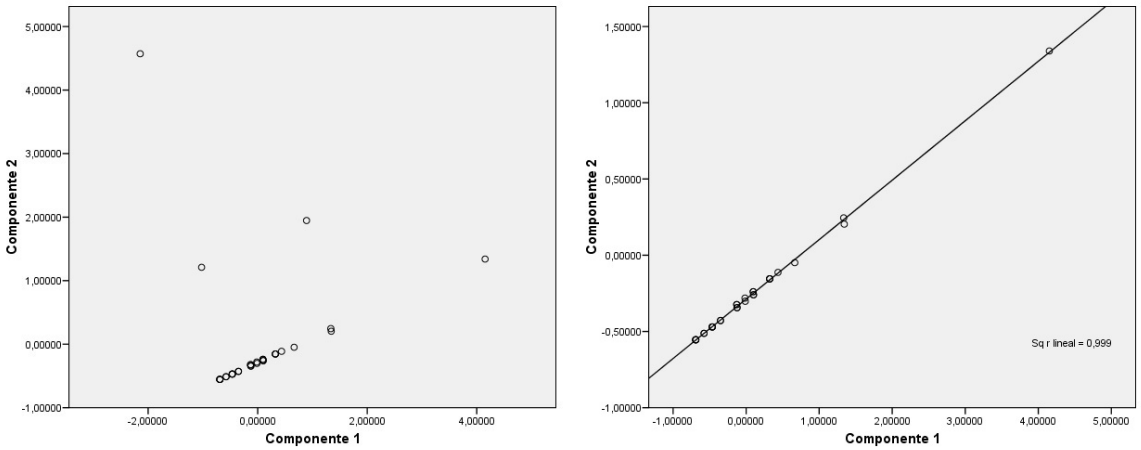
Figura 3. Pesos de las variables originales y variabilidad explicada por las C.P.

	Componente	
	1	2
numaccionesexplosion	,808	,201
numaccionesarma	,806	,218
numaccioneslogistica	-,363	,932

Componente	Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado
1	1,434	47,791	47,791
2	,956	31,874	79,665

Como se puede observar, la primera de las componentes está relacionada esencialmente con el número de acciones no logísticas, cuya aportación es la principal en la segunda componente. Si se calculan los valores de estas dos nuevas variables para los 33 comandos analizados, se obtiene un diagrama de dispersión como el mostrado en la Figura 4 (izquierda).

Figura 4. Dispersión de los valores de las C.P. (izda.) y regresión lineal sin atípicos (dcha.)

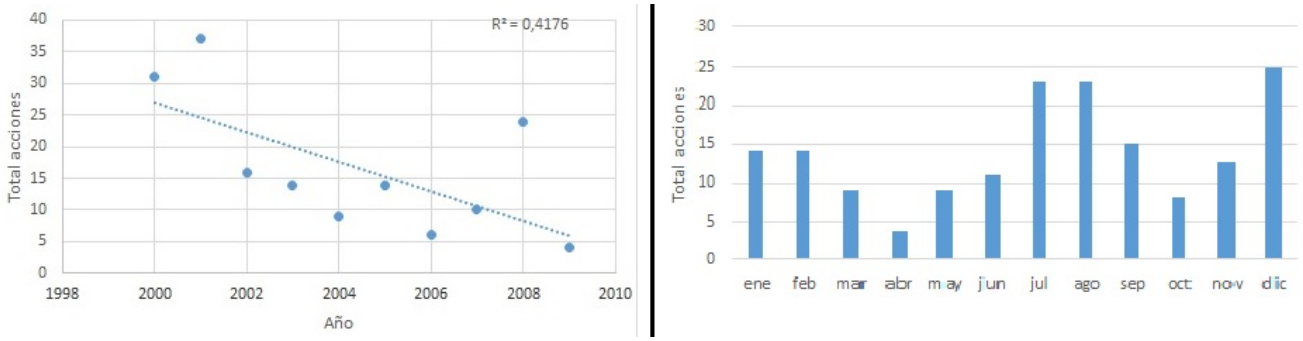


La parte izquierda de la figura parece indicar la existencia de 4 valores atípicos. Sin embargo, como se observa en la parte derecha, sólo 3 de ellos lo son realmente. Estos 3 comandos son, como cabía esperar aquellos que han llevado a cabo acciones de tipo logístico. Los otros 30 valores se ajustan de forma casi perfecta a una recta.

3.2. Análisis temporal de las acciones

De las 180 acciones que conforman la base de datos sólo se dispone de la fecha exacta de 170. Además, dada la escasez de acciones logísticas, estas no se han tenido en cuenta para el análisis. Las acciones estudiadas correspoden al periodo 1998-2009. Sin embargo, ya que para los años 1998 y 1999 no hay datos significativos, limitamos el estudio al periodo 2000-2009. En la Figura 5 (izquierda) se muestra el número de acciones realizadas en cada uno de los años del periodo de tiempo estudiado. No se aprecia ninguna evolución temporal más allá de una cierta tendencia a la baja en el número de acciones realizadas, aunque con un reducido coeficiente de determinación.

Figura 5. Número total de acciones realizadas en cada año (izda.) y por meses (dcha.)



Por otro lado, puede resultar de interés estudiar la época del año en que se realizan las acciones. En la Figura 5 (derecha) se recoge el número de acciones para cada mes del año. Es interesante señalar que se aprecian picos de actividad en los meses de julio, agosto y diciembre, que coinciden con periodos vacacionales.

4. Conclusiones

En este trabajo hemos presentado el enfoque sistemático que hemos utilizado para la integración y análisis de datos heterogéneos relacionados con los comandos legales de la banda terrorista ETA desarticulados entre los años 2000 y 2011.

Los diferentes tipos de análisis a realizar requieren de datos estructurados almacenados en una base de datos relacional, obtenidos a partir de preprocesado de los datos fuente (texto). Las herramientas de procesamiento de lenguaje natural han resultado útiles en esta tarea, pero han tenido que ser adaptadas al contexto mediante el uso de diferentes heurísticas y han necesitado del apoyo en diccionarios geográficos (en la tarea de geo-referenciar acciones terroristas). Aún así, una pequeña parte del preprocesado se ha tenido que realizar de manera manual. Queda pendiente abordar el etiquetado de otro tipo de entidades presentes en el texto (personas, organizaciones).

Los sencillos análisis presentados en la Sección 3 son muy limitados, pero permiten ilustrar la utilidad del enfoque abordado. Quedaría pendiente la interpretación de los resultados obtenidos, buscando un posible significado concreto de las nuevas variables identificadas mediante el ACP o comprobando si los picos de actividad en periodos vacacionales son realmente significativos. Para esta interpretación se haría necesaria la intervención de expertos en terrorismo y en ETA. Como trabajo en fase de realización queda un análisis exhaustivo de los datos que tenga en consideración aspectos tales como las edades de los integrantes, la dispersión de las acciones o una clasificación más refinada de las mismas que también considere aspectos como el tipo de objetivo al que se dirige. Estos análisis más detallados requerirán del uso de otras técnicas de análisis, como las reseñadas en [10].

En cualquier caso, aunque los resultados obtenidos puedan no ser extrapolables a otros grupos terroristas, pensamos que este estudio puede poner en valor el interés y la aplicabilidad del método utilizado en la lucha antiterrorista.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza a través del proyecto CUD 2013-02. Así mismo, la Jefatura del Servicio de Información de la Guardia Civil ha facilitado todos los datos a estudio, colaborando activamente en el proyecto.

Referencias

1. Chen, H.; Reid, E.; Sinai, J.; Silke, A.; Ganor, B. Terrorism informatics: Knowledge management and data mining for homeland security, En Springer; **2008**, vol. 18.
2. Chenoweth, E.; Lowham, E. On Classifying Terrorism: A Potential Contribution of Cluster Analysis for Academics and Policy-makers. *Defense & Security Analysis* **2007**, *23(4)*, pp.345-357.
3. Gaibulloev, K.; Sandler, T.; Sul, D. Common drivers of Transnational Terrorism: Principal Component Analysis. *Economic Inquiry* **2013**, *51(1)*, pp. 707-721.
4. Goodchild, M. F.; Hill, L. L. Introduction to digital gazetteer research. En *International Journal of Geographical Information Science* **2008**; *22(10)*, pp. 1039-1044.
5. IBM. SPSS software, http://www-01.ibm.com/software/analytics/spss
6. Microsoft. Excel, http://office.microsoft.com/en-us/excel
7. Padró, L.; Stanilovsky, E. FreeLing 3.0: Towards wider multilinguality. En *Proceedings of the Language Resources and Evaluation Conference (LREC 2012), ELRA*; Istanbul, Turkey, **2012**.
8. PostGreSQL, http://www.postgresql.org/
9. The R project for statistical computing, https://www.r-project.org/
10. Velasco, M.P.; Bernardi, S.; Dranca, L.; López, P.A.; Oller, A.M.; Sánchez, A.; Umpiérrez, F.J.; Vigara, R. Estudio de aplicabilidad de técnicas de minería de datos para el apoyo a la toma de decisiones en la lucha antiterrorista. En: Dena, A. *et al.* Actas: DESEi+d 2014. Ed. CUD **2014**, 157-164.
11. Visual Paradigm, http://www.visual-paradigm.com/
12. Wick, M. GeoNames, http://www.geonames.org/.

Automatización del sistema de comunicación visual por morse de la Armada

Carreño Felices, Rafael Francisco [1] y Asorey Cacheda, Rafael [2,*]

[1] Centro Universitario de la Defensa Marín, Escuela Naval Militar de Marín, Plaza de España, s/n, 36920 – Marín (Pontevedra). E-mail: rcarfel@fn.mde.es

[2] Centro Universitario de la Defensa Marín, Escuela Naval Militar de Marín, Plaza de España, s/n, 36920 – Marín (Pontevedra). E-mail: rasorey@cud.uvigo.es

***** Responsable del trabajo; E-mail: rasorey@cud.uvigo.es;

Abstract: En lo que a las comunicaciones inalámbricas se refiere, solo los sistemas de comunicación por radio han experimentado mejoras desde la aparición de la telegrafía eléctrica sin hilos. Los sistemas de comunicación visual de la Armada emplean los mismos procedimientos de hace más de cien años. En este artículo se explica el desarrollo de dos prototipos y un código en lenguaje C++ que permiten establecer comunicaciones bidireccionales por morse mediante destellos de luz tanto en tierra como entre buques navegando. Los resultados obtenidos muestran la posibilidad de dotar con estos equipos capaces de automatizar las comunicaciones por Scott a las unidades de la Armada española.

Keywords: Sistema de comunicación; código morse; automatización; sistemas Scott

1. Introducción

La doctrina de la Armada española reconoce la importancia de las comunicaciones visuales, así como todas las ventajas que ofrecen respecto a las comunicaciones por radio (comunicaciones más seguras, discretas, fiables y ofrecen un ancho de banda inmensamente mayor). Sin embargo, los sistemas de comunicación visual no han experimentado ninguna mejora desde hace más de un siglo (a diferencia de la comunicación por radio) [1].

Con este artículo, no se pretende que se retome el uso de las comunicaciones visuales entre buques, sino que lo que se persigue, es adaptarlas a la tecnología de la que ahora sí se dispone. El desarrollo de sistemas automatizados de comunicación por Scott [2] podría permitir, de forma viable, establecer

comunicaciones más seguras, discretas y fiables entre buques dentro del mismo horizonte visible. A mayores, si en lugar del sistema morse se emplease el lenguaje binario, estas comunicaciones podrían llegar a ofrecer un ancho de banda inmensamente superior a los que se consiguen a día de hoy con los sistemas de comunicación por radio.

Las limitaciones que presentan estos sistemas son la necesidad de disponer de una plataforma que enfoque y apunte el equipo hacia el de la otra unidad, el alcance de los emisores de luz y la intensidad lumínica del entorno. Sin embargo, tras el trabajo realizado y en base a los resultados obtenidos, se demuestra que pese a las limitaciones mencionadas, estos sistemas funcionan y se pueden usar entre buques de la Armada.

El resto de este trabajo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 presenta la parte experimental, la sección 3 muestra los resultados obtenidos y, finalmente, en la sección 4 se resumen las principales conclusiones.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

Ante el reto de crear un sistema automatizado de comunicación bidireccional por morse mediante destellos de luz visible, se plantean dos líneas de trabajo paralelas. Por un lado, se desarrolla un código en lenguaje C++ sobre el software que nos proporciona la plataforma de Arduino, y por otro lado, se construyen dos prototipos capaces de superar las pruebas propuestas entre las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar (E.N.M.) y entre los cuarteles de alumnos Almirante Francisco Moreno y Marqués de la Victoria de la E.N.M.

2.1. Desarrollo del código en lenguaje C++:

Aprovechando el software gratuito que nos proporciona la plataforma de Arduino [3], se desarrolla el código en lenguaje C++ que nos permite trabajar con los prototipos. Para ello se subdivide a su vez en cuatro modos de trabajo:

- Modo graduar: se realiza una graduación inicial del umbral de detección del fotorresistor respecto la intensidad lumínica del entorno. Esta graduación inicial se ejecuta automáticamente al comenzar a trabajar con el prototipo y se puede realizar tantas veces como se desee.

  A mayores, permite encender el emisor láser o foco halógeno del prototipo hasta que se ordene salir de este modo de trabajo (necesario para enfocar los láseres entre los dos prototipos, útil para marcar la posición del prototipo, etc.).
- Modo recibir: en este modo se debe seleccionar la velocidad a la que se realizará la transmisión, así como el tipo de emisor del que recibiremos los destellos de luz (láser o foco halógeno). Seleccionados estos dos parámetros, el prototipo queda a la espera del primer destello de luz de la transmisión (que utilizará para reestablecer el umbral de detección que utilizará durante toda la recepción) o hasta que ordenemos salir de este modo de trabajo. Conforme se van recibiendo los destellos de luz, el código imprime de manera automática los caracteres a los que corresponden (si no corresponden a ningún carácter conocido, el código lo indica permitiendo visualizar lo que se ha recibido, según sea un destello demasiado largo

o corto, un periodo sin luz demasiado largo o corto, o una secuencia de destellos largos y cortos desconocida).

- Modo escribir: se trata de un pequeño y rudimentario procesador de texto. Desde aquí podemos escribir directamente (sin necesidad de traducir a morse), el texto que deseamos transmitir (existe una limitación de 320 caracteres aunque la memoria de la placa de Arduino nos permitiría aumentar esta limitación si se modifica el propio código elaborado). A mayores, se puede corregir el texto mientras lo escribimos.
  Al pulsar la tecla "ENTER", el texto se guarda y se abandona este modo de trabajo, permitiendo transmitirlo si se selecciona el modo transmitir.
- Modo transmitir: nos permite transmitir el texto guardado previamente. Para ello permite elegir entre cuatro velocidades de transmisión distintas (Humana, Normal, Automática y Ultra-rápida) y entre transmitir con un láser o un foco halógeno.

Conforme se aumenta la velocidad de transmisión se observa que surgen retardos en el procesamiento de los destellos. Ante esto se realizó un estudio del comportamiento del fotorresistor ante destellos tanto del láser como del foco halógeno.

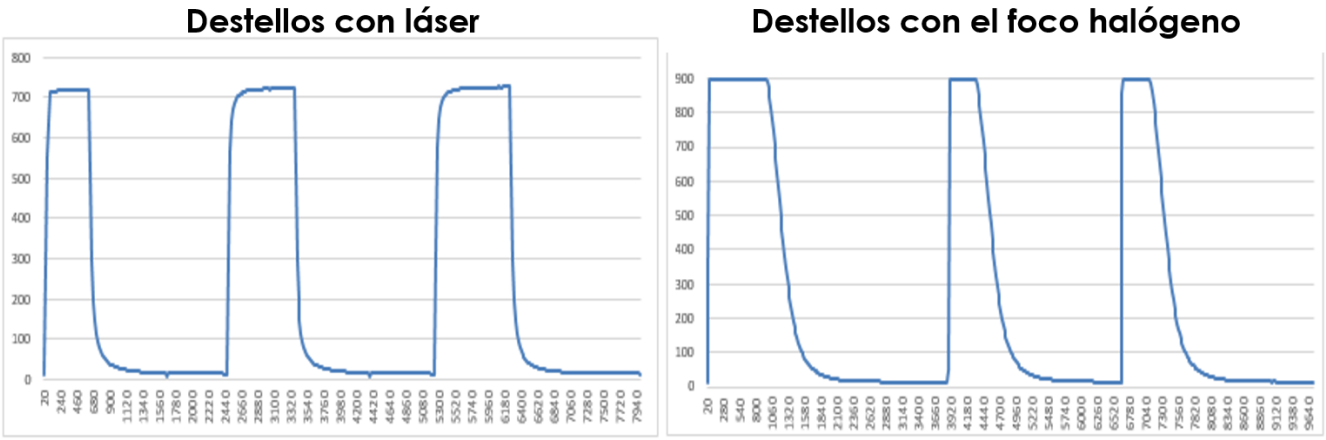


Figura 1. Gráficas sobre el comportamiento del fotorresistor.

Tras este estudio se deduce que los elementos físicos de los prototipos producen determinados retardos que obligan a introducir distintas graduaciones sobre el código.

Los relés provocan un retardo por activación y desactivación de los mismos, y los fotorresistores no reaccionan de manera totalmente instantánea a los destellos (o el cese de los mismos). A mayores, las bombillas halógenas de los focos mantienen cierta remanencia de luz al apagarse, lo que provoca retardos muy acusados que obligan a graduar el umbral de detección respecto a la máxima intensidad lumínica recibida de los destellos (en lugar de la existente en el entorno).

Para trabajar con los prototipos se utiliza un programa de comunicación serie que permite visualizar el texto que escribimos o recibimos, y a qué nivel del código se encuentra el operador. El diagrama que se muestra en la figura 2 refleja la estructura de todo el código creado.

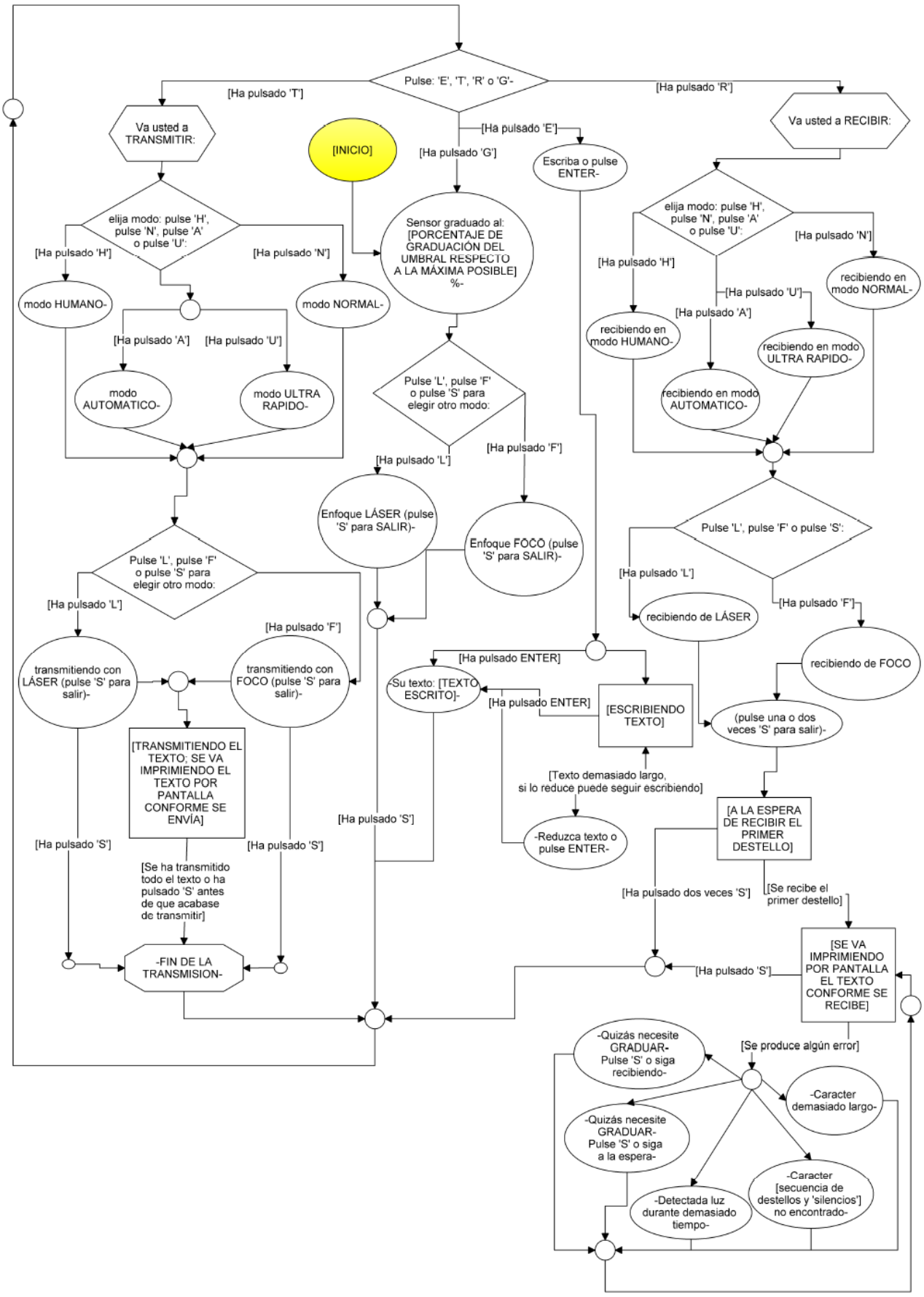


Figura 2. Diagrama del código elaborado.

2.2. Construcción de los dos prototipos:

Dado el tiempo y los recursos limitados de los que se dispone durante el desarrollo del proyecto, los prototipos se fabrican en base a tres requisitos principales; deben ser sencillos, económicos, impermeables y robustos. De cara a la prueba de los prototipos entre las lanchas de instrucción navegando, se requiere que los prototipos sean capaces de soportar las condiciones de trabajo que se puedan dar en la mar: lluvia, viento, movimientos de balance y cabezada, golpes, etc.



Figura 3. Uno de los prototipos abierto

Tabla 1. Elementos de cada prototipo-Precio

MATERIAL	**PRECIO (**aprox.)
Placa de Arduino Uno	20€
Shield TINKERKIT	10€
Cables para el shield (3)	2€
Cables para el LED	1€
Fotorresistor de tres pines	5€
Caja para Arduino	10€
Relés (2: 1 para el láser y 1 para el foco)	10€
Caja de plástico (aproximadamente 34x21,5x13)	4€
Tuvo de PVC de 50 cm (diámetro interior 6.8cm y diámetro exterior 7.5cm)	2€
Lupa + tuvo de cartón (de papel higiénico + alambre para fijación)	4€
Láser de tres pilas de botón (4,5V) + interruptor con cable	30€
Alargadera para el foco + acople para el relé	5€
Foco halógeno de 220V (400W) + cable con enchufe macho	12€
LED-chivato	0,20€
Cinta aislante negra	1,80€
TOTAL	117€

2.3. Pruebas entre cuarteles de alumnos y Lanchas de Instrucción:

Desarrollado el código y construidos los prototipos, se pasó a la fase de pruebas de los prototipos.

En primer lugar, se realiza una prueba entre cuarteles de alumnos a unos 50 metros de distancia. Se transmite y recibe con éxito con las cuatro velocidades de transmisión.

El empleo de luz láser con los prototipos permite establecer comunicaciones seguras, discretas y fiables, limitadas por el alcance de los mismos (también la visibilidad) y por la necesidad de una plataforma que los estabilice y los enfoque.

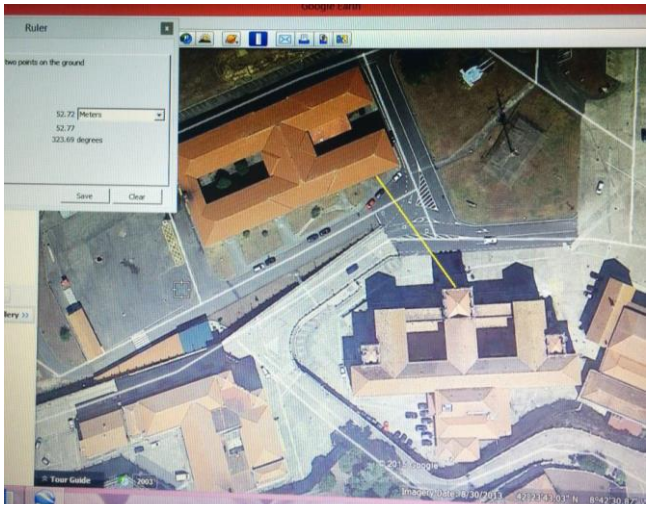


Figura 4. Imagen aérea de los cuarteles de alumnos

En segundo lugar, se consigue establecer una comunicación entre dos lanchas de instrucción navegando separadas a unos 40 metros. En este caso se emplean los focos halógenos eliminándose así la necesidad de un enfoque preciso entre prototipos, a cambio de estar obligados a transmitir empleando mucha más potencia, y disminuyendo la discreción y seguridad de estas comunicaciones.

Durante esta prueba se aprecia que las lanchas de instrucción varían continuamente tanto la distancia entre ellas, como sus posiciones relativas respecto al Sol, obligando a graduar periódicamente el umbral de detección del fotorresistor; dejando patente de este modo la necesidad de que este umbral de detección no deba graduarse solo respecto a la intensidad lumínica máxima del primer destello recibido, sino que debe reajustarse continuamente incluso a lo largo de cada transmisión.



Figura 5. Imagen de una de las transmisiones durante la prueba entre lanchas de instrucción

3. Resultados y Discusión

A la vista de los resultados obtenidos en las dos pruebas mencionadas, consideramos que queda patente que este sistema automatizado de comunicación visual funciona y podría llegar implantarse entre unidades de la Armada.

Tras la prueba entre las lanchas de instrucción, resulta obvio que el empleo de este tipo de comunicaciones entre elementos móviles, como buques navegando, obliga a que la graduación del umbral de detección de los fotorresistores empleados sea periódica (incluso a lo largo de las transmisiones) y con respecto a la intensidad lumínica máxima de los destellos de luz que se reciben (en lugar de respecto a la intensidad lumínica existente en el entorno).

Respecto a los sistemas de comunicación por radio, estos sistemas de comunicación visual permiten comunicaciones más seguras, discretas y fiables; si bien, se ven limitadas por la visibilidad existente, así como en este caso, por el alcance de los emisores de luz utilizados.

Las transmisiones con luz láser, en lugar de con los focos halógenos, permiten transmisiones mucho más seguras y discretas; si bien, requieren de una plataforma que estabilice y apunte ambos prototipos.

A mayores, el empleo de otras franjas del espectro electromagnético, como la luz infrarroja, podría aumentar la seguridad y discreción de este tipo de comunicaciones. El motivo por el que se trabajó con luz visible no fue más que por comodidad y sencillez a la hora de trabajar con los prototipos.

Por último, si se modificase el código con el que transmiten los prototipos desarrollados, pasando de utilizar el código morse a realizar transmisiones en binario, se podrían llegar a establecer comunicaciones con un ancho de banda varios órdenes de magnitud superior al que permiten actualmente los sistemas utilizados.

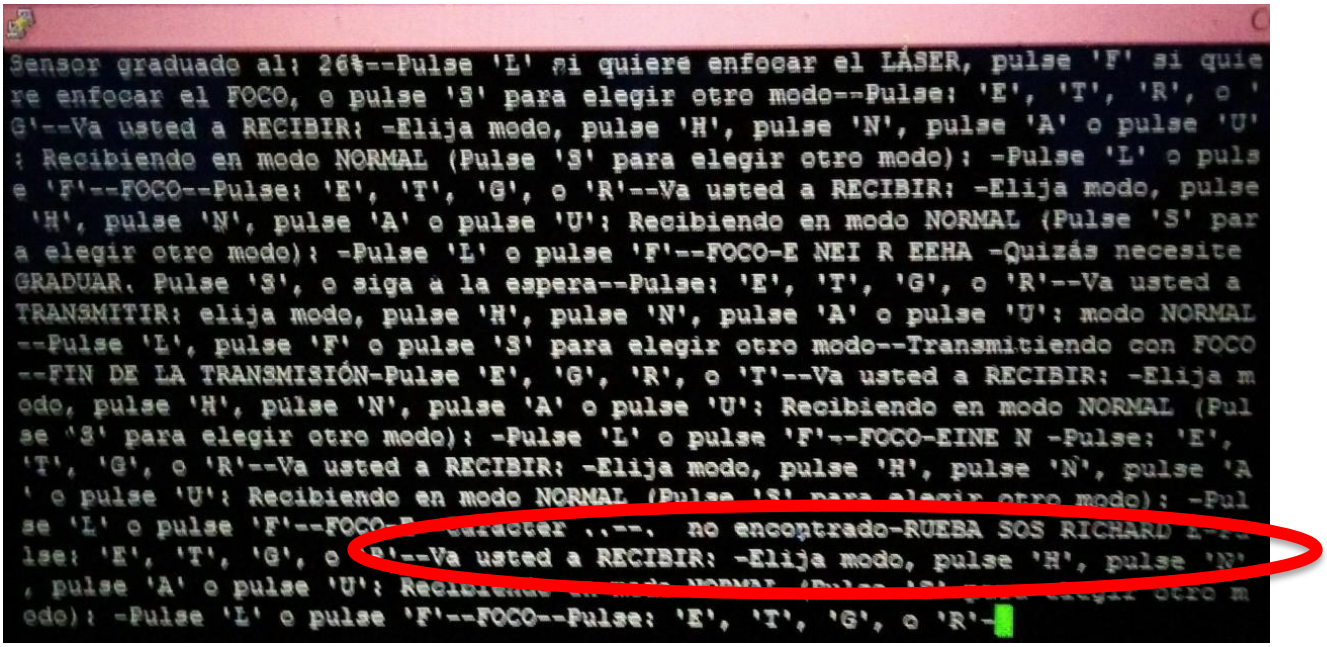


Figura 6. Captura de pantalla en la que se señala la frase que se consiguió transmitir y recibir entre dos lanchas de instrucción navegando (se aprecia un error al recibir la letra "P" y como el código advierte de este error en la recepción).

4. Conclusiones

Este tipo de comunicaciones presentan limitaciones respecto a las comunicaciones por radio como la visibilidad o la necesidad de una plataforma que estabilice y enfoque los prototipos. Como resultado, la máxima distancia a la que se ha conseguido transmitir y recibir con los prototipos ha sido de unos 52 metros. Respecto a las comunicaciones láser, solo se han conseguido establecer comunicaciones en las pruebas en tierra. Se podrían haber conseguido mayores distancias con láseres y focos de mayor potencia. Para implementar sistemas láser en el mar sería necesario incluir sistemas de estabilización que no están presentes en este prototipo. Además, no podemos olvidarnos de todas las ventajas que estos sistemas presentan respecto a las comunicaciones por radio al permitirnos establecer comunicaciones más seguras, discretas y fiables.

En definitiva, podemos afirmar que los prototipos fabricados funcionan y que el campo de mejora sobre ellos es muy amplio. Si se desconoce el alcance o la utilidad que pueden llegar a tener estos sistemas, es precisamente por el hecho de que aún no han sido desarrollados.

5. Agradecimientos

Me gustaría aprovechar para mencionar la ayuda y el apoyo recibido de tanto compañeros como profesores civiles del Centro Universitario de la Defensa y militares de la Escuela Naval Militar, en especial: A mi compañero de camareta, Don Richard J. Pereira Santos, por sacrificar voluntariamente una de las pocas tardes libres de las que hemos dispuesto en este curso, para ayudarme en la realización de la prueba entre Lanchas de Instrucción. Sin su ayuda no me cabe la menor duda de que no habría conseguido realizar una transmisión-recepción entre lanchas con éxito. A mi compañero, Don José María González Baena, por sacrificar voluntariamente horas de sueño (muy escasas siempre) para ayudarme en la prueba con los prototipos entre cuarteles de alumnos. Sin su ayuda no habría podido realizar esta prueba. Al taller eléctrico y al Jefe de adiestramiento a flote de la Escuela Naval Militar, por facilitarme material para fabricar los prototipos y por permitirme salir a navegar en las Lanchas de Instrucción para probar los prototipos. Y en general a todos los que directa o indirectamente me han ayudado a lo largo del desarrollo de este proyecto. A todos, os estoy sinceramente agradecido.

Referencias

1. Carreño Felices, R. F. (2015). Automatización del sistema de comunicación visual por morse de la Armada (Trabajo Fin de Grado, Centro Universitario de la Defensa, ENM).
2. FAA Aeronautical Information Manual, section 4-3-13. Traffic Control Light Signals.
3. “Arduino” [En línea]. Available: http://arduino.cc/en/Main/Software. [Último acceso: 05 MAR 2015].
4. Rani, J., Chauhan, P., & Tripathi, R. (2012). Li-Fi (Light Fidelity)-The future technology In Wireless communication. Int. J. of Applied Engineering Research, 7(11).

Sesión II-B

Adquisición de Información y Procesado

Escáner en banda milimétrica para monitorización de flujos de personas

Álvarez López, Yuri [1,*], González Valdés, Borja[2], Rodríguez Vaqueiro, Yolanda [2], Las-Heras Andrés, Fernando [1], García Pino, Antonio [2]

[1] Área de Teoría de la señal y Comunicaciones – Universidad de Oviedo. Emails: alvarezyuri@uniovi.es, flasheras@uniovi.es

[2] AtlanTic Research Center – Universidade de Vigo. Emails: bgvaldes@com.uvigo.es, yrvaqueiro@com.uvigo.es, agpino@com.uvigo.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: alvarezyuri@uniovi.es

---

Resumen: En esta comunicación se presenta una nueva arquitectura para escáneres de seguridad en banda milimétrica capaz de realizar el escaneo de una persona en tiempo real proporcionando una imagen de alta resolución. La principal innovación es que el sistema aprovecha el movimiento de la persona al atravesar el escáner para iluminarla desde diferentes ángulos, combinado con una configuración radar multiestática. De esta forma, se logra que todas las partes del cuerpo queden iluminadas. Gracias a ello, el campo dispersado contiene la suficiente información como para poder reconstruir toda la superficie del cuerpo humano. En la comunicación se muestran ejemplos en dos dimensiones para ilustrar el funcionamiento de la arquitectura radar propuesta, junto con resultados de simulaciones en tres dimensiones con modelos de cuerpo humano para verificar la capacidad para escanear a una persona portando objetos ocultos.

Palabras clave: Radar; Escaneo de personas; Escáner en banda milimétrica; Imagen radar; Escáneres de aeropuertos.

---

1. Introducción

Dentro del ámbito de Seguridad y Defensa, uno de las líneas clave en las que diferentes organismos internacionales están promoviendo la investigación es en el campo de los escáneres de seguridad para inspección no invasiva de personas y objetos. En particular, la Organización Internacional de

Transporte Aéreo (IATA en sus siglas en inglés) ha definido recientemente diferentes estándares para mejorar las prestaciones de los escáneres de seguridad en aeropuertos [1]. En ellos se especifica que las personas deberán poder ser escaneadas sin necesidad de permanecer estáticas, como sucede en los sistemas actuales.

En este sentido, los escáneres de ondas milimétricas permiten ofrecer una solución a dicha demanda tecnológica, debido a su buen compromiso entre resolución de la imagen obtenida, capacidad de penetración a través de tejidos, uso de radiación no ionizante, y coste relativamente bajo de la tecnología empleada. Ejemplos de escáneres de ondas milimétricas similares a los empleados en controles de aeropuertos se pueden encontrar en los siguientes trabajos [2-5].

Sin embargo, con la configuración actual, los escáneres de ondas milimétricas presentan la limitación de requerir que la persona se detenga para ser escaneada. Ello se debe a la arquitectura monoestática [3,4] o cuasi-monoestática [2] de los mismos, que limita la superficie de la persona iluminada por el objeto. Además, con el fin de lograr una iluminación completa del cuerpo, los escáneres requieren un elevado número de elementos transmisores/receptores, o bien el empleo de partes móviles, que ralentiza el proceso de escaneo y, por tanto, la capacidad del punto de control.

En esta contribución se describe una nueva arquitectura de escáner de ondas milimétricas que permite solventar las limitaciones anteriormente mencionadas. Con tal fin, el diseño se basa en una configuración multiestática [6,7], con el fin de lograr iluminar toda la superficie de la persona:

i) Los transmisores y receptores están en posiciones diferentes, de forma que se explota tanto la incidencia normal como la oblicua sobre la superficie de la persona.

ii) Se emplazan dos paneles de receptores a ambos lados del pasillo por el cual se mueve la persona. A diferencia de otros sistemas, estos elementos están conectados entre sí, de forma que se aprovecha la información recibida en sendos paneles.

iii) Se explota el movimiento de la persona mientras atraviesa el escáner para incrementar el número de incidencias y reflexiones.

La presente comunicación se estructura de la siguiente forma: la Sección 2 describe el fundamento teórico del radar multiestático, ilustrándolo con un ejemplo en 2 dimensiones. La arquitectura del escáner propuesto se presenta en la Sección 3, mostrando los resultados de una simulación numérica.

2. Iluminación multiestática

Como se ha indicado, el escáner propuesto está basado en una arquitectura multiestática, donde se consigue iluminar prácticamente toda la superficie de la persona mientras atraviesa el escáner [8,9]. Para ello se aprovecha que, al moverse, el área de la persona vista por un transmisor va a ser diferente. Esta idea se representa en la Figura 1: se observa cómo las zonas iluminadas no sólo dependen del transmisor activo, sino de la posición en la que se encuentre la persona en el escáner.

El campo reflejado por la persona que está siendo escaneada se recibe en dos *arrays* de receptores situados a ambos lados del pasillo. Para cada transmisor, se recibe una imagen de una cierta zona del cuerpo. Con el fin de realizar una adquisición rápida donde se pueda considerar que la posición de la persona apenas varía al conmutar de un transmisor a otro, se ha decidido mantener bajo el número de transmisores, a costa de incrementar el número de receptores. De este modo, un sistema con barrido electrónico similar al propuesto en [2] sería factible.

Para la generación de las imágenes se aplica un algoritmo de *backpropagation* del campo dispersado basado en la Transformada de Fourier [10]. Dicho algoritmo permite obtener imágenes en tiempo real, ya que la técnica clásica de *backpropagation* [11] conlleva un coste computacional elevado dado el tamaño eléctrico del problema a resolver. A modo de ejemplo, considerando una longitud de onda de 1 cm (banda de 30 GHz), el número de medidas típico puede ascender a 10^5, mientras que el número de *voxels* donde se reconstruye la imagen en 3 dimensiones es del orden de 10^7.

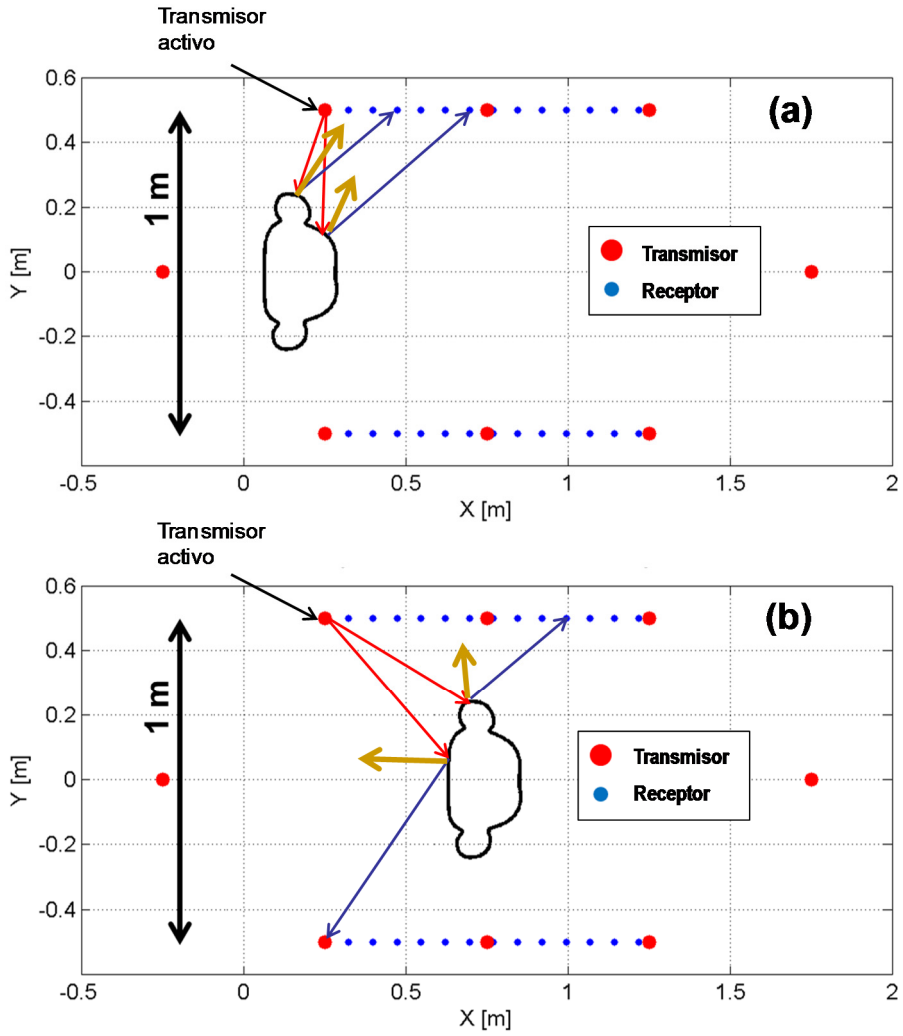


Figura 1. Concepto de incremento de la información empleando diversidad espacial (sistema multiestático). Las gráficas (a) y (b) representan el campo dispersado por la persona en dos posiciones diferentes para un mismo transmisor activo. Las flechas rojas indican el rayo incidente, y las azules, el rayo reflejado bajo el modelo más sencillo de reflexión especular, donde la flecha marrón representa la normal a la superficie.

Con el fin de validar el principio del funcionamiento del escáner descrito, se presentan los resultados para un ejemplo en 2 dimensiones. La banda de trabajo comprende de 23 a 28 GHz, de forma que se tienen 3 cm de resolución en rango. La ubicación de los elementos transmisores y

receptores se muestra en la Figura 2. El campo dispersado se ha calculado empleando un software de Método de los Momentos [12].

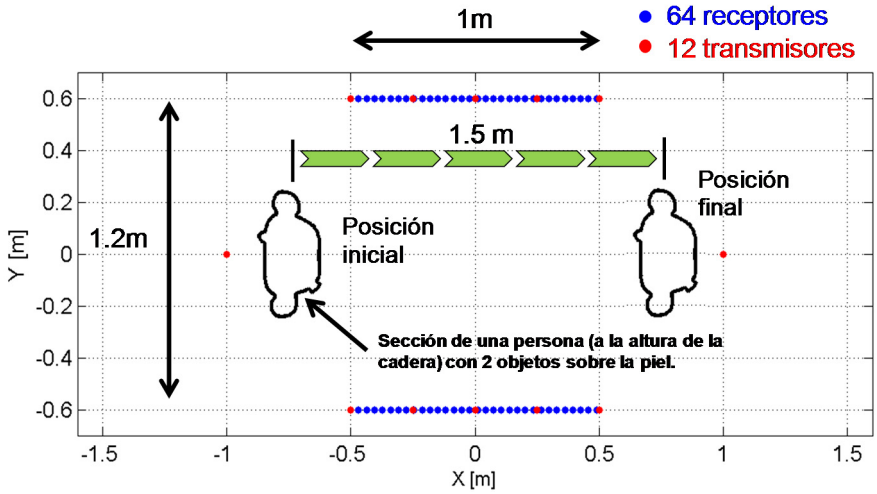


Figura 2. Ejemplo de pasillo en 2 dimensiones. La persona se mueve desde la posición x = -0.75 m a x = +0.75 m, en pasos de 37.5 cm. Se han considerado 5 transmisores y 32 receptores por lado del pasillo, así como dos transmisores adicionales en los extremos del pasillo.

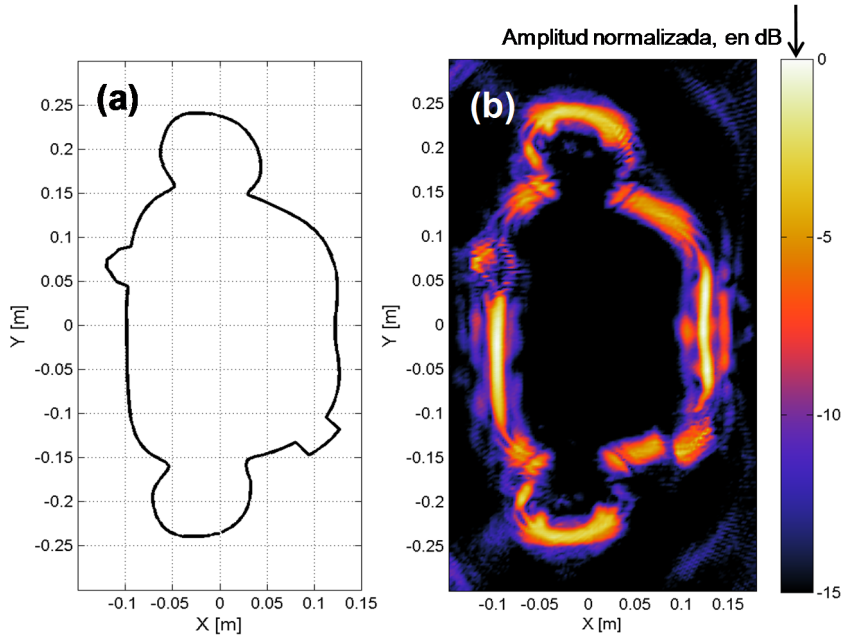


Figura 3. (a) Perfil de la persona con dos objetos. (b) Imagen reconstruida (reflectividad, en dB) combinando toda la información del campo dispersado para todos los transmisores y posiciones de la persona en el pasillo.

Para cada transmisor y posición de la persona, se obtiene una imagen de una determinada zona del contorno de la persona. Para cada posición, se combina coherentemente las 12 imágenes, una por cada

transmisor. Finalmente, se combinan en amplitud (ya que se asumen que la persona se puede mover ligeramente con respecto al eje central del pasillo al atravesar el escáner) las imágenes para cada una de las cinco posiciones, obteniéndose el resultado mostrado en la Figura 3 (b). Si se compara la imagen obtenida con el perfil original (Figura 3 (a)), se observa que prácticamente es posible reconstruir el contorno completo de la persona, así como los detalles de los dos objetos pegados a la superficie de la misma.

3. *Setup* del escáner de ondas milimétricas propuesto

Una vez verificada la capacidad del escáner para poder reconstruir todo el contorno de una persona al atravesar el pasillo, mediante un ejemplo en 2 dimensiones, la presente sección describe la extensión a un sistema real en 3 dimensiones. El *setup* diseñado, ilustrado en la Figura 4 (a) y (b), está formado por dos paneles de receptores de 2x1 m, y tres arcos de transmisores separados entre sí 1 m, albergando 20 transmisores cada uno (por sencillez, en la Figura 3 se ha omitido el arco situado en x = + 1 m). Para el tránsito de la persona a través el escáner se propone el empleo de un pasillo rodante, consiguiendo que la persona permanezca estática, lo que facilita la combinación de las imágenes. Se ha considerado un mayor ancho de banda que en el ejemplo anterior, aumentándolo de 15 a 30 GHz, para lograr suficiente resolución en rango (1 cm) y cross-rango (~1 cm). Asimismo, trabajar en esta banda de frecuencias tiene las ventajas adicionales de mantener relativamente bajas las pérdidas de propagación, y conseguir una alta penetración a través de la ropa de la persona monitorizada.

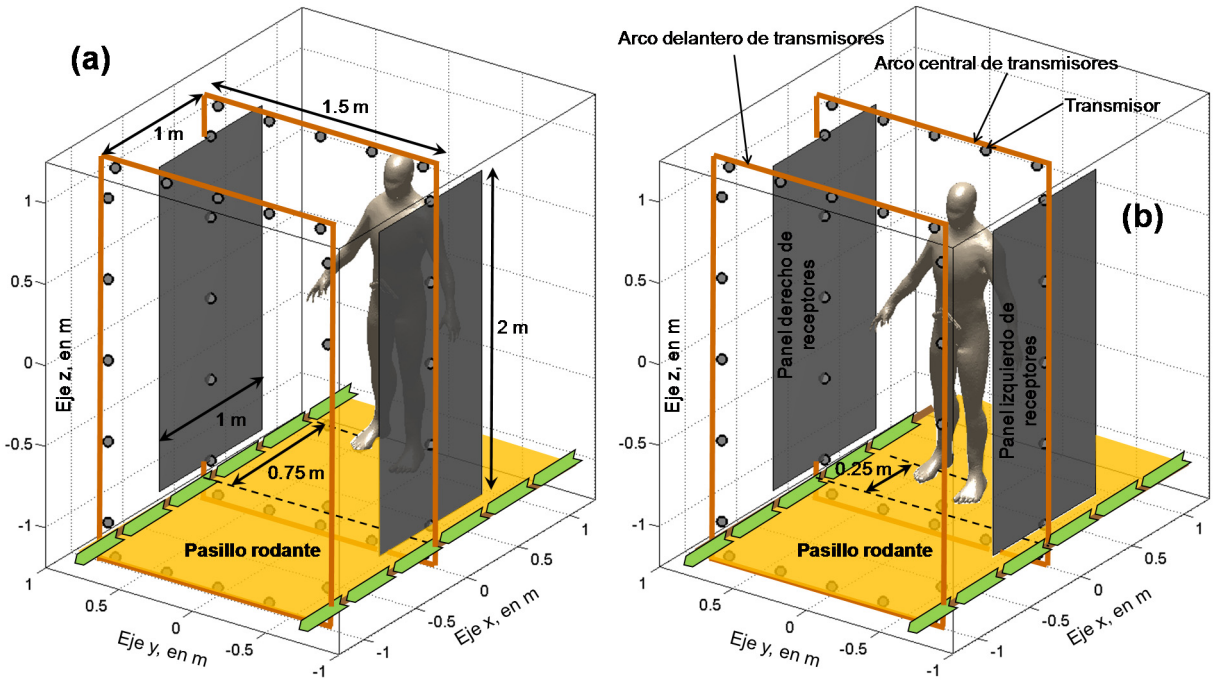


Figura 4. *Setup* del escáner de ondas milimétricas propuesto, con la persona (a) a 75 cm del centro del escáner y (b) a 25 cm del centro del escáner.

Con el fin de validar el principio del funcionamiento del escáner descrito, se presentan resultados basados en simulación electromagnética, donde se ha realizado un modelo numérico basado en Óptica Física [13] tanto del escáner como de la persona en dos posiciones diferentes. A modo de ejemplo, en

la Figura 5 (a) y (b) se muestran la imagen recuperada (reflectividad) cuando el sujeto está a 75 cm y a 25 cm del centro del escáner. Se observan diferencias en las zonas reconstruidas en una y otra imagen, especialmente en la zona del pecho, brazos y piernas. Ambas imágenes se han combinado en amplitud, mostrando el resultado en la Figura 5 (c), donde se puede apreciar que gran parte de la superficie del cuerpo humano, así como el arma que la persona lleva en la cadera, se ha reconstruido. Repitiendo el procedimiento para varias posiciones, así como considerando el arco situado en x = -75 cm, es posible reconstruir una mayor superficie del cuerpo humano y de los posibles objetos ocultos bajo la ropa.

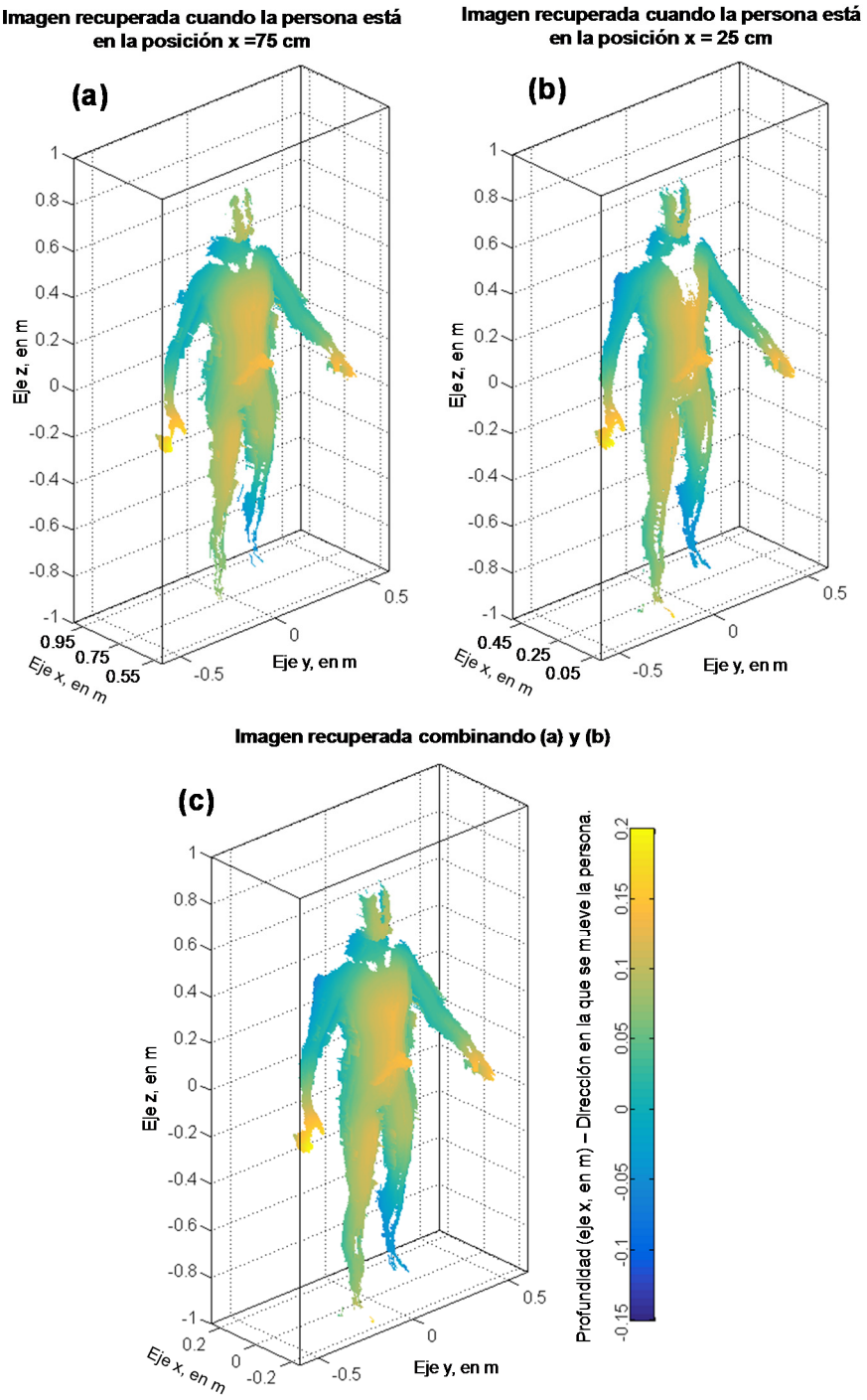


Figura 5. Imagen (reflectividad) recuperada para (a) la posición de 75 cm, (b) para la posición de 25 cm, y (c) combinando las posiciones de 25 y 75 cm.

4. Conclusiones

En esta comunicación se ha presentado una nueva arquitectura de escáner para controles de seguridad que se ajusta a las recomendaciones de la IATA. A diferencia de los escáneres actuales, la propuesta descrita permite aprovechar el movimiento de la persona al atravesar el escáner para conseguir iluminar mediante un conjunto de transmisores la mayor parte de la superficie de la persona. Asimismo, el uso de un conjunto relativamente pequeño de transmisores permite realizar una adquisición rápida del campo dispersado dado que los transmisores pueden ser activados secuencialmente de forma rápida. Los resultados presentados, tanto en 2 dimensiones, como del sistema real en 3 dimensiones, confirman las prestaciones del sistema propuesto en lo que se refiere a capacidad de *imaging* del cuerpo humano completo.

Agradecimientos

Este trabajo ha isido financiado parcialmente por el Plan Nacional de I+D+I dentro del proyecto TEC2011-28683-C02-02, Terasense CSD2008-00068 (Consolider- Ingenio 2010); por el Gobierno de España dentro del proyecto TACTICA; por la Unión Europea – Fondo de Desarrollo Regional (FEDER): por la Xunta de Galicia bajo los proyectos CN2012/279 , CN2012/260 (AtlantTIC) y el Plan I2C (2011-2015); y por el Gobierno del Principado de Asturias dentro del proyecto GRUPIN14-114.

Referencias

1. IATA, “Checkpoint of the future. Executive summary.” Available at: http://www.iata.org/whatwedo/security/Documents/cof-executivesummary.
   pdf (Latest accessed on 03.16.15.).
2. S. S. Ahmed, A. Schiessl, F. Gumbmann, M. Tiebout, S. Methfessel, and L. Schmidt, “Advanced microwave imaging,” *IEEE Microwave Magazine*, **2012**, 13, 26–43.
3. D. Sheen, D. McMakin, and T. Hall, “Three-dimensional millimeter wave imaging for concealed weapon detection,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **2001**, 49, 1581–1592.
4. D. M. Sheen, D. L. McMakin, and T. E. Hall, “Combined illumination cylindrical millimeter-wave imaging technique for concealed weapon detection,” In *AeroSense 2000. International Society for Optics and Photonics*, **2000**, 52–60.
5. B. Gonzalez-Valdes, Y. Alvarez-Lopez, J. A. Martinez-Lorenzo, F. Las Heras Andres, and C. M. Rappaport, “On the use of improved imaging techniques for the development of a multistatic three-dimensional millimeter-wave portal for personnel screening,” *Progress In Electromagnetics Research*, **2013**, 138, 83–98.
6. G. Yates, A. Horne, A. Blake, and R. Middleton, “Bistatic sar image formation,” *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, **2006**, 153, 208–213.
7. R. Burkholder, I. Gupta, and J. Johnson, “Comparison of monostatic and bistatic radar images,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, **2003**, 45, 41–50.

8. B. Gonzalez-Valdes, C. Rappaport, M. Lorenzo, and A. Jose, "On-the-move active millimeter wave interrogation system using a hallway of multiple transmitters and receivers," *In Proc. of the 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI),* **2014**, 1107–1108.
9. B. Gonzalez-Valdes, C. Rappaport, and M. J.A., "On the move millimeter wave interrogation system with a hallway of multiple transmitters and receivers," *Patent application* US 14 562 094, 12 05, **2014**.
10. Y. Alvarez, Y. Rodriguez-Vaqueiro, B. Gonzalez-Valdes, S. Mantzavinos, C. Rappaport, F. Las-Heras, and J. Martinez-Lorenzo. "Fourier-based imaging for multistatic radar systems," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **2014**, 62, 1798–1810.
11. M. Soumekh, "Bistatic synthetic aperture radar inversion with application in dynamic object imaging," *IEEE Transactions on Signal Processing*, **1991**, 39, 2044–2055.
12. C. A. Balanis, In *Advanced Engineering Electromagnetics*, 1st ed. New York, USA: John Wiley and Sons, 1989.
13. L. E. Tirado, J. A. Martinez-Lorenzo, B. Gonzalez-Valdes, C. Rappaport, O. Rubiños-Lopez, and H. Gomez-Sousa, "GPU implementation of the modified equivalent current approximation (MECA) method," *Applied Computational Electromagnetics Society (ACES) journal*, **2012**, 9.

Procedimiento de medida RADHAZ-HERP en sistemas HF de banda ancha embarcados.

Sánchez Álvarez, Luis Francisco [1]

[1] Ministerio de Defensa. Armada Española. Escuela Naval Militar. Centro de Estudios y Medidas Electromagnéticas (CEMEDEM). Email: lsanalv@fn.mde.es

***** TN (CIA-EOF) Luis Francisco Sánchez Álvarez; E-Mail: lsanalv@fn.mde.es

---

Abstract: Un buque de guerra moderno es una plataforma que alberga diferentes sistemas electrónicos operando a multitud de frecuencias y con potencias que pueden llegar a alcanzar los MW. Todas las radiaciones electromagnéticas (denominadas RADHAZ) pueden afectar negativamente a la dotación embarcada, por lo que se hace necesario la realización de mediciones que verifiquen si los niveles de campo electromagnéticos cumplen con la legislación vigente en lo tocante a exposiciones máximas admisibles. Este artículo expone el procedimiento de medida de RADHAZ para personal embarcado en una plataforma naval, en el caso concreto de un sistema de HF (radiaciones no ionizantes). Se expone, por tanto, la metodología para llevar a cabo las medidas en banda ancha, que será ilustrado mediante un ejemplo de medición real en un buque de la Armada.

Keywords: RADHAZ, HERP, HF, electromagnetic exposure, ship, vessel.

---

1. Introducción

En la actualidad, los buques de guerra modernos implementan una gran cantidad de sistemas electrónicos, dando lugar a un complejo sistema de emisiones electromagnéticas de diversas características de frecuencia y potencia. Los sistemas transmisores instalados a bordo generan radiación electromagnética (*ElectroMagnetic Radiation,* EMR), produciendo riesgos de radiación peligrosa conocidos como *RADiation HAzards*, o RADHAZ. Por ello, es necesario asegurar la seguridad frente a EMR tanto para el personal (*Hazards of Electromagnetic Radiation to Personal*, HERP), como para los combustible y otros materiales inflamables (*Hazards of Electromagnetic Radiation to Fuel*, HERF), así como para la munición y sistemas de armas con dispositivos eléctrico-explosivos (*Hazards of Electromagnetic Radiation to Ordnance*, HERO) y los sistemas electrónicos de

seguridad critica [1]. El peligro de estas emisiones viene dado por el hecho de que la radiación absorbida se manifiesta como un calentamiento de los tejidos orgánicos, sin que el individuo se percate de ello, al no producirse sensación interna de calor. Los efectos dependerán de diversos factores, como la frecuencia del emisor y su potencia de transmisión, del tiempo de exposición, del tipo de señal (onda continua o pulsada), distancia a la fuente emisora, complexión física del individuo, etc.

Este artículo se centra en el análisis RADHAZ HERP que tiene lugar debido a los sistemas de transmisión más comunes en cualquier tipo de plataforma naval, que son los sistemas de comunicaciones de alta frecuencia (HF), en la banda de 2 a 30 MHz. Existe literatura diversa sobre análisis RADHAZ en las inmediaciones de estaciones base de telefonía móvil o de radiotelevisión [2], pero no existe un procedimiento detallado que describa esta metodología para el caso de las plataformas navales, donde se encuentran sistemas capaces de transmitir hasta MW de potencia en un espacio reducido.

1.1. Normativa vigente

Diversas normativas, tanto nacionales, europeas y militares, regulan las medidas de protección sanitarias frente a emisiones radioeléctricas. En España, la normativa civil vigente es el Real Decreto 1066/2001 de 28 de septiembre [3]. Este R.D. adopta los niveles propuestos por la Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP) para el público en general, establecidos a su vez en la Recomendación del Consejo de Ministros de Sanidad de la Unión Europea de 12 de julio de 1999 [4]. Asimismo, la directiva 2013/35/UE Del Parlamento Europeo y del Consejo de 26 de junio de 2013 [5] establece las disposiciones mínimas de salud y seguridad relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los campos electromagnéticos, fijando unos niveles máximos de exposición. Esta directiva europea aún no ha sido transpuesta por España pero debe hacerlo antes del 1 de julio de 2016, una vez que sea traspuesta por España, será de aplicación.

Por último, en el ámbito militar, los niveles admitidos se encuentran recogidos en el *Standardization Agreement* (STANAG) 2345 de la *NATO Standarization Agency* (NSA) [6] y en el *STANAG 1380 E3 RADHAZ NATO Naval Radio and Radar Radiation HAZARD Manual AECP-02* [1].

En [6] se indica que, en caso de que haya legislación nacional de los estados miembros más restrictiva deberá al respecto, deberá aplicarse esta. Por tanto, dado que los valores más restrictivos de todas las normativas citadas son los recogidos en el R.D. 1066/2001, y que la Directiva 2013/35/UE aún no es de aplicación en España, estos serán los que se tendrán en consideración en el estudio que nos ocupa. A modo de resumen, la Tabla 1 recoge una comparativa de los niveles de las distintas normativas para el caso de HF.

Frecuencia(f)	**R.D. 1066/2001 (ICNIRP)**			**Directiva 2013/35/UE**			**STANAG 2345 (*)**		
(MHz)	E(V/m)	H(A/m)	S(W/m^2)	E(V/m)	H(A/m)	S(W/m^2)	E(V/m)	H(A/m)	S(W/m^2)
2-3	$87/f^{0.5}$	0.73/f	--------	610/f	2/f	---------	614	16.3/f	--------
3-10	$87/f^{0.5}$	0.73/f	--------	610/f	2/f	---------	1842/f	16.3/f	--------
10-30	28	0.073	2	61	0.16	---------	1842/f	16.3/f	--------

Tabla 1: Comparativa de las distintas normativas para radiación en la banda de HF

(*) El 22 de junio de 2015, por Boletín Oficial de Defensa se implanta el Acuerdo de Normalización OTAN STANAG 2345 MEDSTD (Edición 4), será implantado cuando sea promulgado por la OTAN (dado que, actualmente no lo está, se muestra aquí la referencia de la Edición 3).

El análisis RADHAZ es crítico a bordo de una plataforma naval, dado que interesan antenas de HF que sean omnidireccionales, de forma que la transmisión y recepción sea independiente del rumbo del barco. El espacio para su emplazamiento es limitado, por ello, predominan las antenas de menor superficie, tales como los látigos (*single pole whip*), los doble látigo (*twin pole whip*), de hilo (*long-wires*) y abanicos (*fans*). Estas antenas se pueden clasificar en de banda estrecha o de banda ancha, y no sólo será necesario caracterizar su comportamiento, sino también las unidades de sintonización de las mismas. Por ejemplo, las antenas de banda estrecha, típicamente látigos, necesitan una unidad de sintonía automática (*Automatic Tunning Unit*, ATU) que les proporciona una relación de onda estacionaria (*Voltage Standing-Wave Radio,* VSWR) óptima (VSWR<3 [7]) para poder operar en toda la banda de HF, estando cada antena conectada a un solo transceptor. Sin embargo, las antenas de banda ancha llevan una red de adaptación para conseguir eliminar la necesidad de sintonía, permitiendo estar asociadas a varios transmisores simultáneamente. Dado que son capaces de operar en tres sub-bandas de frecuencia diferentes (baja, media y alta), disponen de un triplexor que multiplexa en frecuencia la señal de entrada, proporcionando una señal de salida en cada una de dichas sub-bandas. Por tanto, se deberán caracterizar todos y cada uno de los elementos presentes en el sistema, dependiendo de la banda de frecuencias bajo estudio.

2. Procedimiento de medida

La caracterización de las emisiones HERP se debe realizar en dos fases: En primer lugar, serán necesarias una serie de medidas previas que verifiquen el correcto funcionamiento del sistema a medir. A continuación, la segunda fase consistirá en el procedimiento de medida de las radiaciones RADHAZ HERP propiamente dicho. Los subapartados 2.1 y 2.2 describen en detalle ambas fases, respectivamente.

2.1. Primera fase: Medidas previas.

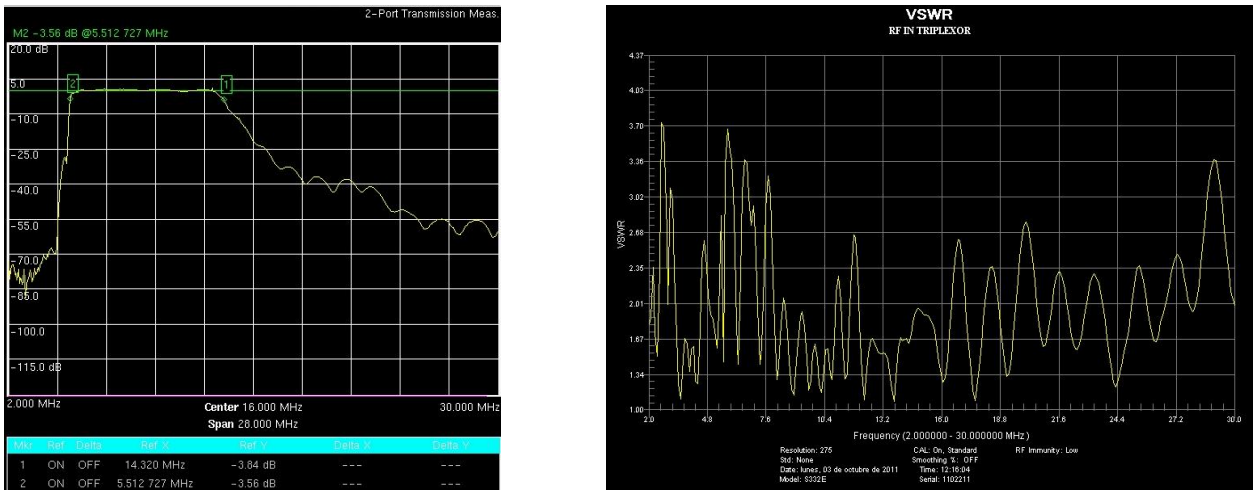
Se analizará un sistema de banda ancha, dado que se trata del sistema más complejo. Antes de llevar a cabo las medidas de RADHAZ HERP se debe caracterizar el sistema para verificar su correcto funcionamiento y localizar las frecuencias de corte y/o transmisión para cada una de ellas. Las medidas previas consisten, por tanto, en la caracterización del triplexor y la medida de la VSWR a la entrada del mismo, al ser donde se conecta toda la cadena de los transceptores. Dichas mediciones deberán efectuarse con el buque navegando, ya que se ha observado que el entorno (edificios, grúas y otros elementos de grandes dimensiones) afectan al comportamiento de la VSWR en frecuencias bajas. Esto no representa ninguna restricción al análisis a realizar, dado que, en general, el barco siempre estará navegando cuando emplea los sistemas de comunicaciones.

Para poder llevar a cabo las medidas, se embarca en la plataforma un analizador de redes capaz de cubrir toda la banda de frecuencias con que trabajan los equipos a analizar. En este caso, se ha

utilizado un equipo del fabricante *Anritsu*, modelo *Site Master TM Cable & Antenna Analyzer + Spectrum Analyzer S332E.*

La Figura 1 muestra un ejemplo de la caracterización entre la entrada del triplexor y una de sus salidas, así como la medida de la VSWR. El funcionamiento del triplexor quedará validado cuando, para cada sub-banda, la respuesta en frecuencia obtenida tenga un perfil más o menos plano, con una atenuación mínima. La Figura 1(a) muestra un ejemplo para la banda media, donde se puede apreciar cómo el triplexor presenta unas pérdidas menores a 1 dB entre 5.5 MHz y 14.5 MHz, mientras que fuera de este margen éstas aumentan bruscamente.

En segundo lugar, es necesario medir la VSWR del conjunto triplexor, líneas de transmisión y antenas (Figura 1 (b)). A fin de obtener frecuencias de trabajo optimas, han de escogerse aquellas que presenten una VSWR < 3. [7].



(a) Salida banda media (b) Medida VSWR entrada triplexor

Figura 1. Caracterización del triplexor.

Si por el contrario, se desea analizar un sistema banda estrecha, las medidas previas se reducen drásticamente. El sistema de banda estrecha está compuesto por un transceptor, una línea de transmisión, un acoplador o ATU y la antena. En estos casos, habrá que sintonizar el equipo a las frecuencias de interés, medir la VSWR siguiendo el procedimiento anteriormente indicado, comprobar que se cumplen los requisitos de calidad, y proceder, posteriormente, con el método de medida de los niveles de campo especificado en el apartado 2.2.

2.2. Segunda fase: Procedimiento de medida de los niveles de campo de las antenas.

Una vez a bordo de la plataforma, se deben controlar las emisiones radioeléctricas activas de forma que únicamente se encuentre en el aire la radiación que interesa caracterizar. En primer lugar, se identificarán las condiciones de campo cercano y lejano, considerando campo cercano por debajo de 3λ [4]. Por tanto, dadas las características de la plataforma, se puede asumir que, en la banda de HF, la superficie del buque se encontrará en condiciones de campo cercano [8]. Este hecho implica que se deberán medir tanto las componentes del campo eléctrico (E) como las del campo magnético (H). Los

equipos que se emplean están recogidos en la Tabla 2, todos ellos, tanto los medidores de campo como las sondas asociadas son del fabricante *Narda Safety Test Solutions and L_3 Communications Company.*

CARACTERISTICAS SONDAS	**CAMPO E**		**CAMPO H**	
	MEDIDOR	*SONDA*	*MEDIDOR*	*SONDA*
	EMR-300	8.2	NBM-550	HF-3061
FRECUENCIA	100 kHz - 3 GHz		300 kHz – 30 MHz	
RANGO	0,6-800 V/m		0,012- 16 A/m	

Tabla 2: Equipos de medida para RADHAZ-HERP

Se seleccionarán las frecuencias de medida óptimas en cada sub-banda, escogiendo las frecuencias de transmisión dentro de aquellas de uso exclusivo del Ministerio de Defensa, según Orden IET/787/2013, de 25 de abril [9], por la que se aprueba el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF 2013) en la banda de interés.

Tras seleccionar el transceptor más adecuado (aquel con menos pérdidas), se configurará el sistema para transmitir un mensaje de forma continua, a máxima potencia, con la modulación más común en comunicaciones (*Upper Side Band*, USB).

Las medidas se realizarán a lo largo de toda la plataforma, por lo que se dividirá la planta completa del buque en cuadrículas de aproximadamente 3x3 m. Dichas cuadrículas serán identificadas por letras correlativas, de forma que la primera será la A (zona situada lo máximo posible a proa babor), y se irán incrementando correlativamente de babor a estribor y proa a popa, Figura 3(b). Asimismo, se deberán identificar por cubierta, de forma que cada cuadrícula queda referenciada por un conjunto de letras más un identificador de cubierta. Una vez etiquetada la retícula completa, se medirá en cada una de ellas los valores máximos de E y H mediante el método de medida del péndulo [10], comparando en todo momento con los límites establecidos en la Tabla 1.

En caso de que se superen los niveles máximos, se medirán todas las cuadrículas adyacentes, hasta localizar las cuadrículas cercanas donde no se superen.

Una vez realizadas las medidas, se procederá a la presentación de los resultados de forma visual mediante un código de colores.

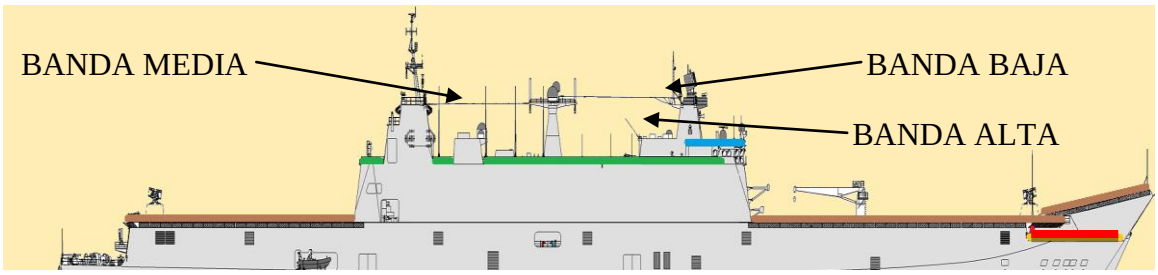
3. Medidas realizadas sobre plataforma naval

3.1. Plataforma bajo medida: buque tipo LHD.

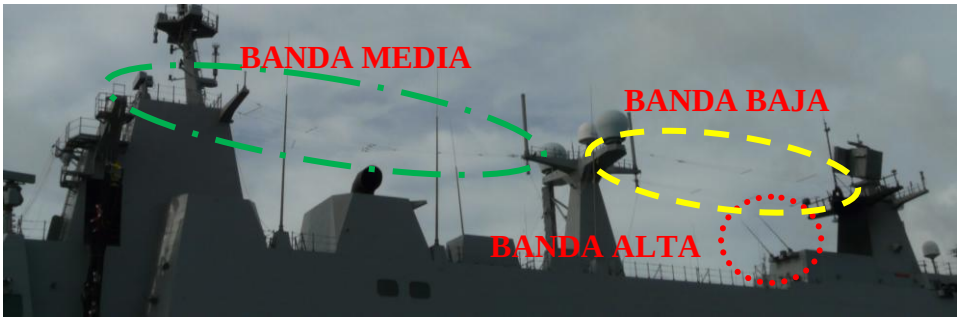
A modo de ejemplo, se presenta un estudio realizado sobre un buque de la clase LHD (*Landing Helicopter Dock*), son plataformas que permiten cubrir distintos tipo de misiones Dada su enorme versatilidad, muchas marinas de guerra disponen de este tipo de buques: Estados Unidos (clase WASP), Australia (clase CANBERRA), España (clase JUAN CARLOS I), etc.

En el estudio que nos ocupa se medirán los niveles de campo E y H para HERP de un sistema de banda ancha en HF, compuesto por, entre otros elementos, por un triplexor y tres antenas (dos dobles abanico, uno para banda baja y otro para banda media, y un doble látigo para la banda alta).

La Figura 2(a) muestra las distintas cubiertas del buque a analizar, con diferentes colores: cubierta 06 en azul, 05 en verde, 02 en marrón y cubierta principal en rojo. La Figura 2 (b) muestra las antenas que se analizarán sobre la plataforma.



(a) Perfil con las distintas cubiertas.



(b) Vista general de las antenas objeto de la medida.

Figura 2. Perfil de la plataforma y antenas objeto de la medida.

3.2. Descripción de las medidas realizadas

Con los equipos descritos en la Tabla 2, debidamente calibrados, se lleva a cabo el procedimiento descrito en la sección 2.2. Por tanto, se procede a recorrer las distintas cuadrículas por cubiertas, con el objetivo de identificar las zonas en las que se superan los niveles de campo de las referencias, en función cada una de las frecuencias de transmisión. En cada uno de los puntos analizados, se toman medidas instantáneas máximas con el fin de identificar los puntos de máxima exposición, variando la altura relativa de la sonda respecto la cubierta (método del péndulo [10]) y teniendo en cuenta, en cada medida, el factor de corrección de las sondas para cada frecuencia. El resultado es un mapa de campo por cada una de las frecuencias, en cada cubierta.

La Figura 3 muestra un fragmento pormenorizado por cuadrículas de las cubiertas 06 y 05, en cada una de las tres bandas bajo estudio, dado que son las cubiertas de mayor tránsito de personal. Para un análisis visual rápido, se han coloreado en rojo las zonas de mayor exposición.



(a) Banda baja (b) Banda media

(c) Banda alta

Figura 3. Perfil con las distintas cubiertas y mapa de campo de cubiertas 06 y 05.

4. Resultados y Discusión

Se ha presentado una metodología para la medición de RADHAZ HERP, centrado en los sistemas de comunicaciones HF en plataformas navales. La descripción del procedimiento se ha completado con las medidas reales realizadas en un buque de la clase LHD.

Se han medido tres frecuencias diferentes en la banda baja de operación de un sistema HF, en tres cubiertas distintas. Acorde al procedimiento descrito, se identifica que para la banda baja existe una cuadrícula de peligro potencial a bordo, donde se superan los límites establecidos (cubierta 06, cuadrícula NP). Se valora el peligro potencial que ello representa, descartándolo dado que dicho punto se corresponde con la ubicación de la caja de banderas del barco, donde no se produce ni tránsito ni permanencia de personal, salvo en situaciones puntuales cuando se accede a cambiar alguna bandera del mástil. Siguiendo la misma metodología, se caracteriza la banda media a través de cinco frecuencias de su rango de trabajo. Se identifican numerosas cuadrículas en la cubierta 05 donde se superan los niveles, por lo que, en este caso, se procedería a recomendar que se evite la permanencia de personal en esas zonas mientras esta antena esté en funcionamiento. Por último, la medida de la antena de banda alta (caracterizada a dos frecuencias) permite localizar una retícula por encima de los niveles de exposición, a unos 10 m debajo de la antena en la cubierta 05.

Para las tres antenas, y en todas las frecuencias, se recorre toda la cubierta de vuelo (cubierta 02) sin encontrar ningún punto problemático, pudiendo certificarla como zona segura.

5. Conclusiones

Las medidas de RADHAZ HERP de HF a bordo de un buque de guerra son complicadas y laboriosas. Al estar en campo cercano, los niveles de potencia no se ven drásticamente reducidos al alejarnos del transmisor, por lo que es necesario recorrer toda la cubierta, haciendo especial hincapié en las zonas de permanencia y/o tránsito de personas.

Por último, la certificación de zona segura dependerá de la referencia legislativa que se emplee. Para este caso, el disponer de tablas con los valores de campo en toda la retícula en función de la frecuencia (en lugar de códigos de colores) permite localizar, de forma más directa, las zonas que pudieran ser de exposición peligrosa para el personal de a bordo. En el momento que cambie la normativa, por ejemplo, sean aplicables los límites para trabajadores recogidos en [5] habrá que identificar las nuevas zonas de peligrosidad y realizar un nuevo mapa de campo, al permitir mayores niveles, las cuadrículas en las que se superen estos niveles serán muchas menos.

Se puede simplificar el trabajo realizando simulaciones de los niveles de E y H, para identificar las zonas en las que hay mayor niveles y validar las simulaciones con las medidas realizadas. Para la simulación se puede emplear HEMCUVI [11].

Agradecimientos

Este trabajo nunca se habría podido desarrollar sin la dotación, medios y recursos del CEMEDEM. Especial agradecimiento al STTE Don Carlos Peña Criado, que ya no se encuentra entre nosotros, parte integrante y fundamental de la campaña de medidas presentada en este trabajo.

Referencias.

1. North Atlantic Treaty Organization, *Nato Naval Radio and Radar Radiation Hazard Manual AECP-02(D) STANAG 1380 Ed. 5 draft.* The NATO Standardization Office (NSO), **2014**.
2. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, *Emisiones radioeléctricas:normativa, Técnicas de Medida y Protocolos de certificación*. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación Madrid, **2008**.
3. Ministerio de la Presidencia, *Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre*, RCL 2001\2415, 2597. BOE núm. 234, de 29 de septiembre de **2001**, páginas 36217 a 36227.
4. Consejo de la Unión Europea, *Recomendación del Consejo relativa a la exposición del publico en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz)*, 1999/519/CEE de 12 de julio de **1999**.
5. Parlamento Europeo y del Consejo, *Directiva 2013/35/UE*, 26 de junio de **2013**.
6. North Atlantic Treaty Organization, *Evaluation and Control of Personnel Exposure to Radio Frequency Fields 3 kHz to 300 GHz STANAG 2345 Ed.3*, The NATO Standardization Office (NSO), **2003**.
7. Balanis, Constantine A; *Antenna theory and design*. John Wiley & Sons, Inc., New York, **1997**.
8. Bienkowski, P.; Trzaska, H. *Electromagnetic Measurements in the Near Field*. The Institution of Engineering and Technology, **2012**.
9. Ministerio de Industria, *Orden IET/787/2013, de 25 de abril, por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencia*. BOE núm. 111, de 9 de mayo de **2013**, páginas 35006 a 35330.
10. Wuscheck, M; Narda Safety Test Solutions. *Application Note: Measurements in the vicinity of fixed wireless transmiters.* Narda Safety Test Solutions GmbH. **2012**.
11. F. Obelleiro, J. Taboada, J. Rodriguez and J. Bertolo, "*HEMCUVI: A software package for the electromagnetic analysis and design of radiating systems on board real platforms*", Antennas and Propagation Magazine, IEEE, vol. 44, no. 5, pp. 44-61, **2002**.

Estrategias de visualización GPR-3D para la detección de IED y su reconstrucción volumétrica

Solla Carracelas, Mercedes [1,*], Rodríguez Moreno, Jorge [1], Núñez Nieto, Xavier [1] y Novo Lamoso, Alexandre [2]

[1] Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar de Marín. Emails:merchisolla@cud.uvigo.es (M.S); joromo@gmail.com (J.R); xnnieto@cud.uvigo.es (X.N)

[2] GeoRadar Division, GeoSystems Business Unit Manager, IDS North America; Email: a.novo@idscorporation.com (A.N)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; Email: merchisolla@cud.uvigo.es

---

Abstract: Este trabajo presenta un estudio de viabilidad del método georradar para su aplicación en el campo de labores de desminado humanitario. Para ello se realizó una zona experimental emplazada en la Escuela Naval Militar que simulase una carretera o camino con presencia de IED. Se consideraron dos tipos de IED desarrollados a partir de dos UXO de artillería, con diferentes calibres OTAN empleados por todas las fuerzas multinacionales desplegadas en el teatro estratégico y operacional. Se tuvo en cuenta como medio mecánico de activación del IED el plato de presión. A uno de los IED se le añadió metralla de proyección mediante una garrafa llena de tornillos y tuercas. Para el estudio georradar se consideraron metodologías de adquisición y procesado 3D para una mejor comprensión del espacio subterráneo ocupado. El empleo de herramientas de visualización 3D avanzadas han permito también la reconstrucción volumétrica de los dispositivos simulados.

Keywords: georradar; dispositivos explosivos improvisados; procesado 3D; detección; desminado humanitario

---

1. Introducción

La seguridad constituye un reto global de primera magnitud cuya importancia se ha incrementado debido a los acontecimientos internacionales y a los cambios sociales que se manifiestan en un contexto mundial. Con el objetivo de protegernos de amenazas, tales como el empleo de explosivos

con fines terroristas, es necesario que invirtamos en conocimiento y tecnología, imprescindibles en el ámbito de defensa y seguridad [1].

En la lucha contra el terrorismo, uno de los desafíos más importantes es la lucha contra el empleo de explosivos o artefactos explosivos con fines terroristas, ya que atentan tanto a la seguridad de las tropas de nuestras Fuerzas Armadas (FAS) desplegadas en misiones internacionales como a la seguridad interior. Tener la capacidad para contrarrestar o disminuir la efectividad de estas actividades forman el conjunto de tareas en dicha lucha, las cuales se pueden resumir en: predicción, prevención, protección, neutralización y finalmente análisis forense del incidente. Debido a que todas ellas están en orden cronológico, es evidente la importancia de enfrentar el problema cuanto antes para reducir los efectos de los artefactos explosivos.

Es de destacar la labor de organismos internacionales como la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) y la Agencia Europea de Defensa (EDA), iniciando programas y creando centros y organismos con el objetivo de hacer frente a las amenazas que suponen los IED (Improvised Explosive Device). Dentro de la alianza existen dos organismos con un papel destacado en operaciones de desminado: el Mando Aliado de Transformación (ACT) de la OTAN y la Conferencia de Directores Nacionales de Armamento (CNAD). En la cumbre de Estambul del 28-29 de junio de 2004 se establecieron un conjunto de medidas con el fin de consolidar la contribución de la Alianza en la lucha contra el terrorismo y que se recogieron en el Programa de Trabajo de Defensa Contra el Terrorismo, POW-DAT (Programme of Work-Defense Against Terrorism), determinando así los siguientes objetivos relacionados a la detección de IED:

- Desarrollar equipos y técnicas para la detección de artefactos explosivos o de señales de dispositivos detonadores, de los talleres donde se fabrican o de los individuos que los fabrican.
- Desarrollar procedimientos, estándares y doctrinas para la detección y derrota de IED.

La detección a distancia de los IED sigue siendo uno de los grandes desafíos tecnológicos. Dicha inmadurez, y la rápida necesidad de estas tecnologías y soluciones, han motivado el incremento de experimentación con tecnologías y sistemas de otras áreas y entornos civiles. Una de las técnicas comúnmente utilizadas para la detección de UXO (Unexploded ordnance) e IED es el detector de metales (MD). El MD básico utilizado para la detección de minas, basado en el fenómeno de la interferencia electromagnética (EMI), funciona midiendo la perturbación de un campo electromagnético que es emitido por la presencia de objetos metálicos en el suelo. El principal problema es que muchos de los IED actuales están elaborados de materiales cerámicos o plásticos y contienen poco o ningún componente metálico, a excepción del detonador. Además hay otro factor a tener en cuenta con esta tecnología de detección; la presencia de basura o restos metálicos en el campo de minas pueden incrementar las falsas alarmas (FAR- False Alarm Rate) con la consiguiente disminución de la eficiencia y el rendimiento de este método [2]. Es por ello que se define la importancia del empleo del georradar (GPR o radar de penetración terrestre) en la detección de artefactos explosivos dentro del ámbito del desminado [3]-[6]. Esta técnica es ideal, si bien se basa en su seguridad y rapidez como técnica no invasiva en comparación con otros procedimientos más invasivos tales como el método de detección mediante punzón o "prodding". Asimismo, la técnica GPR tiene la capacidad de detectar tanto IED no metálicos como metálicos, ya que existe una diferencia de contraste electromagnético entre el suelo y el objeto enterrado.

Por todo lo anteriormente expuesto, este trabajo presenta un estudio de análisis de viabilidad del método GPR en la detección de dispositivos IED. Teniendo en cuenta las últimas tendencias de mercado en cuanto a la existencia de vehículos GPR-3D integrados, como es el caso del Husky 2G de la marca NIITEK en España, el empleo de procesado y técnicas de visualización 3D se ha incrementado en las últimas décadas en aplicaciones de desminado [7]. Mediante técnicas de visualización 3D obtenemos imágenes más reales del subsuelo, mejorando la interpretación y proporcionando la localización y correlación espacial entre objetos [8]-[9].

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. Zona Experimental

En el interior de las instalaciones de la Escuela Naval Militar (ENM) de Marín, se simuló un camino con presencia de IED en terreno arenoso (Figura 1). Se consideraron dos tipos de IED desarrollados a partir de dos UXO de artillería (proyectiles de 155 y 105 mm, respectivamente), calibres OTAN. Se trata de material inerte proporcionado por el pañol de Infantería de Marina y el Dpto. No.4 de la ENM.

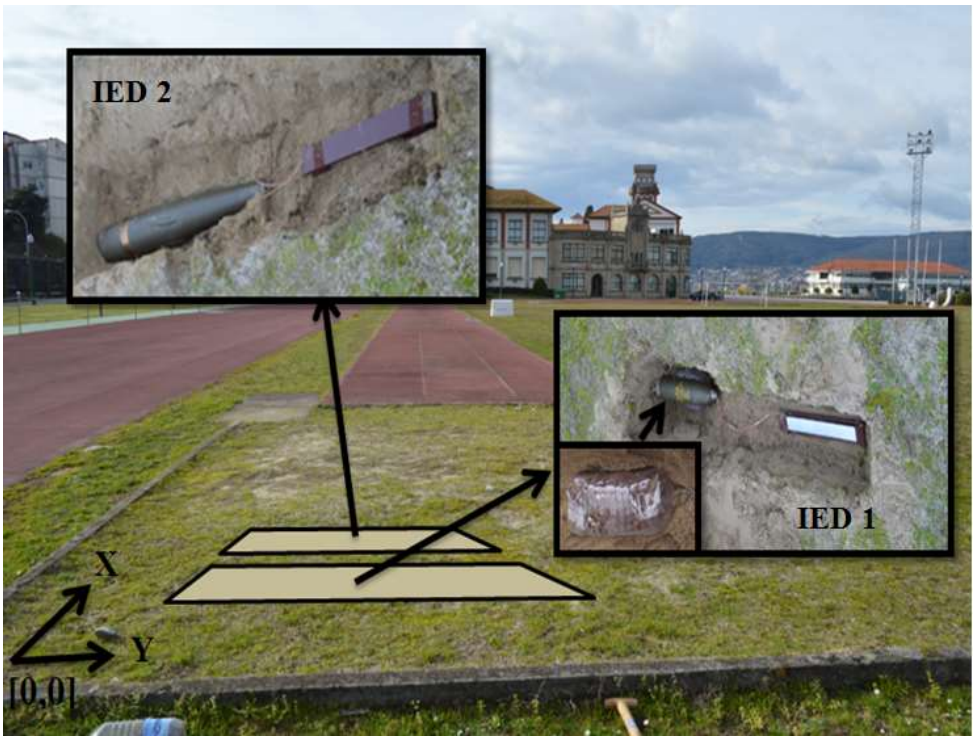


Figura 1. Escenario simulado y zona de estudio en la ENM de Marín.

Con el fin de realizar un análisis de detección exhaustivo, y para optimización del estudio real, se tuvo en cuenta como medio mecánico de activación del IED el plato de presión. Se puede observar que el proyectil de 155 mm está montado con plato de presión para vehículos pesados, ya que contiene una mayor cantidad de carga principal. Por otro lado, el montaje del proyectil de 105 mm, de menor carga, se montó considerando un plato de presión para vehículos ligeros. Los IED se instalaron

horizontalmente, disposición en la que se encuentran en la mayoría de los casos estudiados desde el año 2000 [1]. Al IED desarrollado a partir del proyectil de 105 mm se le añadió metralla de proyección, para aumentar los daños causados, mediante una garrafa de 5 litros llena de tornillos y tuercas. Los cebos fueron alojados en la cavidad de la espoleta, las cuales fueron retiradas como en todo montaje de IED. Los conductores a su vez fueron unidos entre proyectil y mecanismo de activación mecánica.

2.2. Metodología para la adquisición de datos

La profundidad de estudio y la resolución demandada para la detección de los IED fabricados dependen de la frecuencia de la antena empleada. Las antenas que proporcionan mayor resolución, es decir, los primeros centímetros del suelo, son aquellas de muy alta frecuencia (2.3-4 GHz) que permiten localizar elementos centimétricos. Sin embargo, dada la profundidad que pueden alcanzar dichos dispositivos improvisados, se seleccionó una frecuencia de 800 MHz para la realización de este estudio. Se empleó una unidad de control RAMAC CU-II de la compañía Malå Geoscience y se establecieron, como parámetros de ajuste para la toma de datos, una distancia entre trazas de 2 cm y una ventana de tiempos total de 60 ns.

Para ayudar a la mejor interpretación y visualización de los datos obtenidos, se consideraron metodologías de adquisición y procesamiento 3D. Por ello se tomaron perfiles paralelos en dirección X a lo largo de toda la zona experimental (Figura 1) con un espaciado entre perfiles de 10 cm. La malla prospectada final resultó ser un rectángulo de 4.8x3.5 m.

2.3. Procesado y técnicas de visualización 3D

El procesado 3D de los datos obtenidos se llevó a cabo mediante el software específico GPR-Slice v.7 [10]. En primer lugar se procedió al filtrado de los datos en bruto para amplificar la señal recibida. Así pues, se aplicaron los siguientes filtros: filtro vertical (1D-temporal), ganancia manual, filtro paso banda (corte inferior: 68 MHz; corte superior: 822 MHz) y filtro horizontal (2D-espacial).

Para la elaboración del cubo 3D se generaron, por interpolación, las imágenes 3D horizontales (time-slices). Se utilizó un proceso de interpolación promediando el cuadrado de las amplitudes de onda de las reflexiones recogidas en la ventana de tiempos. Las time-slices fueron normalizadas a 8 bits siguiendo los cambios de color entre diferentes niveles en vez de valores de reflexión reales. Asimismo se aplicó una superposición (overlay) del 50% entre porciones consecutivas para conectar reflexiones que pudiesen haberse producido a profundidades ligeramente diferentes, así como para mejorar la transición de imágenes entre profundidades. Se utilizó un set de 22 porciones horizontales de 53 muestras de grosor (5.2 ns) sobre una ventana de tiempos de 581 muestras (57.2 ns). Se determinó una velocidad de 0.11 m/ns a partir del análisis de la forma de la hipérbola para la conversión de tiempo a profundidad.

Las time-slices, o mapas horizontales, proporcionan la localización, tamaño y geometría de los objetos enterrados. Sin embargo, en una imagen individual no se representa la forma (huella) completa del objeto, ya que sus dimensiones pueden variar a diferentes profundidades. Para solventar dicha limitación, se aplicó una superposición (overlay) hasta 15 cm, considerando la máxima dimensión vertical de los IED simulados. Más allá de esta superposición en planta, resulta de especial interés la

extracción de un volumen 3D que reconstruya la huella de los dispositivos enterrados. Dicha reconstrucción volumétrica se realizó a partir de técnicas de renderizado isosuperficial. Con esta herramienta se ilustran superficies de igual amplitud en el volumen. Un valor umbral define el número máximo de superficies posibles dentro del cubo 3D.

3. Resultados y Discusión

3.1. Cubo 3D e imagen de superposición (overlay)

La Figura 2 muestra el cubo 3D generado, y en concreto la time-slice a 15 cm de profundidad, mostrando las huellas (en rojo) generadas por ambos IED. En particular, y dentro de cada dispositivo, la huella más grande se corresponde con el proyectil y la de menor tamaño con el plato a presión. Se presenta también la time-slice a 15 cm obtenida mediante superposición (overlay), extrayendo las reflexiones más fuertes a diferentes profundidades y conjuntándolas en un mapa compuesto por mapas horizontales individuales. Se observa como el proyectil de 155 mm (IED 2) presenta mayor huella que el de proyectil de 105 mm (IED 1). Esto se debe a que, siendo ambos de metal (reflector perfecto), el de mayor tamaño refleja mayor cantidad de energía. En el caso del IED 1, la geometría de la huella incluso permite intuir la presencia de la garrafa sobresaliendo ligeramente por su parte inferior.

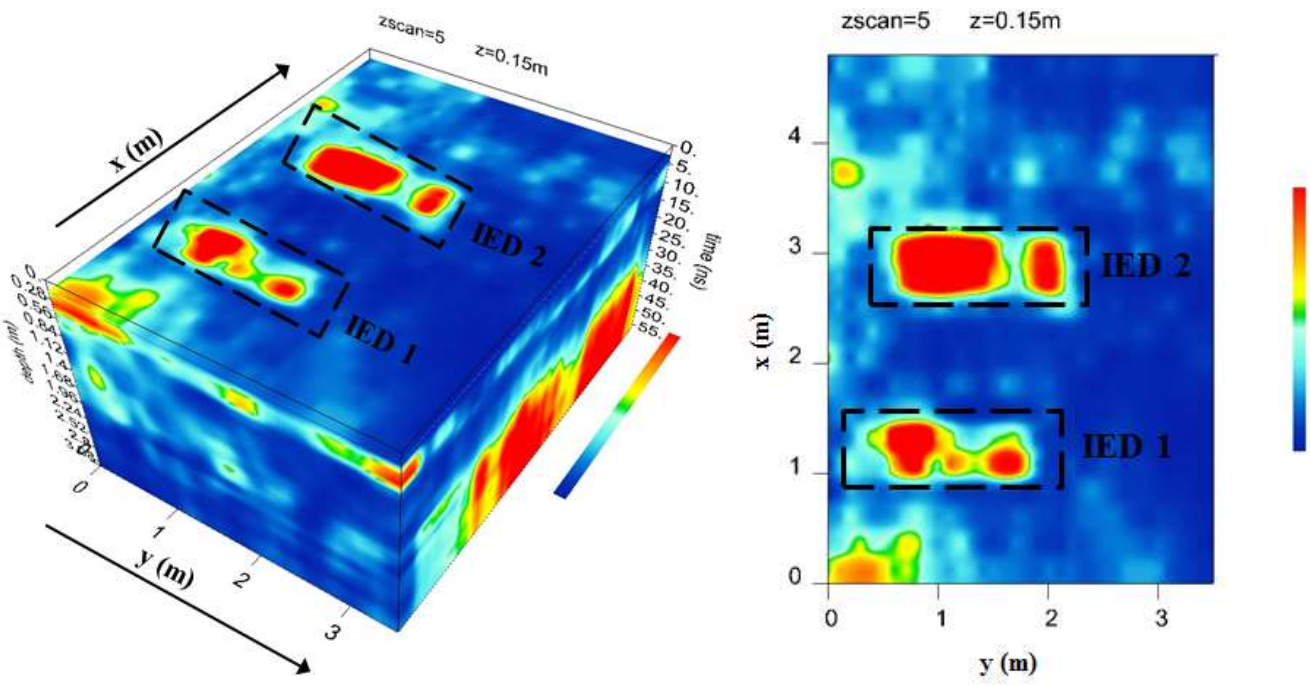


Figura 2. Cubo GPR-3D generado mediante el software GPR-Slice y time-slice obtenida mediante superposición (overlay a 15 cm).

3.3 Extracción del volumen 3D

La extracción de un volumen 3D, que representa por completo el espacio volumétrico de los dispositivos, fue posible mediante el uso de la técnica de renderizado isosuperficial. Se aplicaron para ello distintos valores umbrales (55, 65, 75, 85 y 95%), de tal modo que cualquier superficie cuyo valor sea igual o superior al % del valor máximo de amplitud (umbral) queda perfectamente representada. En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos para cada valor umbral establecido. El mejor resultado, correspondiente al volumen de los IED, se obtuvo con los valores umbrales de 85 y 95% (d y e, respectivamente). De este modo, queda demostrada la importancia de un correcto establecimiento de dicho valor umbral para una visualización geométrica de mayor aproximación a la realidad de los objetos enterrados. Adicionalmente, en la Figura 3(f) se muestra la isosuperficie negativa para un umbral de 85%. Se trata del mismo concepto, pero en vez de convertir en sólido el porcentaje por encima del umbral, se hace sólida toda superficie inferior a dicho valor y se deja hueco el resto. La reconstrucción volumétrica del espacio subterráneo permite una interpretación intuitiva de la configuración y disposición de los IED.

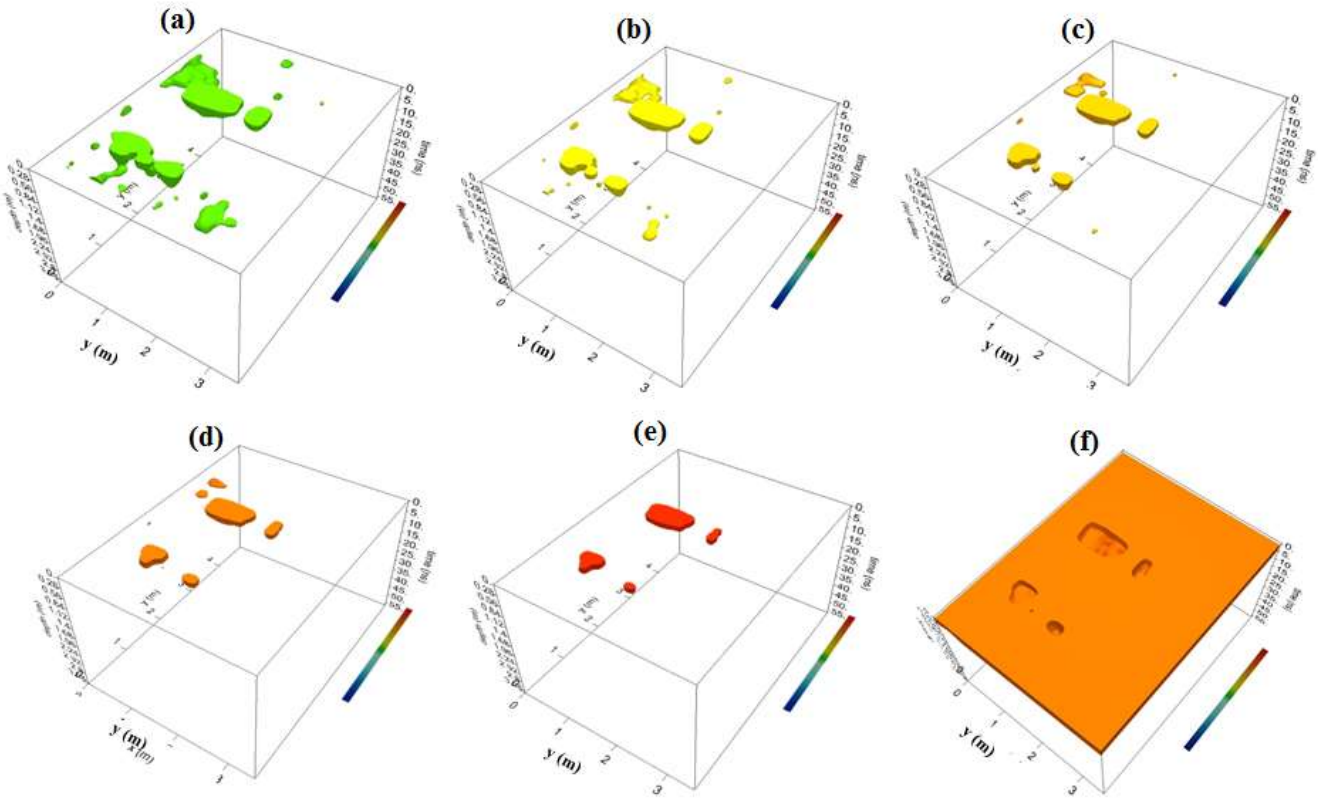


Figura3. Renderizado isosuperficial positivo considerando distintos umbrales: (a) 55%, (b) 65%, (c) 75%, (d) 85% y (e) 95%. Se presenta también la isosuperficie negativa para el caso de un valor umbral 85% (f).

4. Conclusiones

En este estudio se analiza la viabilidad del empleo del GPR en las labores de detección de IED. Para ello se construyó una zona experimental simulando aquellos IED más parecidos a los que se pueden encontrar en un escenario de combate actual. Analizando la metodología GPR empleada, cabe destacar que una frecuencia de 800 MHz, con resolución vertical de aproximadamente 12 cm, se muestra idónea incluso para la detección de los elementos más superficiales como es el caso de platos de presión. Mediante procesado de datos con herramientas de visualización 3D, (extracción volumétrica 3D de los objetos reflejados y superposición de imágenes en profundidad (overlay time-slice), cualquier usuario prácticamente sin experiencia podría determinar la forma geométrica de los componentes y sus tipos sin necesidad de remoción de material o empleo de un procedimiento destructivo.

Una vez obtenidos los resultados, y atendiendo a las necesidades actuales en lo que respecta a la detección de IED, el empleo de equipos GPR-3D a nivel militar se muestra de gran utilidad en los conflictos actuales como método para salvar vidas de combatientes españoles luchando en un tipo de guerra que no sólo tiene repercusiones a nivel táctico, sino que llega a nivel operacional y estratégico; por no citar las incontables bajas civiles a lo largo de los últimos años en atentados y ataques insurgentes.

Como líneas futuras en el desarrollo de la capacidad de detección de IED se plantea el análisis y capacidad del método en condiciones más adversas de terreno, como es el caso de terrenos húmedos y/o con elevado grado de heterogeneidad por presencia de piedras, raíces, etc.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Centro Universitario de la Defensa y a la Escuela Naval Militar de Marín por los recursos prestados, al Departamento No.4 de Infantería de Marina y al pañol IM por proporcionar el material de artillería y explosivos necesarios para conseguir la elaboración de los IED. Se agradece también al Grupo de Investigación de Geotecnologías Aplicadas de la Universidad de Vigo por el préstamo del equipo georradar.

Referencias

1. Ministerio de Defensa. La seguridad frente a artefactos explosivos. *Documentos de Seguridad y Defensa* **2009**, 28, 225 pp.
2. Bruschini, C.; Gros, B.; Guerne, F.; Pièce, P.Y.; Carmona, O. Ground penetrating radar and imaging radar detector for antipersonnel mine detection. *Journal of Applied Geophysics* **1998**, 40, 59–71.
3. Sato, M.; Fujiwara, J.; Feng, Z.; Zhou, Z.; Kobayashi, T. Development of a hand-held GPR MD sensor system (ALIS). In *Proceedings of SPIE, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets*, 2005, vol. 2, pp. 1192–1199.

4. Daniels, D.J. A review of GPR for landmine detection. *Sensing and Imaging: An International Journal* **2006**, 7(3), 90–123.
5. Hendrickx, J.M.H.; Molina, A.; Diaz, D.; Grasmueck, M.; Moreno, H.A.; Hernández, R.D. Humanitarian IED clearance in Colombia. In *Proceedings of SPIE, Defense and Security Symposium*, International Society for Optics and Photonics, 2008.
6. Cardona, L.; Jiménez, J.; Vanegas, N. Tecnologías para la detección de minas frente al problema de desminado en Antioquía. *DYNA* **2014**, 81(183).
7. Ligthart, E.E.; Yarovoy, A.G.; Roth, F.; Ligthart, L.P. Landmine detection in high resolution 3D GPR images. In *Proceedings of MIKON*, 2004.
8. Dyana, A.; SrinivasRao, C.H.; Kuloor, R. 3D Segmentation of Ground Penetrating Radar Data for Landmine Detection. In *Proceedings of the 14th international conference on ground penetrating radar*, 2012, Shanghai.
9. Capineri, L.; Ivashov, S.; Bechtel, T.; Zhuravlev, A.; Falorni, P.; Windsor, C.; Borgioli, G.; Vasiliev, I.; Sheyko, A. Comparison of GPR Sensor Types for Landmine Detection and Classification. In *Proceedings of the 12th international conference on ground penetrating radar*, 2008, Birmingham.
10. Goodman, D. GPR-SLICE Manual, from <http://www.gpr-survey.com>.

Evaluación de la termografía infrarroja como técnica para la detección de UXOs

Lagüela López, Susana [1,2,*], Solla Carracelas, Mercedes [1,3], Núñez Nieto, Xavier [1,3] y Lorenzo Cimadevila, Henrique [1]

[1] Grupo de Investigación de Geotecnologías Aplicadas, Universidad de Vigo. Email: hlorenzo@uvigo.es (HLC)
[2] Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca. Email: sulaguela@usal.es (SLL)
[3] Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar de Marín. Email: merchisolla@cud.uvigo.es (MSC), xnnieto@cud.uvigo.es (XNN)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: sulaguela@usal.es (SLL);

Abstract: Se evalúa la capacidad de la técnica termográfica para la búsqueda de defectos subsuperficiales en el suelo, en base a la realización de ensayos de termografía activa al aire libre, en condiciones no controladas, sobre un elemento vivo como es el suelo, por lo que deberán tenerse en cuenta factores tales como la presencia de hojas o hierba, de piedras en la tierra, y la propia composición del suelo. Se desarrolla para la búsqueda termográfica de UXOs un sistema móvil rodado, equipado con lámparas flash y cámara termográfica. De este modo, se realiza una estimulación térmica del terreno con las lámparas flash; que obtendrá respuesta diferente en las zonas con UXOs y en las zonas en las que el subsuelo es homogéneo. El objetivo de este estudio es captar este calentamiento diferencial, y relacionarlo con la presencia de UXOs en el terreno, así como con su tipología: minas antipersona o minas antitanque. Dado que se trata de un estudio preliminar, el sistema móvil también fue equipado con georradar (GPR), de modo que se tienen, para cada caso, las posiciones de los UXOs y sus tamaños. Así, las mediciones realizadas con termografía pueden ser verificadas.

Keywords: termografía infrarroja; UXO; subsuperficie; termografía activa; sistema móvil rodado; GPR

---

1. Introducción

La existencia de artefactos explosivos enterrados (minas, proyectiles sin explotar, etc.) supone una grave amenaza para el desarrollo de las misiones encomendadas a nuestras fuerzas armadas. Por un lado, en potenciales misiones de combate, la existencia de terrenos minados dificulta el despliegue y avance de las tropas, poniendo en peligro el éxito de su misión y sus propias vidas. Por otro, en misiones de pacificación, suponen un problema humanitario muy grave, puesto que causan multitud de víctimas civiles y dificultan las tareas de reconstrucción de antiguos escenarios bélicos. Ahora bien, la eliminación de estos artefactos explosivos del terreno supone una tarea difícil, que se hace más compleja por la variabilidad de los parámetros que intervienen (las condiciones ambientales, las alteraciones que se producen en los restos con el tiempo etc.). Es por ello por lo que es una tarea costosa, tanto en tiempo como en recursos económicos, y que somete al equipo militar encargado de realizarla a un peligro evidente. Así pues, poder disponer de mecanismos que permitan la eliminación de este tipo de artefactos explosivos con rapidez y seguridad es un tema de crucial relevancia.

La termografía para detección de defectos subsuperficiales se aplica actualmente en ensayos de laboratorio, con condiciones ambientales muy controladas [1, 2]. Además, se aplica a objetos que no experimentan cambios significativos a lo largo de su vida. La innovación que presenta este trabajo en este campo se sitúa en la búsqueda de defectos subsuperficiales en el suelo, que es un elemento vivo, con variaciones que dificultan la estandarización de los procesos. Por tanto, deben tenerse en cuenta factores tales como la presencia de materia orgánica u hojarasca, la granulometría del suelo, los tipos de suelo y la geología, así como la propia composición del suelo tanto para las necesidades de excitación térmica como para la correcta interpretación de los datos adquiridos en las imágenes.

La fuerte correlación entre muchos de los factores que influyen sobre la respuesta espectral del suelo, imposibilita el que puedan sacarse conclusiones claras del análisis de una imagen de unas zonas cuyas características edáficas se desconocen. Por lo tanto, se debe diseñar el equipo ideal para la detección de minas terrestres, tal como diversos autores recomiendan [3, 4], para trabajar en diferentes condiciones de entorno: un amplio rango de temperatura (de -20 ˚C a 60 ˚C), desiertos áridos y selvas frondosas, terrenos rocosos y zonas pantanosas, caminos llanos y colinas inclinadas, en presencia de lluvia, polvo, humedad, arena, suelos arcillosos y ambientes salinos, etc.

El método GPR es una técnica extendida en la comunidad científica para la detección de minas y artillería sin explosionar [5, 6]. La idoneidad técnica se basa en su rapidez y seguridad como técnica no destructiva en comparación con otros procedimientos más invasivos, tales como excavaciones o métodos de cata tradicionales. Además, la técnica GPR tiene la capacidad de detectar tanto minas metálicas como no metálicas, ya que existe una diferencia de contraste electromagnético entre el suelo y el objetivo. Es por ello que se emplea la técnica de GPR en este trabajo como técnica de validación, para las detecciones realizadas con la técnica termográfica.

En este trabajo se presenta un sistema móvil rodado de adquisición termográfica-GPR para la detección de minas enterradas, con diversas dimensiones y profundidades. Se trata de un estudio preliminar, con el objetivo de validar la técnica de la termografía para esta aplicación, a través de la comparación de resultados con aquellos obtenidos con el contrastado GPR.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. Sistema móvil rodado de adquisición termográfica-GPR

Con el objetivo de realizar una inspección termográfica continua y controlada en el área sobre la que se quiera conocer la presencia de UXOs enterrados, se diseña un sistema móvil rodado, que se muestra en la Figura 1. El sistema móvil rodado tiene como base una plataforma con 4 ruedas y un mástil que permite el empuje y guiado de la misma. En su parte delantera, una estructura de aluminio sirve de soporte para 2 lámparas flash de 1500 W cada una, encargadas de la estimulación térmica del terreno. Sobre el mástil de guiado, y centrada con respecto de las lámparas, se coloca la cámara termográfica, mirando hacia atrás de modo que la inspección se realice de la zona previamente calentada. La cámara termográfica escogida es de la marca Xenics©, modelo Gobi384 Scientific, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 1. Sobre la plataforma rodada se coloca la antena GPR, de manera que se desplace lo más cercana al terreno inspeccionado posible, minimizando pérdidas de la señal por la presencia excesiva de aire. Por otra parte, el control de la adquisición se realiza desde un ordenador portátil, colocado en la parte superior del mástil de guiado, gracias a la previa colocación en el mismo de una plataforma metálica para tal propósito. Finalmente, la alimentación tanto del sistema (lámparas y cámara termográfica) como del sensor GPR se realiza desde batería, contando este último con baterías propias, de modo que su alimentación es independiente.

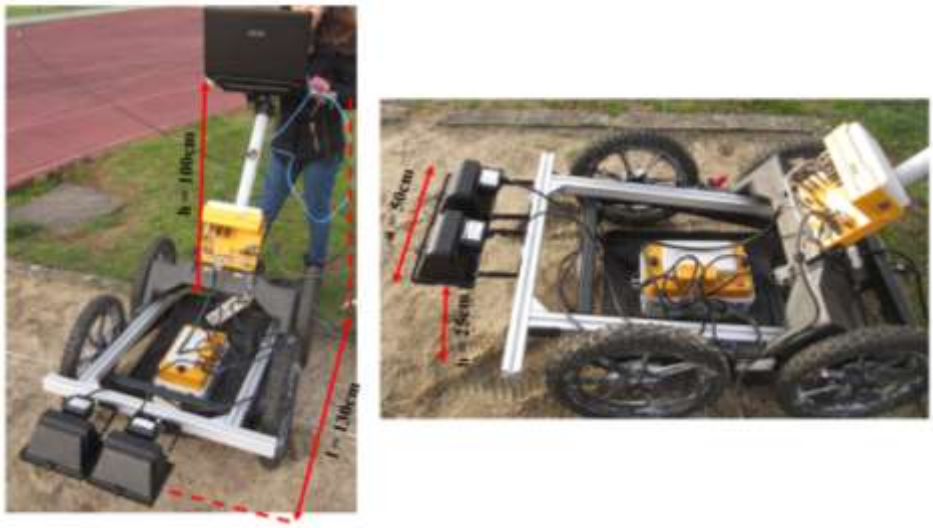


Figura 1. Sistema móvil rodado de inspección termográfica y GPR de terrenos. El término h representa altura (de la cámara y de las lámparas, a izquierda y derecha, respectivamente); l representa longitud del carro, y a, anchura de las lámparas teniendo en cuenta el espacio de separación entre ellas.

Tipo de sensor	Microbolómetros no refrigerados (Si amorfo)
Banda espectral	8 – 14 µm
Tamaño del sensor	384 x 288
Sensibilidad térmica	0.05ºC a 30ºC
Frecuencia de adquisición	25 Hz en modo de 16 bits

Tabla 1. Características técnicas de la cámara termográfica Gobi384 Scientific.

2.2. Adquisición de datos

El comportamiento del sistema se comprueba mediante su aplicación a la detección de UXOs y otros objetos enterrados bajo un terreno compuesto principalmente por material tamaño arena, a distintas profundidades. Se trabaja con UXOs de diferentes tamaños (minas antitanque y minas antipersona), así como con elementos de otros materiales como madera, plástico y lata, para evaluar las capacidades del sistema. En concreto, los UXOs enterrados son minas antipersona italianas, SB33, y minas antitanque italianas, SB81, hechas de material plástico, principalmente neopreno, que absorbe elementos del entorno para facilitar su camuflaje, así como facilitar el proceso de detonación [7]. Las características de cada material y las condiciones de su enterramiento se muestran en la Tabla 2.

ELEMENTO	POSICIÓN ENTER.	PROFUNDIDAD	DIMENSIONES	k (W/mK)
Mina AT 1	Oblicua	5cm	230 x 90mm	0.23
Mina AT 2	Horizontal	4.5cm	230 x 90mm	0.23
Mina AP 1	Horizontal	1cm	87 x 36mm	0.23
Mina AP 2	Oblicua	1cm	87 x 36mm	0.23
Mina AP 3	Horizontal	3cm	87 x 36mm	0.23
Mina AP 4	Oblicua	2.5cm	87 x 36mm	0.23
Lata de aluminio	---	2cm	64 x 10 mm	230
Piedra	Horizontal	1cm	80 x 80 mm	2.30
Piedra	Oblicua	2.5cm	90 x 50 mm	2.30
Botella PET		1cm	80 x 50 mm	0.20
Madera	Horizontal	1.8cm	100 x 20 mm	0.13

Tabla 2. Conductividad térmica de los distintos materiales evaluados. Fuente: [8]

La inspección del terreno se realiza un día de invierno, con ausencia de Sol, de modo que se evita la incidencia directa del mismo sobre el terreno inspeccionado y el consecuente calentamiento indeseado de la zona de estudio.

El desplazamiento del sistema rodado se realiza a una velocidad de 0.16m/s, de modo que, teniendo en cuenta la distancia entre el centro de las lámparas y la cámara termográfica (1.30m, como se muestra en la Figura 1), se trabaja con un tiempo de enfriamiento de 8s, pues éste es el tiempo transcurrido entre la incidencia de las lámparas en un punto del terreno hasta que la cámara termográfica capta la radiación infrarroja procedente de este terreno. Asimismo, se realizan inspecciones termográficas del terreno tanto con las lámparas apagadas como con ellas encendidas, de modo que se puedan descartar los efectos propios de terreno, tales como marcas de rodadura, presencia de elementos de tamaño distinto de arenas o de hojas, y zonas húmedas, a partir de las anomalías térmicas provocadas por la excitación térmica. La velocidad de adquisición de la cámara termográfica se establece en 37 frames/s, de modo que se obtenga información redundante del proceso. Se realizan pasadas con el sistema móvil rodado por encima de las tres líneas en las que se colocaron los elementos enterrados, a modo de malla.

Con respecto del GPR, se trabaja con el equipo MALA GeoScience, compuesto por una unidad de control y la antena emisora y receptora de señal. En este caso de estudio se trabajó con antenas de frecuencia 2.3 GHz y 800 MHz para la detección de minas antipersona y antitanque, respectivamente. Se utilizó una adquisición de datos 3D, con una separación entre trazas de 2 cm, siendo el espaciado entre perfiles de 5 cm. Para la medición de separación entre trazas se utilizó un odómetro acoplado a una de las ruedas del sistema rodado.

2.3. Procesado de datos

La detección de elementos enterrados a partir de los vídeos termográficos se basa en el calentamiento diferencial que se produce entre la zona con elemento y la zona sin ellos dada la diferente conductividad térmica de los defectos y el material que conforma el terreno. En el caso de estudio, se trabaja con defectos tipo UXO, así como con elementos de lata, plástico tipo PET, piedra y madera, consistiendo el terreno de estudio en material tipo arena. Las diferentes conductividades térmicas de los materiales en estudio se muestran en la Tabla 2. La distinción de los diferentes elementos, todos ellos de conductividad similar, se basa en la respuesta ante el calentamiento provocada de manera conjunta por el comportamiento del material y el tamaño del elemento.

Se procede por tanto al procesado de datos con la siguiente secuencia: primero, se analizan las temperaturas presentes en el vídeo, y se seleccionan aquellas que formen parte del percentil 80 del histograma de temperaturas como posibles defectos enterrados. A continuación, se refina la selección mediante la eliminación de aquellos candidatos a defecto enterrado con forma no adecuada, que se corresponden con marcas de rodadura que alcanzan un calentamiento diferente debido a la mayor distancia de su superficie a las lámparas. Una vez disponible el listado de elementos enterrados, el conocimiento del instante en que fueron adquiridos y de la velocidad de desplazamiento del sistema móvil rodado, resultará en la determinación relativa de los mismos.

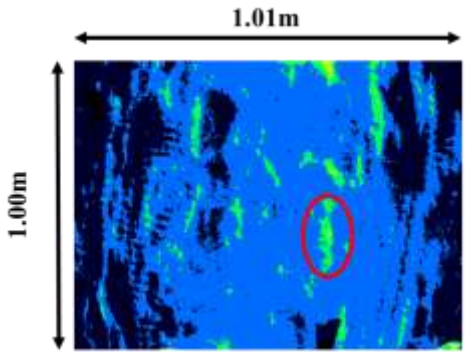
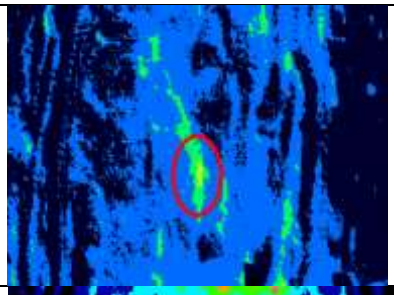
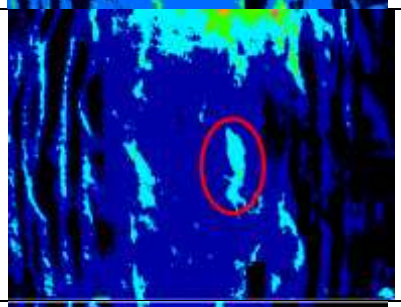
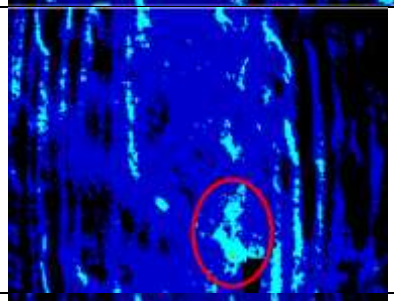
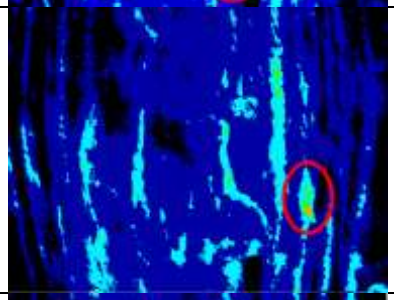
El procesado de los radargramas adquiridos mediante GPR consiste en aplicar filtros para la eliminación de ruido (background removal y filtro paso banda), así como ganancia para amplificar la señal y mitigar el efecto de atenuación de la misma. De esta manera, se consigue mejorar la imagen radar obtenida y potenciar así la detección de los elementos enterrados.

3. Resultados y Discusión

3.1. Detección termográfica de UXOs

La Tabla 3 muestra los elementos detectados, así como sus posiciones con respecto del inicio del recorrido en cada caso. Asimismo, la indicación del número de vídeos en los que se puede detectar cada elemento del total de vídeos en que podía ser detectado se usa como medida de la calidad de la huella térmica.

Dado que cada elemento puede ser detectado en más de un vídeo, su posición se calcula como el promedio de sus posiciones en cada vídeo, junto con un valor de dispersión en forma de desviación típica.

ELEMENTO	TERMOGRAFÍA	DISTANCIA A INICIO (m)	Nº VÍDEOS
Mina AT 1		2.66 ± 0.09	7/7
Mina AT 2		3.75 ± 0.10	6/7
Mina AP 1		1.58 ± 0.50	4/7
Mina AP 2		2.16 ± 0.60	5/7
Mina AP 3		2.60 ± 0.10	6/7
Mina AP 4		3.08 ± 0.08	4/7

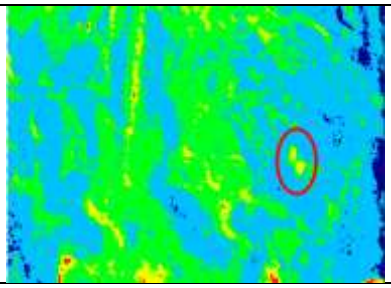
Lata de aluminio		2.18 ± 0.08	2/3

Tabla 3. Listado de elementos detectados, su naturaleza y posición con respecto del inicio de la inspección. Todas las termografías en escala entre 0 y 15º. Aquellos elementos no detectados en el proceso, no han sido incluidos en la tabla. Las huellas a alta temperatura que no han sido marcadas, son elementos descartados como defectos en el proceso de refinado.

Los elementos no detectados son la piedra colocada en posición oblicua, el material plástico PVC, y la madera. Todos ellos (salvo la piedra) son elementos de muy baja conductividad. La baja conductividad térmica, junto con su reducido tamaño, hacen que el calentamiento conseguido con la metodología aplicada no sea suficiente para su detección a partir del vídeo termográfico.

Cabe resaltar que, en el proceso de refinado, ha sido necesaria la eliminación de cierto número de anomalías térmicas, presentes en la inspección pero no asociadas a elementos enterrados. El caso más importante es el de la huella térmica presente al inicio de cada pasada (Figura 2, izquierda), debido al excesivo calentamiento provocado por las lámparas durante el momento de parada antes del arranque del sistema móvil. También hay que prestar atención a la presencia de elementos auxiliares colocados en el terreno en estudio para la orientación de los vídeos y las imágenes. En este caso, se detecta la presencia de una bobina de hilo, que facilita el guiado del sistema móvil rodado de inspección (Figura 2, derecha).

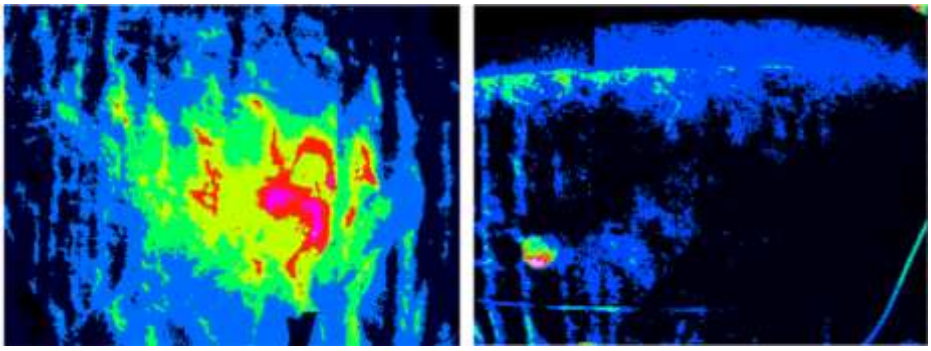


Figura 2. Elementos detectados como falsos elementos enterrados, retirados del procesamiento en el proceso de refinamiento.

3.2. Validación con GPR

Los mismos datos recogidos con termografía, se han registrado de manera simultánea con GPR. Puesto que el GPR es una técnica que ha demostrado su idoneidad en la detección de UXOs [10], el objetivo de esta integración es la de comparar la huella de detección obtenida con cada método para evaluar la efectividad de la termografía en la detección de minas.

La Figura 3 (izquierda) muestra una imagen GPR-3D generada a partir de datos de 800 MHz, indicando la presencia de las dos minas antitanque (AT 1 y AT 2) de la Tabla 2. Se aprecia claramente como la huella de la mina en posición oblicua (AT 1) es de menor tamaño que la dispuesta en horizontal (AT 2). En cuanto a las minas antipersona, la Figura 3 (derecha) presenta un comportamiento similar, donde la mina horizontal (AP 1) representa mayor superficie de detección y mayor contraste (intensidad o amplitud de reflexión) con el medio circundante en comparación con la mina dispuesta en oblicuo (AP 2).

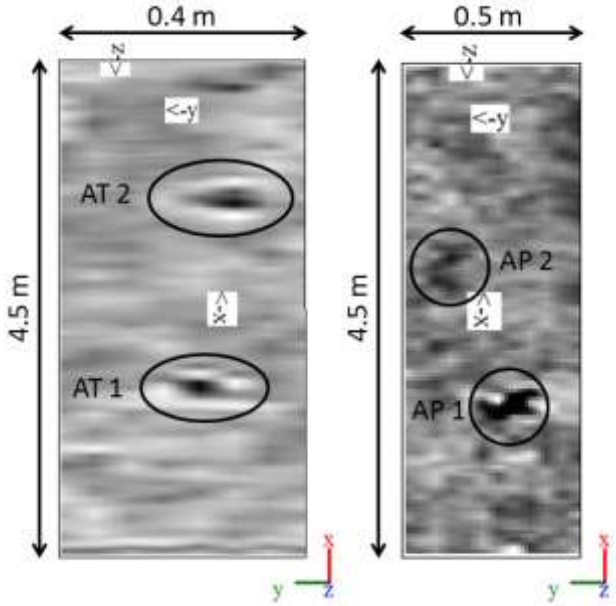


Figura 3. Resultados GPR-3D obtenidos con una antena de 2.3 GHz para minas antipersona (derecha) y una antena de 800 MHz para minas antitanque (izquierda).

4. Conclusiones

Se presenta en este trabajo una versión preliminar de sistema móvil rodado para inspección termográfica-GPR especialmente diseñado para la detección de UXOs enterrados. Los primeros ensayos realizados, recogidos en este trabajo, en los que se inspecciona la zona térmicamente excitada después de un tiempo de enfriamiento de 8s, han mostrado la capacidad de la técnica para la detección tanto de minas antitanque como de minas antipersona, siendo las primeras más fácilmente detectables. Esta diferencia se debe a que la detección termográfica depende de la huella térmica de los elementos, que será mayor cuanto mayor tamaño y menor profundidad presenten estos. Otro factor a tener en cuenta es la conductividad térmica del material que conforma los elementos, que facilita la detección de elementos de menor tamaño gracias a su gran diferencia de temperatura con respecto del entorno; este es el caso de la lata de aluminio enterrada, que ha sido igualmente detectada por la técnica, a pesar de su reducido tamaño. Por tanto, para la detección de UXOs enterrados y su identificación con respecto de otros objetos que puedan estar enterrados, será necesario evaluar tanto el tamaño de la huella térmica, como la temperatura máxima de la misma y su diferencia con la temperatura del entorno.

Los resultados de la técnica termográfica han sido validados mediante la técnica GPR, ampliamente consolidada para la detección de UXOs y otros elementos enterrados. De este modo, se verifica que los elementos detectados en las termografías e identificados como UXOs son realmente estos elementos.

Futuros trabajos se centrarán en la mejora del proceso, aumentando la probabilidad de detección de elementos y su identificación a partir de termografía. Asimismo, se tratará de explotar la geometría inherente a las imágenes, de modo que se puedan calcular las dimensiones del elemento a partir de su huella térmica. Este proceso requerirá a su vez el análisis preciso de las temperaturas y de las diferencias entre temperaturas de elemento y del fondo, haciendo posible la determinación de la profundidad de enterramiento.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Ministerio de Economía e Industria, y al CDTI (Gobierno de España) por el apoyo económico aportado a través de las ayudas para recursos humanos (FPDI-2013-17516) y proyectos (ENE2013-48015-C3-1-R). Todos los programas están cofinanciados por el Fondo Europeo para el Desarrollo Regional (FEDER).

Referencias

1. López, G.; Basterra, L.A.; Ramón-Cueto, G.; Diego, A.D. Detection of singularities and subsurface defects in Wood by infrared thermography. *International Journal of Architectural Heritage* **2014**, *8(4)*, 517-536.
2. Jiniong, G.; Junyan, L.; Fei, W.; Yang, W. Inverse heat transfer approach for nondestructive estimation the size and depth of subsurface defects of CFRP composite using lock-in thermography, *Infrared Physics and Technology* **2015**, *71*, 439-447.
3. Daniels, D.J.; Curtis, P.; Amin, R.; Hunt, N. MINEHOUND™ production development. In: *Proceedings of Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets X* **2005**; Volume 5794, pp. 488–494.
4. Tesfariam, G.T.; Mali, D. GPR technologies for landmine detection. *International Journal of Computer Science and Communication Technologies* **2012**, 5(1), 768-774.
5. Sato, M.; Kobayashi, T.; Takahashi, K.; Fujiwara, J.; Feng, X. Vehicle-mounted SAR-GPR and its evaluation. In: *Proceedings of Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets XI* **2006**; no. 62172H.
6. Daniels, D.J. A review of GPR landmine detection. *Sensing and Imaging: An International Journal* **2006**, *7(3)*, 90-123.
7. McLaren, E. Defensa de Puerto Argentino: Las minas AP y AT argentinas. El minado defensivo en la guerra de las Malvinas. 2013, Disponible en: http://fdra-malvinas.blogspot.com.es/2013/11/defensa-de-puerto-argentino-las-minas.html
8. CTE WEB. Disponible en: http://cte-web.iccl.es/materiales.php
9. Núñez-Nieto, X.; Solla, M.; Lorenzo, H. Applications of GPR for Humanitarian Assistance and Security. In *Civil Engineering Applications and Ground Penetrating Radar*; Benedetto, Pajewski, Eds.; Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering, 2015, pp. 301–326.

Aplicación del georradar para levantamientos batimétrico-fisiográficos en entornos de agua dulce

Solla Carracelas, Mercedes [1,*], Nodar Nodar, Juan Manuel [2], Nodar Nodar, Cristóbal [3] y Devesa Rey, Rosa [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar de Marín. Emails: merchisolla@cud.uvigo.es (M.S); rosa.devesa.rey@cud.uvigo.es (R.D)

[2] Exploraciones Subacuáticas del Noroeste (ESNW); Email: qxz.esnw@gmail.com (J.N)

[3] Project Baseline Fonte Cova; Email: projectbaselinefc@gmail.com (C.N)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; Email: merchisolla@cud.uvigo.es

Abstract: El georradar (GPR), es un método que se ha utilizado en diversos campos de estudio en concepto de Seguridad y Defensa, como la detección de minas y UXO, localización y caracterización de túneles, galerías, pasadizos y zulos subterráneos, rescate de seres vivos en zonas catastróficas, así como en levantamientos batimétricos en entornos de agua dulce. En este contexto, este trabajo presenta un caso de estudio de aplicabilidad del método GPR en cuanto a la obtención de cartografía batimétrica en una antigua mina de caolín (Fonte Cova, Coristanco, Galicia). Dentro de las iniciativas de conservación y exploración subacuática del Project Baseline Fonte Cova, se contempla el mapeado subacuático de la mina y su monitorización medioambiental. Se propone el GPR, como método de prospección del subsuelo de gran resolución y relativa rapidez, para la realización de un levantamiento fisiográfico del relieve de la misma. Para una determinación de profundidades con mayor precisión, se emplearon metodologías de laboratorio mediante análisis químico proporcionando así una correcta estimación de propiedades dieléctricas del agua y sedimentos lacustres, principalmente permitividad y conductividad. Dicho levantamiento fisiográfico ha permitido reconocer el subfondo del lago y su relieve. En concreto, el estudio GPR se llevó a cabo con una antena de 200 MHz de frecuencia central.

Keywords: GPR; lago; propiedades dieléctricas; batimetría; estudio fisiográfico

1. Introducción

El georradar o radar de penetración, internacionalmente conocido como GPR, es una técnica de prospección por radiofrecuencia, no destructiva, orientada al estudio del subsuelo superficial. El método se fundamenta en la capacidad de las ondas de radar de baja frecuencia (10 MHz – 2,5 GHz) para propagarse a través de medios poco conductivos. En la actualidad, su aplicación se presenta como una metodología prospectiva ampliamente reconocida dada su idoneidad en diversos campos de estudio: militar, arqueología, geología, glaciología, hidrología e ingeniería civil [1].

Uno de los campos en los que la técnica todavía no ha sido suficientemente desarrollada es en la realización de levantamientos batimétricos de entornos de agua dulce, como lagos y lagunas, embalses y ríos. La señal electromagnética no permite estudios batimétricos en masas de agua salada, pero sí se ha contrastado su gran utilidad en ambientes de agua dulce dada su transparencia a las ondas de radio, tal y como se muestra en algunos de los escasos trabajos de aplicación que se encuentran publicados [2-6]. El GPR es capaz de producir rápidamente mapas batimétricos de alta calidad y perfiles del subfondo, que documentan aspectos desconocidos para hidrólogos e ingenieros tales como volumen y profundidad de agua, así como la naturaleza estratigráfica y espesor de los sedimentos lacustres.

La toma de datos se realiza desde pequeños botes o balsas, y el equipo GPR puede llevar integrado un GPS para posicionamiento de los datos, lo cual permitirá reconstruir la trayectoria seguida y posteriormente elaborar la correspondiente cartografía o mapa batimétrico [7]. La importancia de las batimetrías radica principalmente en su uso para levantamientos hidrográficos para seguridad de la navegación, producción de modelos digitales del terreno (MDT) para el diseño de ingeniería (túneles, puentes, etc.), control de dragados, proyectos hidroeléctricos y estudios geotécnicos.

En este trabajo se presenta el estudio preliminar de la mina Fonte Cova mediante el empleo de una antena GPR de 200 MHz de frecuencia central. Para ello se diseñó un catamarán que permitiese introducir el equipo en el lago, y se tomaron una serie de perfiles aleatorios. El objetivo principal era el reconocimiento del estado actual del relieve y subfondo de la mina. Con este propósito se determinaron los parámetros dieléctricos del medio acuoso, en presencia de distintos sedimentos lacustres, obteniendo así una velocidad promedio de propagación de la señal. Dicha determinación de parámetros dieléctricos se hizo a partir de análisis químicos en laboratorio, y constituye el proceso fundamental para determinar de manera más correcta la profundidad de la columna de agua.

2. Materiales y Métodos.

2.1. Project Baseline y la mina Fonte Cova

Project Baseline es una iniciativa de la Global Underwater Explorers (GUE) encaminada a estudiar y proteger los ambientes acuáticos de todo el Mundo. Mediante la acción voluntaria y desinteresada de gente de diferentes lugares del Planeta, Project Baseline [8] recopila datos acerca de los principales medios acuáticos, para estudiar a lo largo del tiempo las variaciones de las condiciones ambientales en los mismos.

Fonte Cova es una mina de caolín a cielo abierto, situada en Coristanco (A Coruña – Galicia, España). La abundancia de manantiales naturales en la zona hizo que tras el cese de su explotación el agua ocupase toda su superficie (Figura 1). Esta mina no recibió ningún tratamiento medioambiental

tras su abandono, antes de quedar inundada, lo que motiva a monitorizar las condiciones del agua y caracterizar los tipos de sedimentos lacustres en el subfondo y espesores.

Hasta el momento, Project Baseline Fonte Cova cuenta con dos estaciones de medición, en las que se toman datos de forma periódica: visibilidad, temperatura y pH. Además, la propia base de cada estación, al estar escalada, nos sirve de guía para monitorizar las variaciones del sedimento en el fondo del lago.

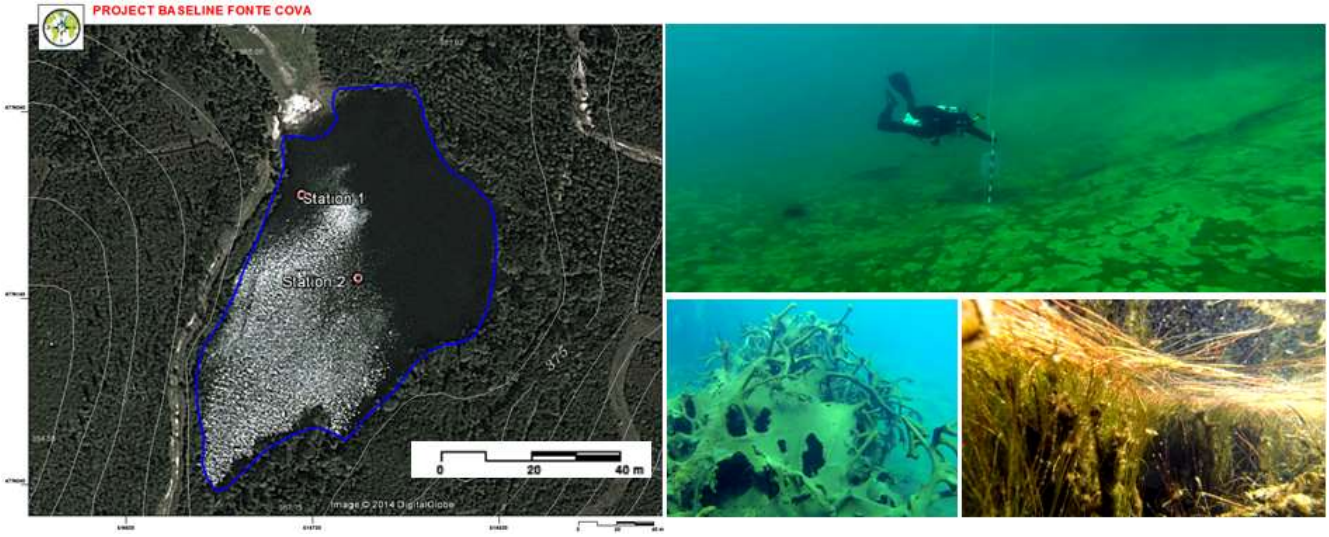


Figura 1. Mina Fonte Cova: extensión y fotografías de detalle del fondo del lago.

2.2. Metodología para la adquisición de datos GPR

2.2.1. Breve introducción al método

Para garantizar la efectividad de la técnica en un determinado entorno, será necesario que se den, de forma simultánea, dos factores externos e independientes del sistema y del equipo humano que lo maneje: que exista suficiente contraste electromagnético entre dos medios consecutivos y, sobre todo, que el medio de propagación sea suficientemente resistivo para no atenuar dramáticamente la señal emitida. El pulso emitido se reflejará cuando detecte una discontinuidad electromagnética (por ejemplo, un cambio en las propiedades del medio de propagación o una capa de material diferente).

Una antena GPR está formada por un dipolo transmisor y un dipolo receptor. La adquisición de datos con el georradar suele realizarse orientando la antena hacia el subsuelo y registrando las reflexiones detectadas tras la emisión del impulso electromagnético, por parte del dipolo transmisor, obteniendo así una traza (que registra el dipolo receptor). Al desplazar la antena sobre la superficie del terreno, se irán detectando y almacenando el conjunto de reflexiones existentes bajo la línea de desplazamiento de la antena. De esta forma, el eje de abscisas de los radargramas, o registros georradar, representará el movimiento de la antena en una determinada dirección, mientras que el eje de ordenadas muestra el tiempo de retardo (twt) entre la emisión del pulso y la detección de las reflexiones en la superficie por parte de una antena receptora, siendo este, por lo tanto, un viaje de ida y vuelta. Si la velocidad (v) de propagación de las ondas en el medio es conocida, el eje temporal de ordenadas puede ser trasformado a profundidades (z) a través de la simple relación (1).

$$z = v\frac{twt}{2} \tag{1}$$

Por su parte, la velocidad puede ser deducida a partir de la siguiente ecuación:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2}$$

Donde c es la velocidad de propagación de las ondas en el vacío y ε_r es la permitividad relativa del medio de propagación (variando entre 1-81). Dicha velocidad oscila entre los 0,3 m/ns (aire) y los 0,03 m/ns (agua dulce).

2.2.2. Adquisición de datos en campo

Para la toma de datos se empleó un sistema RAMAC-GPR de la marca Malå Geoscience con una antena no apantallada de 200 MHz de frecuencia central y separación de 0.6 m entre dipolo receptor y transmisor. Se utilizó una adquisición de datos por tiempos, y los parámetros establecidos fueron una separación entre trazas de 0,02 s. y ventana de tiempos de 280 ns. Tiendo en cuenta una velocidad estándar de propagación de la señal radar en agua dulce de 0.03 m/ns, mediante la ecuación (1), con esta ventana de tiempos se alcanzaría una profundidad de muestreo de aproximadamente 4 m.

Para remolcar la antena sobre la superficie del agua, se diseñó un catamarán (Figura 2) en base a material plástico, evitando así el uso de componentes metálicos que interfiriesen en la señal.



Figura 2. Antena no apantallada de 200 MHz utilizada para la adquisición de datos y catamarán construido para su remolque.

2.3. Análisis químico y determinación de propiedades dieléctricas

Se tomaron dos muestras en el fondo de la mina, una de sedimento y otra a más profundidad de material caolín (Figura 3), para determinar, mediante análisis químico en laboratorio, la composición de dichos sedimentos lacustres y sus propiedades dieléctricas (permitividad y conductividad) que influyen en la propagación de la señal electromagnética.



Figura 3. Muestras tomadas en el fondo del lago: muestra 01-sedimento y muestra 02-caolín.

De los resultados obtenidos (Tabla 1) se concluye que se trata de suelos de color blanco-amarillento, untuosos al tacto, desarrollados sobre suelo básico, de tipo caolinítico. La muestra 01 presenta un biofilm de importante componente autótrofo. Presenta una distribución promedio de tamaño de partícula fina, con un 86,9% de partículas <63 µm y, por lo tanto, un porcentaje de 11,3% de contenido en arenas. Las muestras presentan un predominio absoluto de minerales básicos, principalmente caolinita y vermiculita, minerales heredados o transformados a partir de las rocas de la cuenca. La caolinita se origina principalmente por la destrucción de feldespatos alcalinos bajo condiciones ácidas. La vermiculita parece que se forma principalmente como resultado de la alteración de escamas de biotita o, más raramente, de clorita, hornblenda, etc. El pH de las muestras presenta un valor promedio de 6,6.

Se analizaron también las propiedades dieléctricas del agua contenida en cada una de las muestras, para posteriormente convertir, con mayor precisión, los tiempos dobles de propagación de la señal en profundidades. Para medir la permitividad se utilizó un analizador de red HP–8752A, en conjunción con una sonda de terminación coaxial HP–85070A.

Muestras	**01**	**02**
Mineralogía	Caolinita ++++ Vermiculita +++	Caolinita ++++ Vermiculita +++
Granulometría (%<63 µm)	85,2	88,6
pH	6,5	6,7
Contenido en fitopigmentos (µg/g)	Clorofila-a: 63,4 Clorofila-b: 47,4 Carotenoides totales: 19,4	Clorofila-a: <I.d. Clorofila-b: <I.d. Carotenoides totales: <I.d.
Permitividad (agua)	76	77
Permitividad relativa	7,7	7,9
Conductividad (µS/cm)	17,6	17,8

++++ > 50%; +++ 30-50%

Tabla 1. Resultados de composición y estimación de propiedades dieléctricas obtenidos mediante análisis químico en laboratorio.

2.4. Procesado de datos GPR

Previo a la interpretación de los perfiles de reflexión obtenidos (o radargramas), los datos brutos fueron procesados con el fin de mejorar dicha imagen. Se utilizó el software de procesado de datos GPR-2D ReflexW [9], aplicando la siguiente secuencia de filtrado:

a) Establecimiento del tiempo cero. Para evitar derivas térmicas, la inestabilidad, la diferencia de longitudes de los cables electrónicos o las variaciones del espacio de aire entre la antena y la superficie del suelo, causando "saltos" en el registro inicial de la señal. Dicha corrección es necesaria para un cálculo correcto de la profundidad a la que se sitúan los diferentes eventos registrados.

b) Filtro de frecuencia vertical / dewow. Es común la aparición de una componente continua de baja frecuencia en las trazas registradas porque el nivel promediado de la señal sufre un desplazamiento de amplitud cero a un valor diferente. Dicho efecto está asociado con fenómenos de inducción o generalmente a posibles limitaciones instrumentales del sistema dentro del rango dinámico.

c) Amplificación de la señal / ganancia. Consiste en amplificar la señal recibida a partir de una función matemática exponencial. Lo que buscamos es contrarrestar el efecto producido por la atenuación geométrica de la onda en su propagación y por las características electromagnéticas que tengan los materiales del subsuelo. A mayor profundidad mayor atenuación, por lo que aplicamos una función ganancial dependiente del tiempo.

d) Filtros de frecuencia horizontal / Subtracting average. La función principal de este filtro es eliminar el ruido de baja frecuencia que aparece en forma de bandas horizontales continuas a lo largo de todo el radargrama (conjunto de trazas del perfil). Es decir, se intenta estimar un promedio de todas las trazas y eliminarlo de cada una de ellas. Además, son óptimos para eliminar todo aquel ruido que es originado por el mal acoplamiento entre la antena y el medio, y también para disminuir las posibles reverberaciones de la señal.

Para convertir el eje vertical temporal en profundidades (Ecuación (1)) se tuvo en cuenta una velocidad de propagación en agua de 0,034 m/ns. Para su cálculo, mediante la Ecuación (2), se consideró el valor promedio de la permitividad del agua contenida en las muestras sustraídas (Tabla 1).

3. Resultados y Discusión

Observando algunos de los radargramas obtenidos, una vez procesados (Figura 4), se ha podido distinguir tanto la reflexión de la lámina de agua como del lecho del lago, lo que ha permitido determinar la columna de agua a lo largo de dichos perfiles de reflexión. Dentro del subfondo (Figura 4–A,B,C), se identifica también el distinto patrón de reflexiones producido por la presencia de estructura rocosa/maciza (más homogéneo y con presencia de reflexiones hiperbólicas) y capas de sedimento (reflexiones planas). También destacan las pequeñas reflexiones hiperbólicas detectadas sobre el lecho del lago generadas por la vegetación existente en el fondo del mismo. Sin embargo, para el medio de estudio, el alcance en profundidad para dicha frecuencia se encontró limitado a de 4 m, y algunas zonas han quedado sin mapear. La Figura 5 muestra un radargrama cuyo perfil se extiende desde el centro del lago hacia el exterior (orilla). Mediante inspección subacuática se determinó una profundidad máxima de aproximadamente 9 m en el centro del lago. De esta manera, si se requiere de mayor penetración, se deberían emplear antenas de menor frecuencia en el rango de 100 –25 MHz.

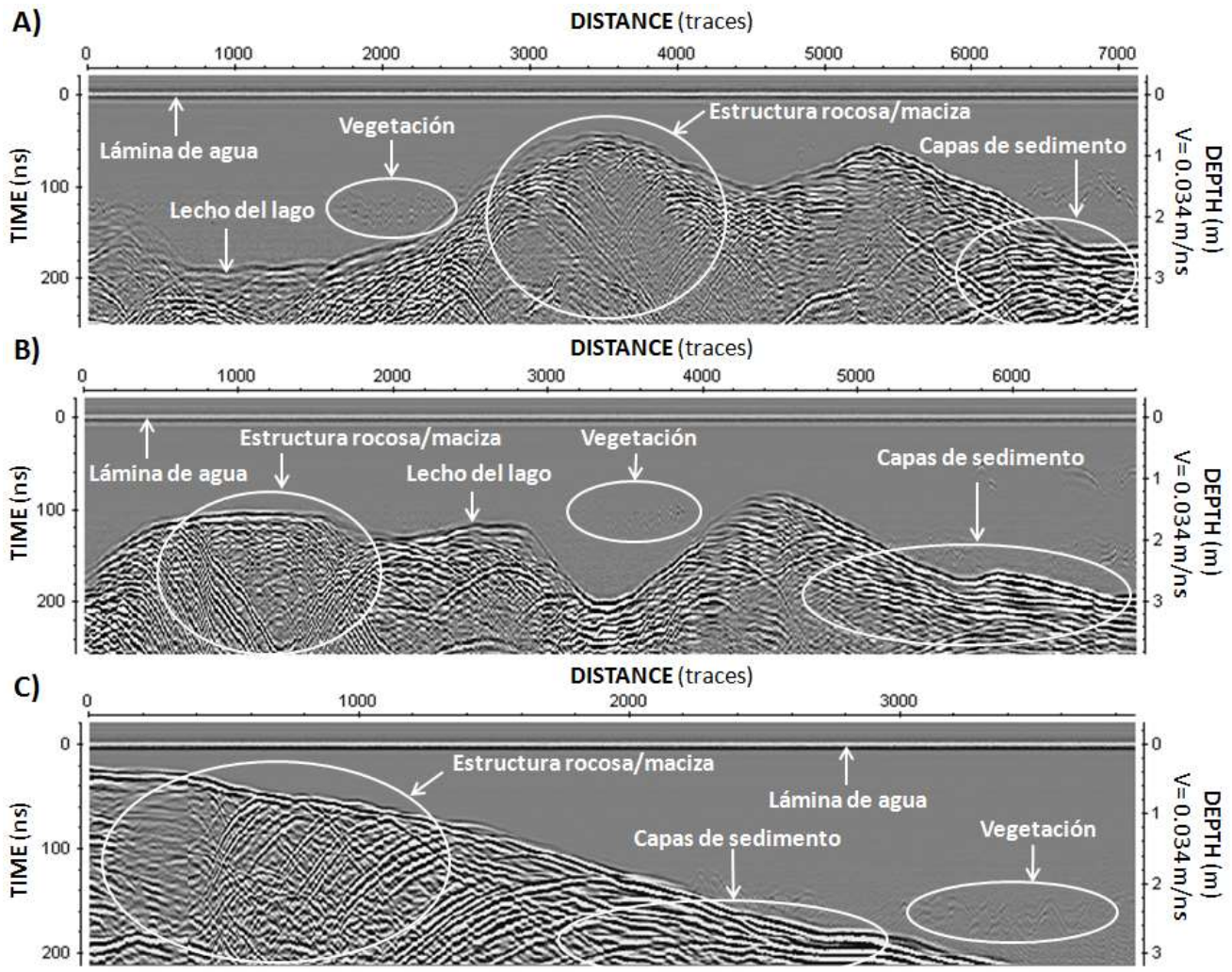


Figura 4. Ejemplo de radargramas obtenidos e interpretación de los reflectores principales.

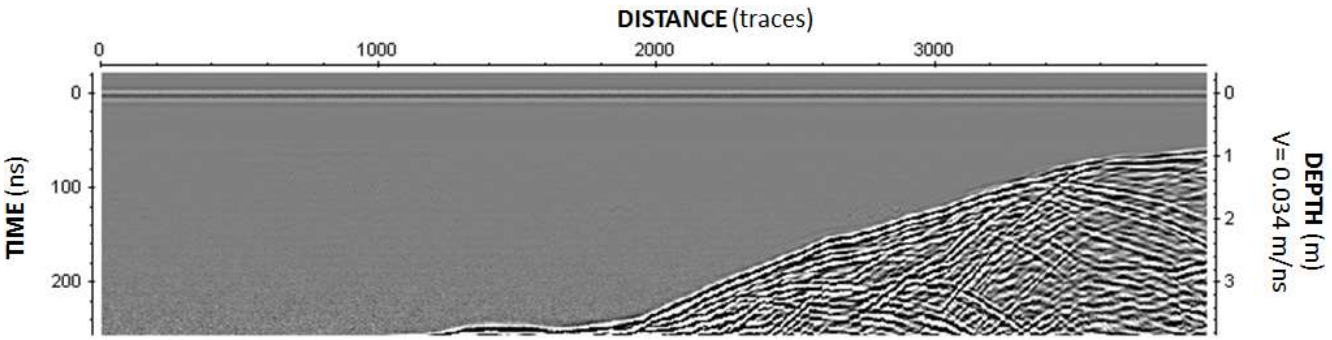


Figura 5. Ejemplo de radargramas mostrando el límite de alcance para la antena (200 MHz) utilizada.

4. Conclusiones

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio preliminar para elaboración de cartografía batimétrica en el lago de la mina de Fonte Cova mediante georradar. Se empleó una antena de 200 MHz de frecuencia central. Los radargramas obtenidos han permitido reconstruir el fondo del lecho del lago, diferenciando claramente las zonas vegetales, e incluso penetrando en suelo pudiendo observarse la composición del mismo y las distintas capas de sedimentos del subfondo.

El empleo de este sistema permitió automatizar el proceso de medición y conseguir resultados más precisos, demostrando la utilidad del método frente a otros métodos tradicionales de muestreo de puntos individuales. De este modo, la actual monitorización de variaciones de sedimento que se está realizando en la mina por comparativa temporal en base a las escalas presentes en las estaciones colocadas, se podría sustituir por mediciones GPR en intervalos regulares de tiempo y sobre ciertos puntos concretos de la superficie del lago. En concreto, se ha diseñado un dispositivo adecuado para la utilización de la antena de 200 MHz en zonas lacustres. Sin embargo, la frecuencia utilizada no ha sido suficientemente baja como para mapear el subfondo en algunas zonas de la mina, llegando solo hasta los 4 m de profundidad sin alcanzar el máximo calado de la mina, de unos 9 m. En futuros trabajos, se diseñará por tanto un nuevo catamarán que soporte la integración de una antena de 100 MHz de frecuencia central, la cual permitiría alcanzar hasta 9-10 m de profundidad en un medio de agua dulce.

Asimismo, para la elaboración de una carta batimétrica, se tendrá en cuenta la adquisición integrada de datos GPR-GPS. De este modo, cada una de las trazas georradar obtenidas, se registrará con su posición absoluta. Se realizará un barrido de toda la superficie del lago, intentando registrar el mayor número de datos posibles que permita reconstruir el relieve del lecho con mayor aproximación a la realidad. Conociendo la posición GPS de distintas trazas, y la profundidad del lecho del lago en cada una de ellas por conversión de la escala de tiempos, mediante software específico se construirá un modelo digital del terreno y posterior batimetría.

Referencias

1. Daniels, D.J. *Ground penetrating radar*. Institution of Electrical Engineering, 2004, London.
2. Moorman, B.J.; Michel, F.A. Bathymetric mapping and sub-bottom profiling through lake ice with ground-penetrating radar. *Journal of Paleolimnology* **1997**, 18(1), 61–73.
3. Lin, Y.T.; Schuettpelz, C.C.; Wu, Ch.; Fratta, D. A combined acoustic and electromagnetic wave-based techniques for bathymetry and subbottom profiling in shallow waters. *Journal of Applied Geophysics* **2009**, 68(2), 203–218.
4. Sambuelli, L.; Comina, C.; Bava S., Piatti, C. Magnetic, electrical, and GPR waterborne surveys of moraine deposits beneath a lake: A case history from Turin, Italy. *Geophysics* **2011**, 76(6), B213–B224.
5. Khare, N.; Chaturvedi, S.K.; Asthana, R.; Beg, M.J. Continuous Bathymetric Profiling Survey in Priyadarshini Water Body of Schirmacher Oasis, Central Dronning Maud Land, Antarctica using Echo Sounder and Ground Penetrating Radar: A Comparison. *International Journal of Earth Sciences and Engineering* **2012**, 5(1), 30–34.
6. Chanu, S.R.; Chingkhei, R.K.; Sanoujam, M.; Kumar, A. Lake sediment thickness estimation using ground penetrating radar. *International Journal of Research in Engineering and Technology* **2014**, 3(9), 42–46.
7. Sambuelli, L.; Bava, S. Case study: A GPR survey on a morainic lake in northern Italy for bathymetry, water volume and sediment characterization. *Journal of Applied Geophysics* **2012**, 81, 48–56.
8. Project Baseline <www.projectbaseline.org>.
9. Sandmeier, K.J. ReflexW v7.5 Manual <http://www.sandmeier-geo.de/reflexw.html> .

Monitorización costera empleando sistemas LiDAR en embarcaciones

González-Jorge, Higinio [1,*], Díaz-Vilariño, Lucía [2], Bueno, Martin [3] y Arias, Pedro [4]

[1] Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Campus Lagoas s/n, Universidade de Vigo, 36310, Vigo. Email: higiniog@uvigo.es
[2] Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Campus Lagoas s/n, Universidade de Vigo, 36310, Vigo. Email: lucia@uvigo.es
[3] Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Campus Lagoas s/n, Universidade de Vigo, 36310, Vigo. Email: mbueno@uvigo.es
[4] Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Campus Lagoas s/n, Universidade de Vigo, 36310, Vigo. Email: parias@uvigo.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo.

Abstract: El propósito del presente trabajo es cuantificar las limitaciones de los sistemas LiDAR móviles trabajando en embarcaciones para monitorizar estructuras costeras. El sistema LiDAR utilizado es un Optech Lynx Mobile Mapper embarcado en un Rodman 810. El Lynx provee como resultado una nube de puntos georreferenciada del entorno. El estudio métrico realizado se centra en la medida de errores en la determinación de la longitud, en la medición de coordenadas absolutas, el cálculo de la precisión, la medida de la resolución del sistema, así como la calidad en la triangulación de las superficies. Los resultados muestran errores menores que 0.09 m en la medida de distancias. Las coordenadas absolutas muestran errores menores que 0.12 m en el plano horizontal y 0.18 m en el vertical. El análisis de precisión a partir del sistema LiDAR muestra valores de hasta 0.055 m. La resolución obtenida a partir del sistema móvil resulta en aproximadamente 300 puntos por metro cuadrado. Si se compara el modelo de superficies triangulado obtenido por el sistema LiDAR móvil con un modelo obtenido por un sistema LiDAR terrestre estático, se puede observar que la desviación estándar de las distancias entre cada uno de los modelos es de 0.064 m.

Keywords: LiDAR móvil; estructuras costeras; hidrografía, topografía, geomática

---

1. Introducción

Las áreas costeras son regiones de transición entre los sistemas marinos y terrestres. Son sistemas muy dinámicos sujetos a evolución y cambios, que además están muy influenciados por la actividad humana. Las regiones costeras muestras áreas naturales con procesos erosivos y sedimentarios como son por ejemplo las playas o los acantilados, así como zonas en las que el espacio se adapta a las necesidades humanas, como en los diques portuarios o muelles. Las regiones costeras reciben gran cantidad de energía de las corrientes marinas, las olas y el viento, especialmente durante los periodos tormentosos. Esta energía contribuye a que se produzcan cambios en la línea de costa que puede derivar por ejemplo en el colapso de acantilados, pérdidas de arena en playas o fallos en las estructuras costeras. El control preciso de la geomorfología costera resulta fundamental para monitorizar cualquier cambio que pueda ocurrir y definir la acción correctora necesaria, antes de que se pueda desencadenar un desastre [1 – 5].

A priori, un sistema LiDAR móvil puede utilizarse en embarcaciones [6] para determinar la topografía de la zona costera emergida con una productividad muy elevada. Para ello, el sistema LiDAR debe integrar sensores inerciales de alta capacidad que le permitan obtener los cambios de orientación debido a la presencia de oleaje. A pesar de la potencial aplicabilidad de esta tecnología, no se han realizado todavía estudios métricos que determinen si un sistema móvil diseñado para su uso en vehículos terrestres como todoterrenos o dresinas funcionaría de forma adecuada en una embarcación. El entorno marino resulta sustancialmente diferente a una carretera o una vía férrea. Un vehículo todoterreno circulando por una carretera produce vibraciones de frecuencia elevada y baja amplitud derivadas de las vibraciones intrínsecas del motor y de la fricción entre las ruedas y la calzada [7, 8]. Sin embargo, una embarcación está sometida a oscilaciones de alta amplitud y baja frecuencia derivadas del oleaje. Otro aspecto a considerar es que la reflectividad del haz láser del LiDAR depende del rango y de la superficie del material [9]. En los ambientes costeros, la parte emergida de las estructuras se encuentra en muchas ocasiones húmeda, lo que afecta a la reflectividad del LiDAR.

El propósito del presente trabajo consiste en cuantificar las limitaciones de un sistema LiDAR móvil trabajando en una embarcación y definir con exactitud su capacidad para monitorizar estructuras costeras. El trabajo se estructura de la siguiente forma: la sección 2 muestra los materiales y métodos utilizados, la sección 3 los resultados y discusión y la sección 4 las conclusiones.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. Sistemas LiDAR

El sistema LiDAR móvil utilizado se ha instalado en la lancha Kraken (Figura 1). Esta lancha está dedicada a dar soporte a las actividades de investigación marina en la Universidad de Vigo. El Kraken es un crucero Rodman 810 con 8.7 m de eslora, 2.98 m de eslora y 5.1 Tm de peso. El ensamblaje del LiDAR a la embarcación se realiza a través de una plataforma específicamente diseñada para tal efecto.

El sistema LiDAR es un Optech Lynx Mobile Mapper que consiste en dos láser escáner de 500 kHz (pulse repetition rate) y 200 Hz de frecuencia de rotación del espejo, 2 antenas GNSS y una unidad inercial Applanix (POS LV520). El Optech Lynx muestra un rango máximo de 200 m (20 % de

reflectividad). La precisión en la medida de rango es de 7 mm y el error absoluto de 5 cm. Este error absoluto asume la existencia de buena señal GNSS con PDOP menor de 2.5 y modo PPK. Estos valores proveídos por el fabricante han sido corroborados en varias publicaciones [10], aunque las pruebas fueron realizadas sobre vehículos terrestres y no sobre una embarcación.



Figura 1. Crucero Kraken y sistema Optech Lynx Mobile Mapper sobre cubierta.

Se utiliza también un sistema LiDAR terrestre estático para comparar los resultados obtenidos por el sistema móvil (Figura 2). El sistema utilizado es un Riegl LMS Z390i. El escáner LiDAR utiliza un espejo rotatorio para sus mediciones en el ángulo vertical, con un rango de 80º, y un servomotor para el escaneo horizontal con un rango de 360º. El principio de medida se basa en la medición por tiempo de vuelo, el mismo utilizado por el sistema Optech Lynx. Las precisiones del fabricante muestran una precisión de 6 mm, con una frecuencia de medición de 11 kHz. La georreferenciación de los datos se ha realizado empleando el sistema GNSS Settop AL102.



Figura 2. Sistema LiDAR terrestre LMS Z390i durante el levantamiento del dique rompeolas de Bouzas en el Puerto de Vigo.

2.2. Metodología

La metodología se divide en tres partes principales: adquisición de datos, procesado y análisis.

2.2.1. Adquisición de datos

El área elegida para la adquisición de datos es el dique rompeolas de Bouzas en el Puerto de Vigo (Figura 2). Esta área está formada por un rompeolas de roca, un paseo peatonal y un área industrial que funciona como aparcamiento para la exportación de vehículos de la planta de automoción PSA Citroën presente en la ciudad. El sistema Kraken ha navegado a una velocidad constate aproximada de 5 nudos a una distancia de 30 metros del dique. El sistema GNSS ha mantenido un PDOP por debajo de 2.5 durante todo el levantamiento. En lo que respecta al sistema LiDAR terrestre, la adquisición requiere el uso de 6 estaciones para completar una nube de puntos densa después de un proceso de registro.

2.2.2. Procesado de datos

El procesado de datos a partir del sistema Lynx Mobile Mapper se realiza en post-proceso usando correcciones de una estación GNSS situada en la ciudad de Vigo, gestionada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). Al finalizar este proceso se obtiene una nube de puntos georreferenciada (UTM – WGS84).

Los datos generados por el sistema LiDAR terrestre sufren dos procesos de registro antes de realizar la comparativa con los datos del sistema LiDAR móvil. En un primer momento, el sistema de coordenadas de cada una de las estaciones base se transfiere al sistema de coordenadas de la primera estación. Las dianas situadas en la escena del levantamiento actúan como puntos de registro. El proceso de registro se realiza utilizando el software Riscan Pro. El segundo proceso de registro consiste en la georreferenciación de la nube de puntos a UTM – WGS84. Se utilizan puntos naturales medidos mediante el sistema Setop GNSS en modo RTK y nuevamente el software Riscan Pro. La Figura 3 muestra una de las nubes de puntos obtenida después del procesado de datos.

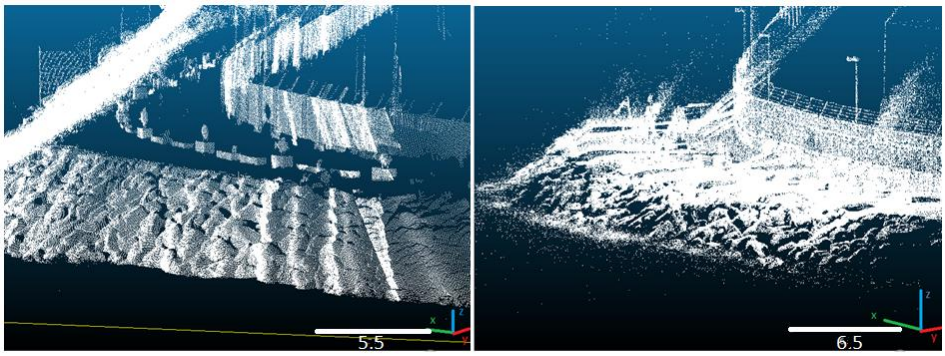


Figura 3. Ejemplo de nubes de puntos obtenidas. Optech Lynx Mobile Mapper (izquierda) y Riegl LMSZ390i (derecha).

2.2.3. Análisis de datos.

El análisis de los datos para evaluar la fiabilidad metrológica del sistema LiDAR embarcado consiste en los siguientes pasos a continuación descritos. Intentan representar algunas de las medidas típicas que se pueden realizar con sistemas LiDAR, como puede ser el inventario de una infraestructura o la detección de cambios geométricos derivados por ejemplo del movimiento de piezas en un dique rompeolas.

a) Error en medidas de longitud. El test compara diez mediciones de distancia realizadas con los sistemas terrestre y móvil. Los datos del escáner terrestre se eligen como verdad terreno en todas las

comparativas. El error se evalúa como la diferencia entre los datos móviles y terrestres. El software Riscan Pro se usa para medir los valores de longitud que van desde 3 m hasta 30 m.

b) Error en la posición absoluta. Las coordenadas de ocho blancos naturales se adquieren utilizando un sistema GNSS Settop en modo RTK, donde se comparan con el valor de los mismos puntos adquiridos en la nube de puntos del sistema LiDAR móvil. Los errores horizontales y verticales se calculan como la distancia geométrica entre las coordenadas tomadas por los dos sistemas.

c) Precisión. Se selecciona una superficie plana en un banco situado en la cercanía del paseo peatonal. Se realiza un ajuste por mínimos cuadrados para obtener las ecuaciones del plano en cada caso. A continuación se calcula la distancia de cada una de los puntos de la nube al plano de ajuste. La desviación estándar se calcula a partir de estos valores de distancia para proveer la precisión de los puntos.

d) Resolución. Se calcula a partir del dataset de puntos utilizado en el apartado c, relacionando el número de puntos y el área del plano. El área, tanto en el caso del sistema móvil como en el sistema terrestre, se evalúa empleando el software Riscan Pro.

e) Calidad en la triangulación de superficies. Primero, se obtiene una porción de nube de puntos a partir de la nube global del dique, medida con cada uno de los sistemas. A continuación se realiza un registro de las dos nubes de puntos utilizando un algoritmo tipo iterative closest point (ICP) utilizando el software Cloud Compare. El ICP minimiza la diferencia entre ambas nubes de puntos. A continuación se triangulan las dos nubes de puntos utilizando un modelo de superficies tipo TIN, que finalmente se rasteriza con una resolución de 5 cm. Una vez que la rasterización se finaliza, se evalúan las distancias verticales entre cada uno de los nodos del raster, mostrando los cambios obtenidos en la superficie evaluada.

3. Resultados y discusión

La Figura 4 muestra el error obtenido en la medición de longitud, que varía desde un mínimo de -0.07 m a un máximo de 0.09 m. La Figura 5 muestra el error en coordenadas absolutas. El error varía en este caso de 0.07 m – 0.12 m en el eje horizontal a 0.12 m – 0.18 m en el eje vertical. Los valores se muestran más elevados que las especificaciones técnicas mostradas por el fabricante que presenta errores máximos de 0.05 m. Esto resulta lógico, ya que las especificaciones técnicas provienen de mediciones realizadas en carreteras, no de mediciones realizadas en embarcaciones. La Figura 6 muestra las dos series de datos LiDAR utilizadas para evaluar la precisión. Las coordenadas UTM se trasladan a un sistema local de coordenadas con el origen en el mínimo de los valores de coordenadas para esta región de interés. No se aplica ninguna rotación. Se evalúa la desviación estándar para cada caso y se obtienen valores de 0.018 m para el sistema LiDAR terrestre y 0.055 m para el sistema móvil situado en la embarcación. La resolución muestra valores de 22.013 puntos / m^2 para el sistema LiDAR terrestre y 320 puntos / m^2 para el sistema móvil. La resolución del sistema móvil está limitada por muchos factores como la velocidad de la embarcación, la frecuencia del espejo, el pulse repetition rate y el rango. La Figura 7 muestra las diferencias obtenidas entre las superficies trianguladas. Se

puede observar que varían en un rango entre -0.15 m y 0.15 m La desviación estándar muestra un valor de 0.064 m.

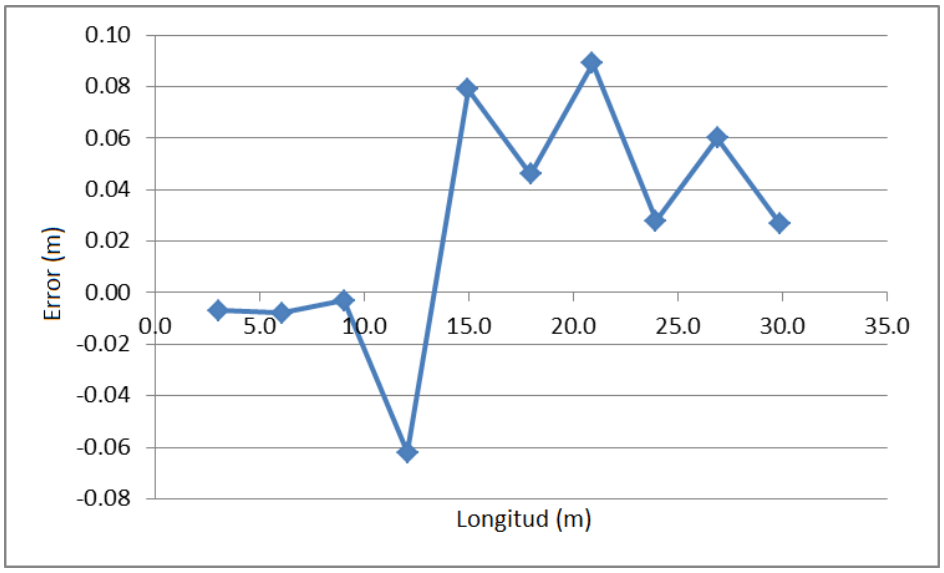


Figura 4. Error en la medición de longitud.

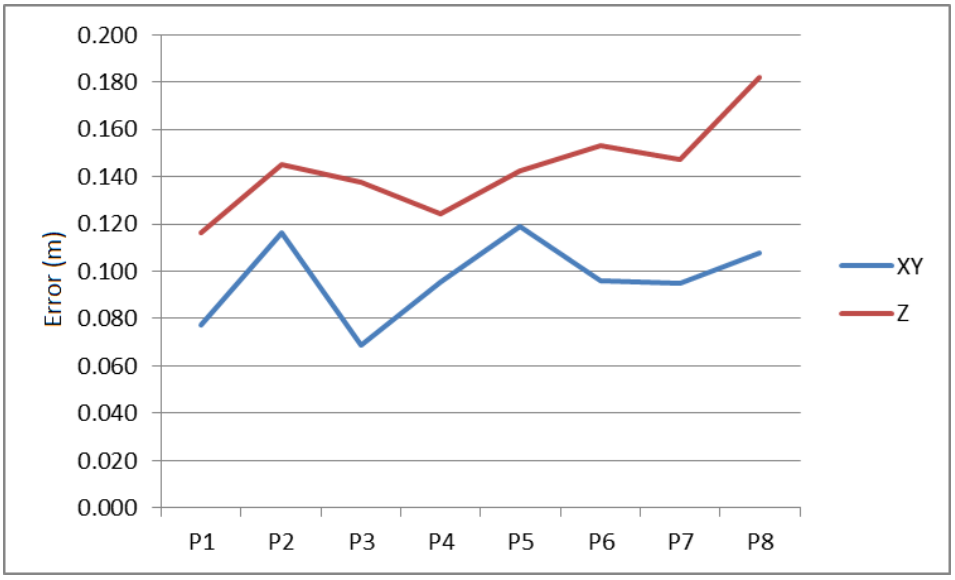


Figura 5. Error en coordenadas absolutas.

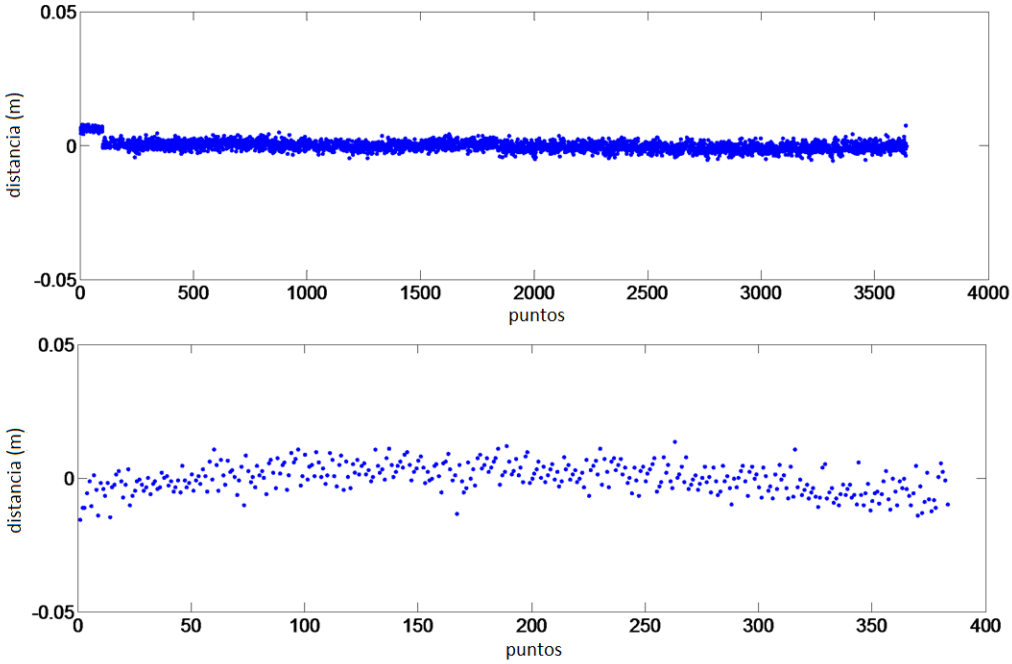


Figura 6. Precisión obtenida para el sistema terrestre (arriba) y móvil (abajo).

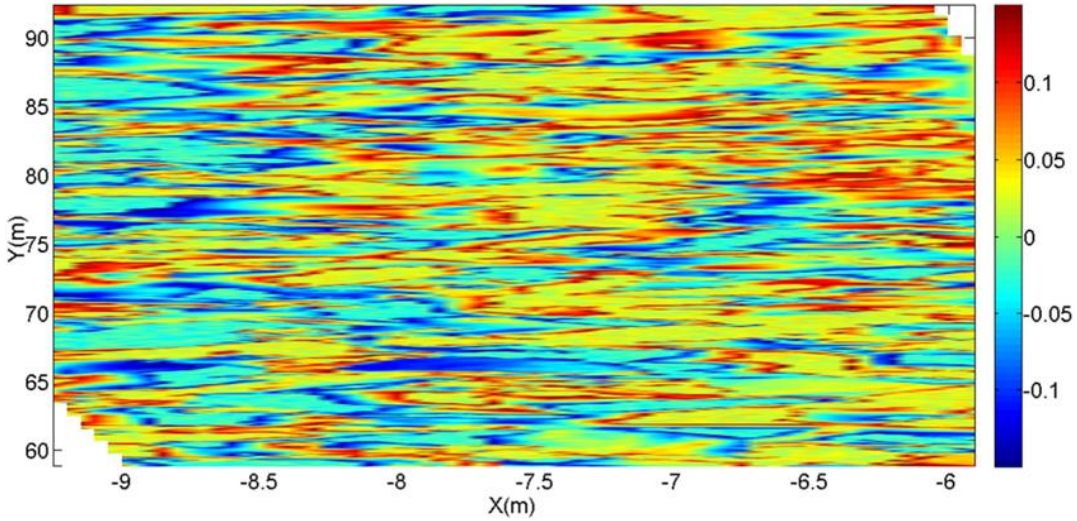


Figura 7. Calidad en la triangulación de las superficies.

4. Conclusiones

Se ha desarrollado una metodología para realizar mediciones en la zona emergida de una estructura costera utilizando un sistema LiDAR móvil instalado en una embarcación. Se evalúa la calidad de los resultados realizando una comparativa contra un sistema LiDAR terrestre.

El error en la medida de longitud muestra un valor máximo de 0.09 m y un rango máximo de 30 m. El error absoluto muestra un valor de hasta 0.12 m en la horizontal y 0.18 m en la vertical. La precisión

muestra valores de 0.055 m para el sistema LiDAR móvil, mientras que los resultados obtenidos para el sistema terrestre muestran 0.018 m. Todos los valores muestran resultados aceptables para la realización de inventarios en estructuras costeras, por ejemplo orientados a aplicaciones GIS. Sin embargo, si lo que se pretende es realizar mediciones orientadas a la realización de proyectos o inspecciones relacionadas con la ingeniería civil, las precisiones obtenidas pueden no resultar suficientes.

Aunque la resolución espacial de un sistema LiDAR móvil resulta mucho más baja que la obtenida por un sistema terrestre, esto no representa un problema para detectar los principales elementos presentes en una estructura costera. La comparativa entre las superficies trianguladas obtenidas a partir de los diques rompeolas muestra una desviación estándar de 0.064 m, lo que parece suficiente por ejemplo para determinar el estado de las piezas de un dique rompeolas, que en caso de fallo presentan desplazamientos mucho mayores.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad el soporte financiero de la beca AP2010-2969.

Referencias

1. Burak, S., Dogan, E., and Gazioglu, C. Impact of urbanization and tourism on coastal environment, *Ocean & Coastal Management* **2004** 47(9-10), 515 – 527.
2. Woodroffe, C. D. The natural resilience of coastal systems: Primary concepts. *Managing coastal vulnerability* **2007** 45 – 60.
3. Chebo, A. K. Monitoring wetlands deterioration in the Cameroon coastal lowlands: implications for management". *Proecedia Earth and Planetary Science* **2009** 1(1), 1010 – 1015.
4. Davison, M. A., Turner, I. L., and Guza, R. T. The effect of temporal wave averaging on the performance of an empirical shoreline evolution model. *Coastal Engineering* **2011** 58, 802 – 805.
5. Van Rijm, L. C. Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management* **2011** 54(12), 867 – 887.
6. Mitchell, T. and Chang, M. Utilizing vessel based mobile LiDAR & bathymetry survey techniques for survey of four Sourthern California Brakwaters. *Coastal Engineering Practice* **2011** 957 – 968.
7. Petri, G. An introduction to the technology mobile mapping systems. *Geoinformatics* **2010** 13(1), 32 – 43.
8. Puente, I., González-Jorge, H., Riveiro, B., and Arias, P. Accuracy verification of the Lynx Mobile Mapper system. *Optics & Laser Technology* **2013** 45, 578 – 586.
9. González-Jorge, H., González-Aguilera, D., Rodríguez-Gonzálvez, P., and Arias P. Monitoring of biological crusts in civil engineering structures using intensity data from terrestrial laser scanners. *Construction and building materials* **2012** 31, 119 – 128.
10. Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., and Arias, P. Review of mobile mapping and surveying technologies, *Measurement* **2013** 46(7), 2127 – 2145.

Sesión II-C

Guiado, Energía y Materiales

Incorporación de fibras monocristalinas de alúmina en cerámicas balísticas

Cerecedo Fernández, Carmen[1]*; Valcárcel Juárez, Víctor[1]; Torrecillas San Millán, Ramón[2]; Fernández Valdés, Adolfo[2]; Rivera Monte, Sergio[3]; Ferrer Hernando, Rafael[4]

[1] Neoker, S.L. Polígono Industrial Novo Milladoiro, Local 78-A1, info@neoker.org, NEOKER

[2] Centro de Investigación en Nanomateriales y Nanotecnología, Avda. de la Vega, 4 – 6. 33940. El Entrego (San Martín del Rey Aurelio), r.torrecillas@cinn.es, a.fernandez@cinn.es (CINN),

[3] Nanoker Research, S.L.; s.rivera@nanoker.com, (NANOKER), Edificio CEEI Parque Tecnológico de Asturias, 33428 Llanera

[4] Fedur, S.A; C/Brazal Almotilla, 4 · 50410 Cuarte de Huerva, Zaragoza, rafa@fedur.com, (FEDUR)

* Cerecedo Fernández, Carmen; info@neoker.org: (CCF);

Abstract: Neoker, S.L. es una Pyme que se dedica a la fabricación de fibras monocristalinas de alúmina, NKR®, un material cerámico de altas prestaciones en materiales compuestos. Las fibras se utilizan fundamentalmente como fase reforzante, incorporadas en dichos materiales compuestos, dentro de matrices cerámicas, metálicas o poliméricas. En nuestra constante búsqueda de nuevas aplicaciones, Neoker investiga y desarrolla nuevos materiales. Así, combinamos nuevas tecnologías de sinterizado (como por ejemplo Spark Plasma Sintering) con el conocimiento de fabricantes y de los usuarios finales. En los últimos desarrollos llevados a cabo en nuestras investigaciones, hemos demostrado cómo añadiendo pequeños porcentajes de fibra NKR a una matriz cerámica se pueden obtener mejoras de propiedades mecánicas superiores al 20% y se limita el daño por impacto a zonas más reducidas.Todas estas mejoras en las propiedades mecánicas tienen una de sus aplicaciones principales en el campo de las cerámicas balísticas. En el presente trabajo se exponen los principales resultados obtenidos, haciendo especial hincapié en la mejora de la resistencia balística, tanto en el caso de un impacto aislado como para ensayos de multiimpacto. Todo ello permite el diseño de componentes de protección con reducción de peso/espesores hasta el 30 %.

Keywords: fibras de alúmina; Spark Plasma Sintering (SPS), cerámicas balísticas, composites de matriz cerámica CMC's; tenacidad, impacto.

1. Introducción

Los vehículos de combate a menudo no están adecuadamente protegidos contra sofisticados dispositivos explosivos, balas, minas de suelo y de fragmentación, etc. que cada vez son más frecuentes en combate. Ofrecer el mayor nivel de protección posible con el menor peso posible es un reto para la ciencia de materiales, para la tecnología de integración y para la física. Además de eso, en cuanto los soldados bajan de los vehículos, deben portar equipos de protección en los cuales la relación peso/protección debe ser optimizada, sobre todo en condiciones de altas temperaturas, operaciones en altura, etc.

Los vehículos militares han sido tradicionalmente construidos con una gruesa piel de acero protector. En la actualidad, los composites cerámicos han reemplazado casi por completo al acero para aplicaciones de protección no estructural. Dichos composites son capaces de ahorrar hasta el 50% del peso en comparación con sus homólogos metálicos convencionales.

Los materiales más importantes hoy en día para la protección balística son la alúmina (Al2O3), el carburo de silicio (SiC) y carburo de boro (BC). La alúmina, debido a su excelente relación coste/protección, es uno de los más utilizados para vehículos. Sin embargo, es conveniente tener en cuenta que los sistemas de protección no actúan por si solos, si no que suponen un sistema integrado de varias partes: la cerámica destruye el proyectil, mientras que el backing o sustrato absorbe el resto de la energía por deformación plástica.

Dentro de las cerámicas, los materiales compuestos son una familia en constante desarrollo. Durante el último cuarto de siglo se ha progresado mucho en el desarrollo de nuevos materiales con altas prestaciones, para aplicaciones de alta tecnología. Dentro de este campo, uno de los avances más importantes ha sido la producción de fibras cerámicas o inorgánicas con alta resistencia tensil y térmica. La incorporación de estas fibras en cerámicas avanzadas, polímeros y metales ha permitido obtener materiales compuestos ("composites") ligeros, con propiedades superiores a los materiales monofásicos convencionales. Estos materiales avanzados han generado sin duda nuevas posibilidades ingenieriles, cuyo impacto abarca conceptos tan dispares como la construcción de vehículos espaciales o la elaboración de equipamiento deportivo innovador.

Neoker, S.L. es una empresa española que es el único productor a nivel mundial de fibras monocristalinas de alúmina, un material con prestaciones mecánicas superiores en muchos casos a las mejores fibras de carbono, y que además presenta ventajas adicionales: estabilidad de propiedades químicas y mecánicas en entornos agresivos (altas temperaturas, ambientes oxidantes, etc). Para poder desarrollar aplicaciones, es imprescindible que se involucren los usuarios finales de las aplicaciones de alto valor añadido, para establecer las fichas técnicas de especificaciones que los nuevos productos deben ser capaces de superar. De este modo, Neoker colabora con Fedur desde hace años en el ámbito de placas cerámicas para su uso en aplicaciones balísticas. Las protecciones balísticas, más concretamente los chalecos personales y los vehículos ligeros, requieren el desarrollo de materiales avanzados que combinen alta resistencia mecánica, elevada resistencia al impacto y baja densidad.

Por otro lado, estos materiales deben de poder ser procesados y ensamblados adecuadamente para constituir el armazón estructural del vehículo y proporcionar la elevada protección balística requerida. Dada la estabilidad térmica de las fibras NKR®, los procesamientos convencionales de sinterización pueden presentar dificultades adicionales, por lo cual es preciso utilizar alguno de los prcedimientos

innovadores en desarrollo en la actualidad. Dentro de ellos, cabe destacar la consolidación por tecnología SPS (Spark plasma sintering), que permite obtener resistencias al impacto un 25 % superiores a las convencionales por medio del afino de grano resultante en el material gracias a las características del proceso de densificación. En este trabajo se describirán los primeros pasos dados para abordar el desarrollo de cerámicas balísticas gracias al equipo híbrido de sinterización del que dispone el CINN, único en el mundo con la capacidad para preparar discos de hasta 400 mm de diámetro.

Este trabajo consta de dos partes. En primer lugar se describirán los resultados balísticos obtenidos en materiales cerámicos reforzados con fibras mediante procesos de sinterización convencionales. En una segunda parte, se describirán los nuevos materiales reforzados con fibras de alúmina NKR®, sinterizados por SPS.

El objetivo futuro de esta investigación es la generación de una nueva familia de productos con tenacidad y resiliencia mejoradas, gracias a la adición de fibras NKR®. En lugar de usar alúmina como matriz, se pretende usar otros compuestos cerámicos sinterizados por SPS de por sí ya extraordinariamente resistentes. El objetivo es el desarrollo de una nueva familia de armaduras cerámicas aligeradas, que incorporen fibras NKR®, y procesadas por SPS.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

Parte 1. Cerámicas balísticas de alúmina reforzadas con fibras NKR®. Para preparar la materia prima, se mezcla polvo de alúmina de distintas fracciones micrométricas (en concreto se mezclaron tres alúminas con d50= 20μm, d50=3.5μm, y otra con d50=1.2μm respectivamente, en la proporción marcada por la regla de Andreasen para el empaquetamiento óptimo). Tras agitación de la mezcla en "rollers" durante varias horas (de 12 a 24h), al polvo resultante se le añadieron las fibras NKR® mediante agitación ultrasónica, con distintos porcentajes de fibras NKR® (0, 0.3%, 0.5%, 0.7% y 1%). A continuación, se prepara un polvo RTP (Ready to Press) mediante el proceso conocido como atomización mediante la técnica de spray drying (Figura 1)

Este polvo RTP así obtenido posee ya fibras NKR® en la cantidad deseada. Se procede entonces a la conformación de las placas balísticas mediante prensado en frío y su posterior sinterizado a 1700ºC. Es necesario utilizar aditivos de sinterización específicos para conseguir un grado de densificación adecuado, cercano al 100%.

A continuación, se preparan probetas para el estudio de sus propiedades mecánicas principales, mediante flexión en tres puntos. De este modo se obtienen las adiciones óptimas de fibras.

Una vez obtenidas las cerámicas con distintos porcentajes de fibras NKR®, y tras analizar cuál es el que produce un refuerzo mayor en resistencia a flexión, se fabricaron varios lotes de losetas cerámicas para ser evaluadas en cuanto a su comportamiento balístico. Se realizaron dos evaluaciones. La primera de ellas fue realizada en las instalaciones de FEDUR, y una vez determinadas las características básicas de las cerámicas producidas, se encargó a una empresa del sector una caracterización más detallada (identidad protegida por NDA), mediante la comparación de los resultados obtenidos en las piezas cerámicas no reforzadas y los obtenidos tras con refuerzo de fibras NKR®.

Para la evaluación inicial cualitativa de las cerámicas, se utilizaron 35 losetas hexagonales de 30 x 7´2 mm de alúmina, reforzadas con un 0.3% (vol) de fibras NKR®. Se realizaron ensayos con y sin backing (backing de 13 kg/m^2 PE y 20x20 cm). Se utilizaron diversas municiones y velocidades

comprendidas entre 740 mm/sg y 860 mm/sg. Se realizaron ensayos cualitativos de medida de trauma, perforación de placa, pruebas multiimpacto, etc. Gracias a la experiencia y knowhow acumulados de los expertos de Fedur, se estableció que el comportamiento de las placas reforzadas estaba siendo muy superior al de las placas del mercado, y por tanto se procedió a encargar una caracterización más completa, tal como se describirá en la sección de resultados.

Esta caracterización consistió básicamente en una determinación del V50 de las piezas reforzadas con fibras de alúmina, y su comparación con el V50 de dos standards internos de la empresa: el producto que comercializan ya exitosamente (standard 2011) y un producto más reciente mejorado reforzado con nanoaditivos (standard 2013).

Parte 2. Cerámicas reforzadas con fibras NKR® sinterizadas mediante la utilización de SPS.

Se sinterizaron las muestras mediante la utilización de un sistema híbrido, tipo HHPD400 de FCT Systeme (Alemania), el cual incluye un sistema dual de calentamiento. Por un lado, se hace pasar una corriente muy intensa que calienta la muestra a sinterizar (por efecto Joule), y simultáneamente se utiliza calentamiento por inducción mediante corrientes de Eddy. El proceso es controlado por dos pirómetros, uno sobre la superficie de la muestra, y el otro enfocado a la parte exterior del molde. En combinación, estos sistemas controlan el proceso para obtener máxima homogeneidad.

Materiales empleados y condiciones de sinterización en SPS.

Se utilizaron como materias primas las siguientes:

- α-Al_2O_3 (SPA-05, Sasol North American Inc., Tucson, AZ), pureza 99.995%, d_{50} = 0.4 μm, superficie específica 8.0 m^2/g y las siguientes impurezas (ppm): Na (10), Si (10), Fe (5), Ca (5), Zr (3), Mg (2), Ga (<4), Cr (<1) Ni (<1), Ti (<1), Cu (<1), Zn (<1).
- Ceramtuff™ (HA9S – Advanced Composite Materials, Greer, SC).
- TiC (STD-120, H.C. Stark Gmbh, Goslar, Germany), d_{50} = 1.2 μm, con análisis químico en ppm: Ca (<100), Fe (<2500), Na (<100), S (<100) y Si (<150).
- Al_2O_3 fibers (NKR®v-100, Neoker S.L., Milladoiro, Spain).

Se prepararon dos suspensiones diferentes usando isopropanol. Las mezclas fueron homogeneizadas por agitación con bolas de alúmina en un contenedor de polietileno a 150rpm durante 24h, y secadas a 90ºC durante otras 24h. Los polvos resultantes se desmenuzaron en mortero de ágata y fueron tamizadas a través de un tamiz de 180 μm de luz. Los polvos se sinterizaron finalmente por SOS a 1780ºC y 30 MPa durante 5 min en vacío. Como resultado, se obtuvieron discos de 150mm de diámetro y 10mm de espesor. La tabla 1 muestra los materiales preparados y sus porcentajes.

Caracterización

Se han caracterizado dos zonas diferentes de cada disco, el centro (CE) y el borde (ED). Las densidades aparentes fueron calculadas utilizando el método de Arquímedes. La dureza fue medida utilizando un indentador Vickers (Micromet 5103, Buehler LTD, Lake Bluff, IL), bajo 5 N de carga durante 10s. Las diagonales se midieron por microscopía óptica, realizándose diez medidas para cada zona y cada material. La tenacidad fue analizada por la técnica de indentación usando un indentador de diamante Vickers (MINOR-69, Hoytom, S.L., Leioa, Spain) bajo 306N durante 10sg.

3. Resultados y Discusión

3.1. Parte 1.- Cerámicas balísticas reforzadas con fibras NKR®.

En los tests realizados, se ha observado que el refuerzo máximo se consigue con la adición de un 0.3% de fibras, mientras que para porcentajes mayores de refuerzo se produce un fenómeno de generación de defectos, lo que finalmente provoca una reducción de las propiedades mecánicas del composite (Fig1). Hay que tener en cuenta que las fibras NKR® no poseen un diámetro homogéneo, ni una longitud constante.

Para evitar que las fibras de mayor tamaño ocasionen la aparición de defectos estructurales en el material sinterizado, se ha pensado que este efecto puede evitarse mediante la molienda de las fibras. Sin embargo, dado que se busca activar todos los mecanismos de refuerzo por puenteo de grieta, no es lógico reducir su relación de aspecto. En trabajos actuales, se está intentando separar las fibras NKR® en diversas fracciones, y se utilizarán aquellas más finas y más largas para evaluar el verdadero potencial de las fibras de alúmina NKR®.

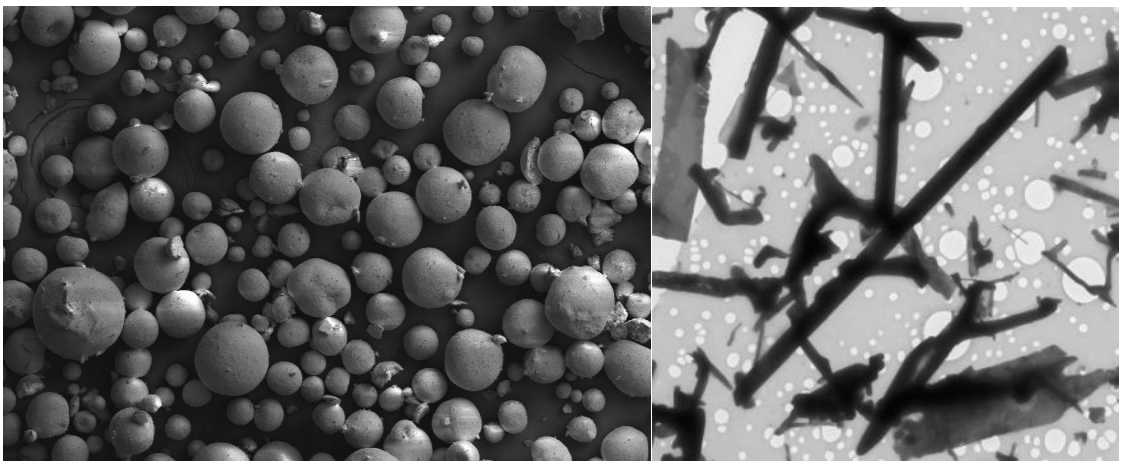


Figura 1. A la izquierda, polvo RTP atomizado, con las fibras. A la derecha, detalle donde se aprecian las fibras.

Se han detectado también algunos problemas secundarios originados durante el atomizado, ya que para concentraciones de fibras más altas aparecían siempre aglomerados de fibras entrelazadas.

Pese a todos estos inconvenientes, como se puede ver en la gráfica de la Fig3, los materiales analizados tienen un V(50) sustancialmente más alto que aquellos que no tienen refuerzo, e incluso mayor que el mejor nanoaditivo analizado de los disponibles en la actualidad.

Por tanto, parece evidente que tras la subsanación de alguna de las dificultades encontradas durante este esfuerzo investigador, el verdadero potencial de refuerzo de las fibras monocristalinas de alúmina NKR® es mucho mayor aún.

3.2. Parte 2- Cerámicas reforzadas con fibras NKR® sinterizadas mediante la utilización de SPS.

Como se puede ver en los resultados, la introducción de fibras NKR® tiene un efecto notable tanto sobre la densidad final como en las propiedades mecánicas. A lo largo de este estudio se ha realizado un esfuerzo de adaptación de las condiciones de procesamiento por SPS para conseguir optimizar la densidad.

En este sentido, cabe destacar que aún queda trabajo por hacer hasta alcanzar valores de densidad más próximos al 100%, y por tanto aún queda recorrido para posibles mejoras mecánicas. Los resultados aparecen descritos en las Tablas 2, 3 y 4. Como puede observarse los ratios de densificación más

elevados ocurren en el centro de los discos en ambos casos. Obviamente, aunque las desviaciones no son demasiado elevadas, deben atribuirse a la estabilidad térmica de las fibras, que dificulta ligeramente los procesos de sinterizado, aunque como se ha dicho pueden alcanzarse densidades muy altas próximas al 100%. La incorporación de las fibras ha conseguido aumentos notables de la tenacidad en todos los casos ensayados, aun teniendo en cuenta que las matrices ensayadas presentaban ya de por si características óptimas, demostradas en experimentos balísticos previamente.

Material	Al_2O_3 SPA-05	Ceramtuff	TiC	Al_2O_3 Fibers
1	60	0	30	10
2	0	65	30	5
3	60	0	40	0
4	0	78	22	0

Tabla 1. Porcentajes de materias primas empleados en la producción de las cerámicas SPS (%).

Material	CE		ED	
	ρ (g/cm^3)	% TD	ρ (g/cm^3)	% TD
1	4.23	99.99	4.17	99.05
2	4.07	99.99	3.96	97.30
3	4.16	98.91	4.21	99.99
4	3.88	97.98	3.93	99.24

Tabla 2. Densidades de las muestras SPS.

Material	Hv (GPa)	
	CE	ED
1	17.74 ± 0.47	17.98 ± 1.12
2	20.27 ± 1.48	18.26 ± 1.80
3	19.32 ± 1.12	19.50 ± 0.9
4	20.27 ± 0.84	17.08 ± 0.88

Tabla 3. Tabla de durezas**.**

Material	K_{IC} ($MPa \cdot m^{1/2}$)	
	CE	ED
1	4.0 ± 0.6	3.6 ± 0.4
2	4.5 ± 0.2	4.1 ± 0.5
3	3.1 ± 0.2	3.1 ± 0.3
4	4.2 ± 0.2	4.0 ± 0.2

Tabla 4. Tabla de tenacidades**.**

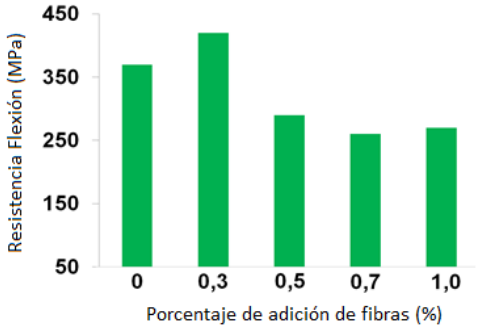


Figura 2. Resistencia a Flexión en función del porcentaje de fibras de las piezas de alúmina reforzadas con NKR.

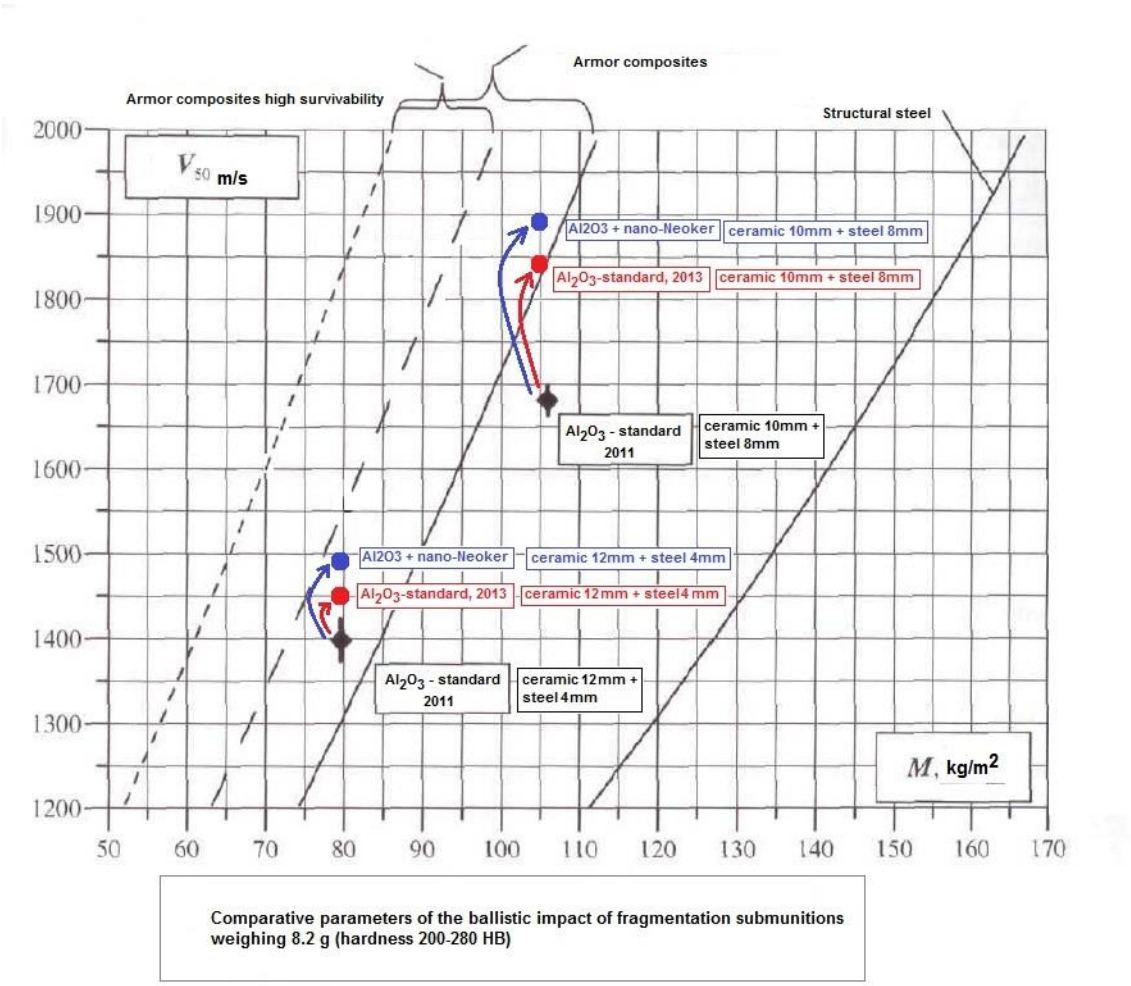


Figura 3. Resultados de la comparación de las características (V50) balísticas de las alúminas reforzadas con fibras NKR frente al mismo material sin reforzar (standard 2011) o reforzado con nanoaditivos (standard 2013).

4. Conclusiones

Parte 1. Cerámicas balísticas de alúmina reforzadas con fibras NKR®. En las pruebas realizadas para reforzar armaduras cerámicas de alúmina, se ha observado un importante incremento de la resistencia en flexión incluso para pequeños porcentajes de fibras de refuerzo. Sin embargo, para porcentajes mayores,

la introducción del refuerzo parece causar la aparición de defectos, debido quizá a que la granulometría del material de partida era demasiado fina (fibras proporcionalmente muy grandes). En futuros esfuerzos de investigación se intentará trabajar con fracciones de fibras más finas, para evitar este problema.

Sin embargo, en los resultados de las piezas con el 0.3% de fibras, la resistencia a flexión aumentó de manera consistente. En la serie de probetas fabricadas, se observó un comportamiento balístico muy interesante que puede ser resumido en los siguientes puntos:

- En este ensayo se ha demostrado una reducción del espesor (peso) requerido para detener una munición dada, en torno al 20%.
- El mismo espesor es capaz de detener balas con una energía (velocidad) mucho mayor.
- Una vez mejoradas las condiciones de procesamiento, se estima que estos resultados y beneficios podrán ser ampliados notablemente.

Parte 2. Cerámicas reforzadas con fibras NKR®, sinterizadas mediante la utilización de SPS. En todas las pruebas realizadas hasta la fecha se ha podido demostrar que la inclusión de fibras NKR® durante el proceso de sinterización SPS tiene los siguientes efectos:

- Las condiciones de trabajo del SPS deben adaptarse específicamente para la optimización del proceso.
- La incorporación de las fibras ha conseguido aumentos notables de la tenacidad (en torno al 25% en algún caso). Estas mejoras son variables en función de la matriz, pero se han dado en todas las cerámicas ensayadas hasta la fecha, aun teniendo en cuenta que las matrices bajo estudio presentaban ya de por si características óptimas, demostradas en experimentos balísticos previamente.
- Los resultados anteriores son, pues, muy prometedores de cara a la utilización de las fibras monocristalinas de alúmina como refuerzo en materiales procesados mediante SPS, principalmente en el campo de los materiales balísticos.

Conclusiones del trabajo: la incorporación de fibras monocristalinas de alúmina por procedimientos convencionales ha demostrado gran eficacia en la mejora balística de materiales de alúmina disponibles en el mercado, aun cuando quedan pendientes para futuros trabajos mejoras de procesamiento que podrán incrementar este efecto.

Por otro lado, la incorporación de fibras NKR® en cerámicas balísticas innovadoras de altas prestaciones ha mejorado todas las características mecánicas, lo que augura un gran resultado en los test balísticos.

Referencias

1. Valcárcel, V; Cerecedo, C and Guitián, F. Method for Production of Alumina Whiskers via Vapor–Liquid–Solid Deposition, *J. Am. Ceram. Soc*., 2003, 86, 1683–90.
2. Cerecedo, C; Valcárcel, V. New Massive Vapor-Liquid-Solid Deposition of α-Al_2O_3 Fibers, *Adv. Eng. Mat*, 2007, 9, (7), 600-603
3. Medvedovski, E Ceramic armor and armor system II. USA. 2005, Vol 178.
4. Torrecillas, R; Kessel, H. U.; Hennicke, J.; Kirchner R. and Kessel, T. Challenges and Opportunities for Spark Plasma Sintering: A Key Technology for a New Generation of Materials, *Sintering Applications*, Ed. Dr. Burcu Ertug 2013 ISBN: 978-953-51-0974-7

Optimización aplicada al diseño de estructuras de vehículos

Díaz García, Jacobo[1,*], **Romera Rodríguez, Luis E.**[1], **Hernández Ibáñez, Santiago**[1], **Costas Piñó, Miguel**[1], **Paz Méndez, Javier**[1]

[1] Grupo de Mecánica de Estructuras. Universidade da Coruña, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Campus de Elviña, 15071

* Autor responsable del trabajo; jdiaz@udc.es

Abstract: En este artículo se presentan los resultados de varios proyectos y contratos de investigación realizados por los autores en el ámbito de la optimización aplicada al diseño fiable, robusto y frente a impacto en estructuras aeronáuticas y de automoción. El nexo común de estos proyectos es una metodología que aplica técnicas de optimización matemática al diseño de estructuras resistentes y de absorción de energía, obteniendo diseños de prestaciones incrementadas con distribuciones de material óptimas que mejoran la respuesta resistente y la fiabilidad, aumentan la energía absorbida frente a impacto y reducen el peso de la estructura. Los procedimientos desarrollados se han aplicado en el ámbito civil al diseño de sistemas de absorción de impactos en automóviles y al diseño de estructuras aeronáuticas en configuraciones límite de diseño. Estos procedimientos pueden ser aplicados en el ámbito de la Defensa y Seguridad al diseño de estructuras de medios de transporte y a su blindaje para obtener la mejor configuración que garantice la seguridad estructural para diferentes solicitaciones, y absorba la máxima cantidad de energía con la mínima cantidad de material para diferentes velocidades de impacto, desde el de baja velocidad hasta el balístico.

Keywords: optimización; diseño robusto; análisis de la fiabilidad

---

1. Análisis probabilista de la fiablilidad en estructuras aeronáuticas

La cuantificación de la incertidumbre en la respuesta estructural es una tarea esencial en el diseño de componentes aeronáuticos. Los métodos deterministas convencionales definen coeficientes de seguridad para tratar la incertidumbre en el diseño. En los métodos probabilistas, el objetivo es obtener la probabilidad de que no se verifiquen los estados límite de diseño, es decir, la probabilidad de fallo. La ventaja de estos métodos es que evalúan la seguridad estructural de manera más precisa y permiten obtener diseños mejorados sin comprometer la fiabilidad. La probabilidad de fallo p_f se define mediante

la ecuación (1), donde $g(\mathbf{a})$ es una función de estado límite y $f_{\mathbf{A}}(\mathbf{a})$ es la función de densidad de probabilidad conjunta de las variables aleatorias involucradas en el diseño.

$$p_f = P\left[g\left(\mathbf{a}\right) \leqslant 0\right] = \int_{g(\mathbf{a})\leqslant 0} \cdots \int f_{\mathbf{A}}\left(\mathbf{a}\right) d\mathbf{a} \tag{1}$$

Existen diferentes métodos para resolver la integral multidimensional anterior [1]. En este trabajo se han considerado los métodos FOSM (*first order second-moment method*), FORM (*first order reliability method*) y TANA3 (*two point adaptive nonlinear approximation*), basados en la aproximación de la superficie de estado límite. Estos métodos requieren información de la función de estado límite y sus derivadas en el entorno del punto de diseño. También se han considerado los métodos de muestreo aleatorio del espacio de diseño de Montecarlo, LHS (*latin hypercube sampling*) y de muestreo por importancia. Como ejemplo de aplicación se ha seleccionado un panel estructural rigidizado de aluminio (figura 1). Las propiedades y su incertidumbre asociada se recogen en la tabla 1. Todas ellas son variables aleatorias independientes. El modelo de elementos finitos para simular la respuesta estructural del panel contiene elementos lámina de cuatro nodos para modelar la superficie externa y elementos barra a flexión para las cuadernas y los largueros. La malla tiene 2329 elementos, 2432 nodos y 14 592 grados de libertad. El modelo tiene las rotaciones restringidas en los bordes y los desplazamientos en el borde izquierdo. En los bordes horizontales tiene una carga de cortante de $0{,}5\,kN/m$ y una carga axil de $1\,kN/m$ en el borde opuesto al restringido en desplazamientos. La ecuación (2) evalúa el estado límite para verificar la seguridad estructural mediante el factor de pandeo λ , que debe ser superior al valor mínimo $\lambda_{min} = 100$. La figura 2 muestra el primer modo de pandeo obtenido con el valor medio de las variables aleatorias.

Variable	μ	σ	δ (%)	Distribution
Espesor lámina (mm)	1,5	0,225	15	Lognormal
Espesor cuaderna (mm)	2,5	0,375	15	Lognormal
Espesor larguero (mm)	2,5	0,375	15	Lognormal
Separación cuadernas (mm)	200	37,5	15	Lognormal
Separador largueros (mm)	250	30	15	Lognormal
Canto cuadernas (mm)	50	7,5	15	Lognormal
Canto largueros (mm)	30	4,5	15	Lognormal
Carga cortante (kN/m)	5	1,5	30	Gumbel
Carga axil (kN/m)	10	3	30	Gumbel

Tabla 1. Propiedades del panel.

$$g\left(\mathbf{a}\right) = \frac{\lambda}{\lambda_{min}} - 1 \geqslant 0 \tag{2}$$

La tabla 2 muestra los resultados de la probabilidad de fallo y el índice de fiabilidad β para cada uno de los métodos considerados. Para poder comparar el coste computacional de cada método, también se indica el número de iteraciones y el tiempo de análisis. Puede observarse que los resultados son similares en todos los métodos, excepto en el FOSM. Esto es esperable, ya que este método sólo proporciona un resultado aproximado, aunque su tiempo de cómputo es muy reducido también, y puede suponer una alternativa para evaluar la fiabilidad en estadios iniciales del diseño.

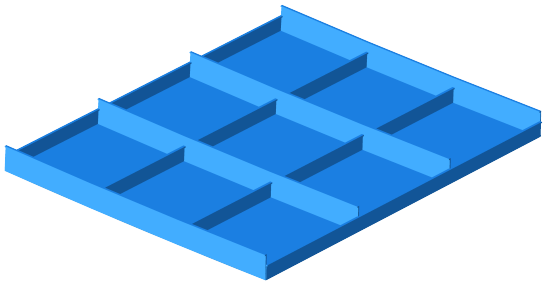


Figura 1. Geometría del panel.

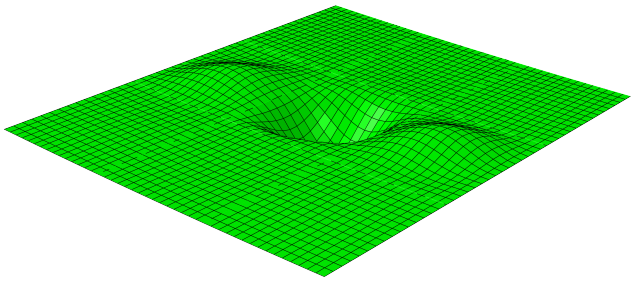


Figura 2. Primer modo de pandeo.

Método	β	p_f	Iteraciones	Tiempo
FOSM	1,177	$1{,}195 \cdot 10^{-1}$	23	2m 5s
FORM	2,451	$7{,}123 \cdot 10^{-3}$	644	56m 34s
TANA3	2,133	$1{,}645 \cdot 10^{-2}$	185	19m 16s
MCS	2,878	$2{,}000 \cdot 10^{-3}$	10 000	7h 0m 20s
LHS	2,652	$4{,}000 \cdot 10^{-3}$	1000	1h 10m 20s
VRT-I	2,927	$1{,}711 \cdot 10^{-3}$	745	55m 12s

Tabla 2. Resultados de fiabilidad y probabilidad de fallo.

Considerando el muestreo de Montecarlo como el más preciso, debido al alto número de muestras tomadas, el método FORM obtiene una aproximación precisa con un coste computacional razonable. Este método tiene la ventaja de ser invariante respecto a la formulación de la función de estado límite. La aproximación adaptativa TANA3 obtiene un valor más conservador de la probabilidad de fallo con un coste computacional inferior al FORM. El muestreo LHS obtiene un resultado similar al Montecarlo, pero requiriendo menos evaluaciones. El muestreo por importancia realiza una selección de muestras más eficientes y permite obtener valores precisos sin alargar excesivamente el cálculo.

2. Diseño robusto de elementos aislantes de transferencia de calor en componentes aeronáuticos

Los problemas térmicos relacionados con mecanismos de transferencia de calor en ingeniería aeroespacial tienen lugar en un entorno donde muchos de los parámetros requeridos para la formulación del problema no pueden definirse con suficiente precisión y existe un cierto grado de incertidumbre. Esta circunstancia requiere conocer cómo afectan a la respuesta las variaciones en los parámetros de entrada para seleccionar diseños que reduzcan la incertidumbre de la respuesta, a pesar de la que exista en los factores de entrada. El objetivo del diseño robusto consiste en obtener un producto que sea, en la medida de lo posible, insensible a la variación en los parámetros de entrada Taguchi et al. [2]. En el análisis robusto, dado un valor objetivo para una respuesta del sistema, el diseño óptimo no es el más cercano al objetivo, sino el menos sensible a variaciones en los parámetros de entrada. Como ejemplo para ilustrar el procedimiento se utiliza una caja cerrada de $1\,m$ de ancho, $2\,m$ de longitud y $0{,}5\,m$ de alto con dos cavidades idénticas, que simula la sección de un cajón alar sometida a flujo solar y lateral y que intercambia calor con el ambiente, el cielo y el suelo por medio de conducción, convección al ambiente, radiación al ambiente, al cielo, al suelo y en cavidades (figura 3). En este caso, la temperatura nodal en los puntos centrales de cada cavidad se selecciona para definir el nivel de calidad de los diseños (figura 4).

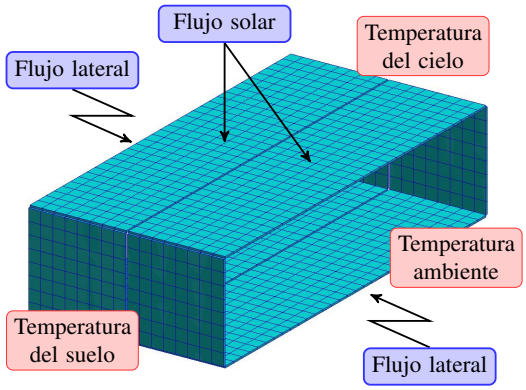


Figura 3. Cajón alar sometido a flujo solar, radiación, convección y conducción.

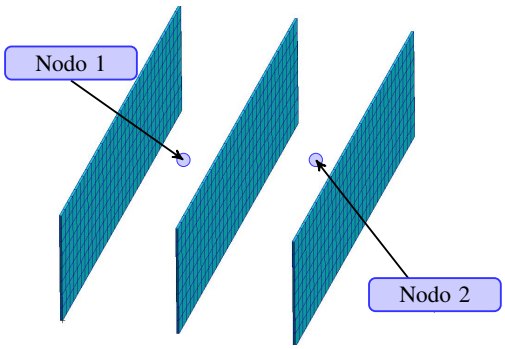


Figura 4. Nodos seleccionados para la medida de temperatura.

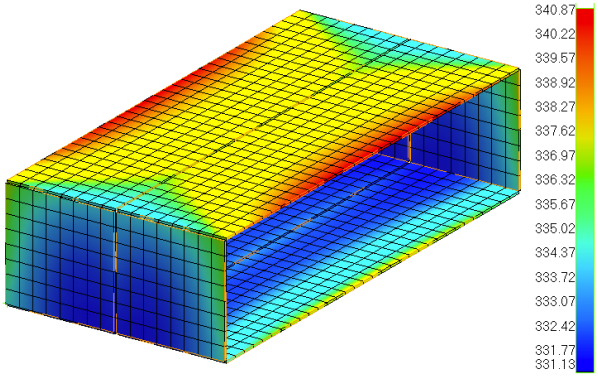


Figura 5. Temperatura en contorno exterior.

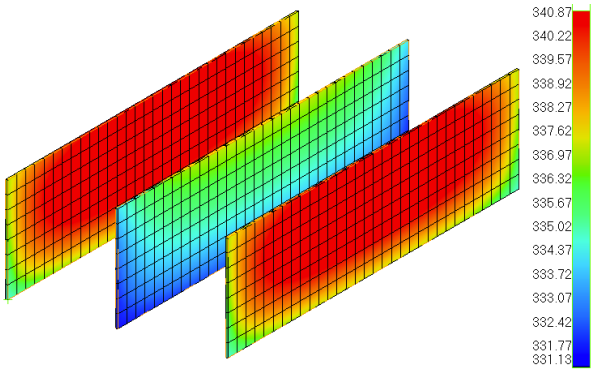


Figura 6. Temperaturas en paredes internas.

En el estudio se incluyen siete factores de distorsión: el flujo solar y lateral, la conductividad térmica, el coeficiente de transferencia de calor y la temperatura del cielo, del suelo y del ambiente. Estos factores tienen un valor medio μ y un porcentaje de variación ν. El valor de la desviación típica σ se define como $\sigma = \frac{\mu\nu}{3}$. Para cada factor de distorsión se consideran dos niveles diferentes: $\mu - \sigma$ y $\mu + \sigma$ (tabla 3). En el caso de los factores de control, se eligen cuatro características diferentes del componente: la absortividad solar de los paneles superiores, la emisividad de las cavidades izquierda y derecha y la emisividad de las superficies interiores en la radiación en cavidades. En cada uno de ellas se definen tres niveles, que se muestran en la tabla 4. A partir del número y niveles de los factores de distorsión y control se seleccionan respectivamente las matrices ortogonales $L_8\ (2^7)$ y $L_9\ (3^4)$ [3], que permiten una secuencia de experimentos sin que exista tendencia o predominancia de algún factor en los resultados. Debe tenerse en cuenta que para cada experimento incluido en la matriz de factores de control, los ocho casos considerados en la matriz de factores de distorsión son analizados, lo que resulta en setenta y dos soluciones. Cada una de ellas corresponde a un diseño diferente del componente y por lo tanto debe analizarse por separado. Para todos ellos, la temperatura en los nodos de referencia debe ser obtenida. En las figuras 5 y 6 se muestra un ejemplo de uno de los resultados numéricos obtenidos. El problema se formula tratando de minimizar la variación de T_1 y T_2 en los nodos de referencia debida a los factores

Factor de distorsión	Símbolo	Unidad	μ	ν (%)	σ	Nivel 1	Nivel 2
Flujo solar	ϕ_l	$\frac{W}{m^2}$	1350	5	22,5	1327,5	1372,5
Flujo lateral	ϕ_t	$\frac{W}{m^2}$	500	15	25	475	525
Conductividad térmica	k	$\frac{W}{mK}$	150	20	10	140	160
Coeficiente de convección	h	$\frac{W}{m^2K}$	12	10	0,4	11,6	12,4
Temperatura ambiente	T_a	K	321,15	10	10,7	310,5	331,9
Temperatura del cielo	T_s	K	297,15	10	9,9	287,3	307,1
Temperatura del suelo	T_g	K	348,15	10	11,6	336,6	359,8

Tabla 3. Formulación de los factores de distorsión.

Factor de control	Símbolo	Unidad	Nivel1	Nivel2	Nivel3
Absortividad solar	α_l	%	20	50	80
Emisividad de la cavidad izquierda	$\varepsilon_{a,l}$	%	10	50	90
Emisividad de la cavidad derecha	$\varepsilon_{a,r}$	%	10	50	90
Emisividad de las superficies internas	ε_c	%	10	50	90

Tabla 4. Formulación de los factores de control.

de distorsión. Como la variación es un indicativo de pérdida de calidad, el problema corresponde al tipo *Nominal the best*, por lo que la función señal/ruido η se define como:

$$\eta = 10 \log_{10} \left(\frac{\mu_t^2}{\sigma_t^2} \right) \tag{3}$$

En la expresión anterior, μ_t es el valor medio y σ_t es la desviación típica de la temperatura en los nodos 1 y 2. Puede comprobarse como la función η es inversamente proporcional a la desviación típica, por lo que minimizar las pérdidas de calidad, y por tanto la dispersión, equivale a maximizar la función señal/ruido η. Tras el cálculo de cada conjunto de ocho análisis térmicos para cada experimento de la matriz de factores de control, mediante el análisis de la media, se obtiene el valor de η para cada uno de los tres experimentos correspondientes al mismo nivel de cada factor de control. La tabla 5 muestra los resultados completos para los nodos 1 y 2. Dado que maximizar η equivale a disminuir las pérdidas de calidad, el diseño robusto corresponde al nivel 3 de los factores de control 1 a 3 y al nivel 2 del factor 4. Puede verificarse que con este diseño la relación señal/ruido η aumenta, pasando de 30,75 a 31,59.

Nominal the best. Nodo 1			
Factor	Nivel		
	1	2	3
1	30,40	30,77	31,07
2	30,30	30,81	31,14
3	30,53	30,78	30,93
4	30,74	30,77	30,73

Nominal the best. Nodo 2			
Factor	Nivel		
	1	2	3
1	30,40	30,77	31,07
2	30,53	30,77	30,94
3	30,30	30,81	31,13
4	30,74	30,78	30,73

Tabla 5. Resultados del análisis de la media

3. Diseño óptimo de elementos de absorción de energía frente a impacto frontal

En este apartado se presenta un diseño multimaterial de un elemento de absorción de energía frente a impacto frontal. Estos elementos absorben energía de impacto mediante deformación plástica en la dirección axial. La cantidad de energía disipada, así como el peso y el coste, son factores clave en el diseño de estos elementos.

El diseño que se propone consiste en un tubo metálico relleno de una estructura de fibra de vidrio en nido de abeja. Este diseño es evaluado y optimizado para obtener las dimensiones que disipan el máximo de energía mediante el mínimo peso. El material del exterior es acero S-275 J0H, que se modeliza mediante un modelo de Johnson-Cook sensible a la tasa de deformación ([4,5]). El núcleo interior está realizado en polímero reforzado con fibra de vidrio Ultramid A3WG10 BK00564. Este material se define con un modelo isótropo, elástico lineal con fractura frágil. Las fibras de este material compuesto están dispuestas de manera aleatoria en la matriz de poliamida.

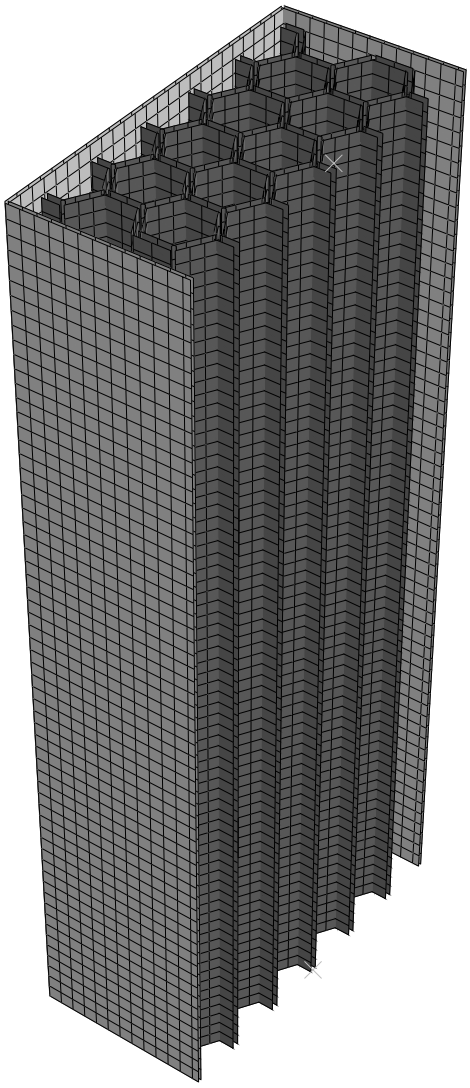


Figura 7. Sección tridimensional de la malla de elementos finitos del sistema de absorción de energía.

La figura 7 representa un modelo de elementos finitos con elementos lámina de 4 nodos con 3 puntos de integarción a lo largo del espesor y un esquema de integración reducida. Las dimensiones que caracterizan la pieza son dos parámetros de diseño y cuatro variables de diseño. Los parámetros de diseño son la altura del tubo, que toma un valor de $250\,mm$ y la arista de la sección transversal cuadrada, que vale $100\,mm$. Las variables de diseño son el espesor del acero ($T1$), el espesor de la fibra de vidrio ($T2$), la longitud de la diagonal de las celdas del nido de abeja (D) y la altura del núcleo ($H1$).

Las métricas que se consideran a la hora de abordar el diseño óptimo son la energía total absorbida (E_a), la masa del espécimen (m) y la carga pico (P_{peak}). Estas métricas se evalúan mediante un modelo de elementos finitos que impacta contra una placa rígida a una velocidad de $64\,km/h$, de acuerdo con el test EuroNCAP para impacto frontal. La interacción entre los dos materiales aumenta un $22\,\%$ la energía absorbida, sin afectar en la carga pico. El frente de Pareto de una optimización multiobjetivo de la masa y la energía absorbida se muestran en la figura 9. Esta optimización se ha llevado a cabo con un algoritmo genético que utiliza un modelo subrogado construido con el método MARS (*multivariate adaptive regression splines*) para realizar la evaluación de las respuestas de la estructura. Los resultados muestran una respuesta cuasi-lineal a lo largo de toda la región de diseño. Se observa también que la

energía específica varía linealmente desde $6{,}4\,kJ/kg$ para bajos valores de energía hasta $11\,kJ/kg$ en el otro extremo del frente. Comparados con el diseño inicial, que absorbía una energía específica de $7{,}6\,kJ/kg$, todos los modelos en el frente de Pareto que absorben más de $11\,kJ$ tienen una energía específica mayor. A la hora de incrementar la energía disipada, el tamaño de la celda del nido de abeja se reduce y los espesores aumentan. El algoritmo de optimización utilizado proporciona también los puntos más próximos al punto ideal (tabla 6).

Se comprueba que el diseño óptimo reduce la carga de pico en un $37\,\%$ en el diseño óptimo 1, con masa y energía total absorbida similar. El diseño óptimo 2 tiene una carga de pico similar a la inicial y mejora la energía específica absorbida en un $126{,}6\,\%$. En este caso, el espesor de acero tiende al máximo valor. La figura 10 muestra como la carga pico del diseño inicial, que es la suma del pico del tubo metálico y el relleno, se divide en dos picos de menor valor en el diseño óptimo, permitiendo absorber una cantidad de energía similar.

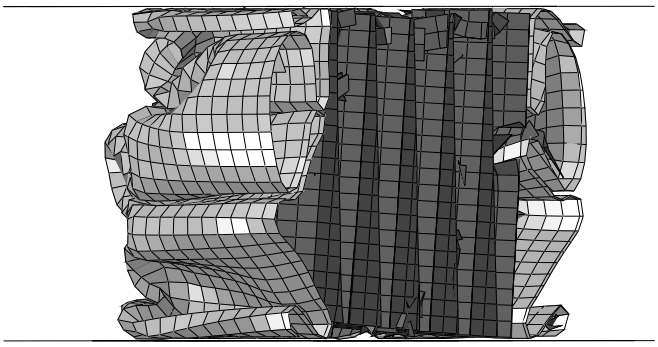


Figura 8. Corte seccional del tubo tras el impacto.

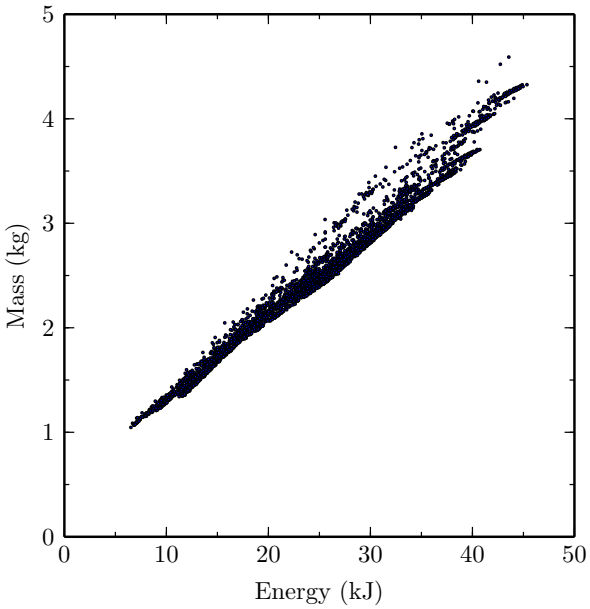


Figura 9. Frente de Pareto de energía y masa.

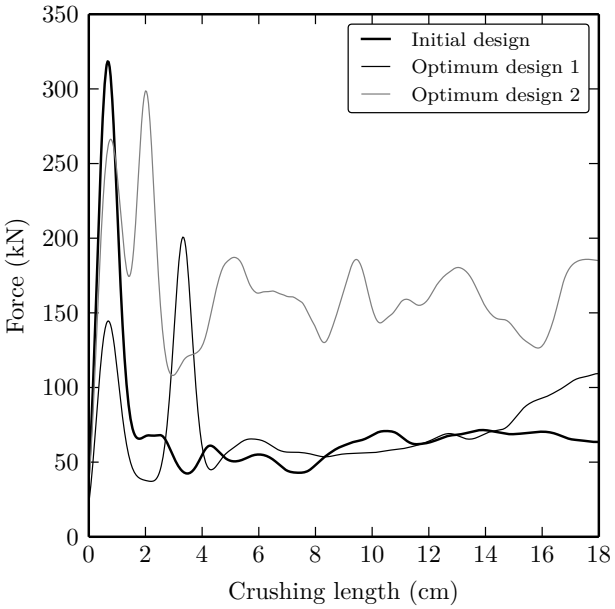


Figura 10. Curvas fuerza-desplazamiento.

4. Conclusiones

En este artículo se han presentado los resultados de tres investigaciones sobre optimización aplicada al diseño fiable, robusto y frente a impacto en estructuras aeronáuticas y de automoción. En primer lugar se han aplicado y comparado diferentes métodos de análisis de la fiablidad a la obtención de la

Métrica	Parámetro	Diseño inicial	Diseño óptimo (mejora)	
			1	2
Variable de diseño	D (mm)	20,00	13,13	13,31
	T1 (mm)	1,50	1,44	2,44
	T2 (mm)	1,50	1,03	1,53
	H (mm)	250,00	222,53	235,63
Función objetivo	E_a (kJ)	13,02	13,27 (1,9 %)	29,50 (126,6 %)
	m (kg)	1,72	1,68 (2,3 %)	2,79 (-62,2 %)
	P_{peak} (kN)	318,47	200,77 (37,0 %)	298,67 (6,3 %)
Indicador	SEA (kJ/kg)	7,57	7,90 (4,4 %)	10,56 (39,5 %)

Tabla 6. Comparación del diseño óptimo con el diseño inicial.

probabilidad de fallo de un componente estructural aeronáutico. Por otra parte, el método de Taguchi de diseño robusto ha sido aplicado para obtener los valores más apropiados de un conjunto de factores en varias situaciones de diseño en un problema de transferencia de calor en un elemento estructural. Los resultados muestran una mejora en la respuesta de los componentes, al tiempo que se mantiene una baja dependencia de las variaciones en los parámetros de entrada, obteniendo diseños más robustos que aumentan el nivel de calidad. Finalmente se ha presentado la optimización del diseño frente a impacto de un elemento de absorción de energía, obteniendo resultados que mejoran la seguridad de los ocupantes y reducen el peso y el coste de la estructura del vehículo.

Referencias

1. S.K. Choi, R.V. Grandhi, and R.A. Canfield. *Reliability-based structural design*. Springer, 2007.
2. Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, and Shin Taguchi. *Robust engineering*. McGraw-Hill, 2000.
3. Madhav Shridhar Phadke. *Quality engineering using robust design*. Prentice Hall, 1989.
4. M. Costas, J. Díaz, L. Romera, and S. Hernández. A multi-objective surrogate-based optimization of the crashworthiness of a hybrid impact absorber. *International Journal of Mechanical Sciences*, 88: 46–54, 2014.
5. J. Paz, J. Díaz, L. E. Romera, and M. Costas. Crushing analysis and multi-objective crashworthiness optimization of GFRP honeycomb-filled energy absorption devices. *Finite Elements in Analysis and Design*, 91(0):30 – 39, 2014.

Agradecimientos

Las investigaciones presentadas han sido parcialmente financiadas por el proyecto OPTOPAER (Optimizacion probabilista topológica y topométrica de estructuras aeronáuticas en regimen lineal y no lineal), con referencia DPI2013-41893-R, del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad.

Desarrollo de nuevos materiales adsorbentes a partir de hidrogeles de alginato

Devesa-Rey, R. [1,*], Vecino, X., [2], Moldes, A.B. [2], Cruz, J.M.[2], Senent, G.[1], Urréjola, S.[1]

[1] Centro Universitario de la Defensa (Marín), adscrito a la Universidad de Vigo. Escuela Naval Militar. Plaza de España s/n, 36920, Pontevedra

[2] Dpt. Ingeniería Química, Universidad de Vigo. Campus As Lagoas, Marcosende, 36310, Vigo.

***** E-Mail: rosa.devesa.rey@cud.uvigo.es (R. Devesa-Rey);

Abstract: Este trabajo presenta el desarrollo de nuevos materiales empleados para la depuración de aguas, con altos espectros de aplicación y que pueden resultar de potencial interés en áreas donde el acceso a sistemas de depuración de aguas esté limitado o bien las aguas puedan contener contaminantes especialmente tóxicos y/o patogénicos.

Los hidrogeles de alginato cálcico han demostrado su eficacia como adsorbentes de diferentes metabolitos presentes en agua. Combinados con diferentes adsorbentes, tales como carbón activo, tierra de diatomeas, turba, zeolitas, etc., presentan una capacidad de adsorción muy elevada, próxima al 100%, en tiempos muy cortos. La inmovilización de adsorbentes evita la oclusión de membranas y facilita el manejo de materiales adsorbentes pulverulentos. Estos hidrogeles han demostrado una elevada eficacia en la eliminación de contaminantes con elevada toxicidad, tales como metales, arsénico y compuestos orgánicos, muchos de ellos no tratados en los sistemas de depuración de aguas tradicionales. Además, su reducido volumen, facilidad de transporte y almacenamiento, hacen que su desarrollo resulte de interés para sistemas de tratamiento portátiles y para depuración de alto espectro.

Keywords: depuración; residuos; carbón activo; turba; tierra de diatomeas

---

1. Introducción

En países en vías de desarrollo la depuración de aguas puede llegar a suponer un problema de salud pública y el desarrollo de técnicas para la filtración del agua, mediante materiales accesibles y de bajo

coste puede suponer un gran avance en el tratamiento de aguas y efluentes contaminados. Este trabajo presenta un sistema de depuración de aguas mediante técnicas económicas, fáciles de ejecutar y con materiales (residuos) accesibles en cualquier población, incluso en aquellas con mayores índices de pobreza y menos infraestructuras. El trabajo evaluará la formulación, propiedades y eficiencia de cada residuo utilizado. La utilización de estos residuos supone una contribución a nuevas técnicas de depuración eficientes, de bajo coste de construcción y sostenibles medioambientalmente.

Dado que la adsorción es un fenómeno de superficie, una de las propiedades más valoradas en los adsorbentes comerciales es su superficie específica (superficie accesible por unidad de masa de sólido) (Calleja *et al.,* 1999). Cabe distinguir tres tipos de adsorción según que la atracción entre el soluto y el adsorbente sea de tipo eléctrico, de Van der Waals o de naturaleza química. La adsorción llevada a cabo por un intercambio de cargas, cae de lleno dentro del intercambio iónico y a menudo se le llama adsorción por intercambio, que es un proceso mediante el cual los iones de una sustancia se concentran en una superficie como resultado de la atracción electrostática en los lugares cargados de la superficie. Para los adsorbatos iónicos posibles, a igualdad de otros factores, la carga del ión es el factor determinante en la adsorción de intercambio. Para iones de igual carga, el tamaño molecular (radio de solvatación) determina el orden de preferencia para la adsorción.

La adsorción que tiene lugar debido a las fuerzas de Van del Waals se llama generalmente adsorción física o fisisorción. En estos casos, la molécula adsorbida no está fija en un lugar específico de la superficie, sino más bien es libre de trasladarse dentro de la interfase y por lo tanto en la mayoría de los casos suele ser reversible. Esta adsorción, en general, predomina a temperaturas bajas. La adsorción de la mayoría de las sustancias orgánicas en el agua con carbón activo se considera de naturaleza física. Si el adsorbato sufre una interacción química con el adsorbente, el fenómeno se llama adsorción química, adsorción activa o quimisorción. Las energías de adsorción son elevadas, del orden de las de un enlace químico, debido a que el adsorbato forma unos enlaces fuertes localizados en los centros activos del adsorbente. Esta adsorción suele estar favorecida a una temperatura elevada y suele ser irreversible. La mayor parte de los fenómenos de adsorción son combinaciones de las tres formas de adsorción y, de hecho, no es fácil distinguir entre adsorción física y química.

Se ha encontrado que la adsorción es superior a otras técnicas en términos de flexibilidad y simplicidad de diseño, coste inicial, falta de sensibilidad a los contaminantes tóxicos y facilidad de operación. Además, la adsorción no produce sustancias nocivas (Crini, 2006). Hay varios factores que influyen en la eficiencia del proceso de adsorción entre los que se incluyen la interacción adsorbato-adsorbente, área superficial del adsorbente, relación adsorbente-adsorbato, tamaño de partícula del adsorbente, temperatura, pH y tiempo de contacto entre otros (Crini, 2006; Allen & Koumanova, 2005; Sharma *et al.,* 2011; Yagub *et al.,* 2014).

El objetivo principal de este trabajo consiste en la evaluación de adsorbentes inmovilizados en hidrogeles de alginato cálcico para la reducción de la concentración de metales y sustancias orgánicas en aguas contaminadas. Para ello, se investigará el uso de carbón activo, turba y tierra de diatomeas como adsorbentes.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. Inmovilización de los adsorbentes

La inmovilización de los adsorbentes en hidrogeles de alginato se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito en Devesa-Rey et al. (2011). Para ello, alginato sodio al 4% se mezcló con un 2% de adsorbente. Dicha mezcla se añadió gota a gota desde una pipeta de 1,5 ml a una disolución de cloruro de calcio (0,58 M), que se empleó como disolución de cambio, utilizando una bomba peristáltica de flujo constante (Masterflex L/S). En la figura 1 se muestra el resultado de algunos de los adsorbentes que pueden ser inmovilizados mediante esta técnica.



Figura 1. Carbón activo, cáscara de cacahuete, corteza de pino o tierra de diatomeas son algunos de los residuos que pueden ser inmovilizados en hidrogeles de alginato.

2.2. Experimentos de adsorción

Los experimentos de adsorción se llevaron a cabo en matraces Erlenmeyer de 250 ml, usando diferentes relaciones adsorbente:alginato y variando, en diferentes experimentos, la velocidad de agitación, temperatura, salinidad, o concentración del contaminante, entre otros.

3. Resultados y Discusión

El interés en la producción de adsorbentes alternativos resulta de interés para su utilización en situaciones en las que no resulta de fácil acceso a sistemas de depuración comerciales. También el desarrollo de nuevos adsorbentes a partir de materiales de bajo coste puede suponer una gran ventaja desde el punto de vista económico. El coste es en realidad un parámetro importante para la

comparación de los materiales adsorbentes (Crini, 2006). De acuerdo con Bailey *et al.* (1999), un adsorbente puede ser considerado "*low-cost*" si requiere poco procesamiento, es abundante en la naturaleza o es un material sub-producto o desecho de otra industria.

Ciertos residuos de operaciones industriales y agrícolas, así como algunos materiales naturales representan una alternativa interesante para la formulación de bioadsorbentes económicos y compatibles con un desarrollo sostenible (Crini, 2006). Los residuos sólidos agrícolas y materiales de deshecho de las industriales forestales, tales como el serrín y la corteza de madera, son materiales que están disponibles en grandes cantidades y pueden tener un gran potencial como adsorbentes. También forman parte de este grupo de adsorbentes los helechos arbóreos, la mazorca de maíz, la cáscara de cebada, la paja de trigo, las virutas de madera y la piel de naranja, entre otros. También se emplean sub-productos industriales como materiales adsorbentes de bajo coste, entre los que se encuentran, los lodos de hidróxidos metálicos, cenizas volantes y el barro rojo. Entre los materiales naturales con posibilidad de uso en la elaboración de adsorbentes, las arcillas ocupan una importante posición, al ser de bajo coste, presentar gran abundancia y tener buenas propiedades de adsorción. Hay varios tipos de arcillas, tales como arcilla de bola, bentonita, arcilla común, sepiolita, arcilla fuego, tierra de batán (variedades de atapulgita y montmorillonita) y caolín (Sanghi & Verma, 2013). Existen otros productos naturales como la quitina, quitosano, turba, levaduras, hongos o la biomasa bacteriana que se pueden utilizar como bioadsorbentes en la eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales e industriales.

3.1. Nuevos materiales en la formulación de adsorbentes

La tendencia actual en la formulación de adsorbentes se basa en la elaboración de nuevos materiales mezclados heterogéneamente, formando un compuesto al que se le denomina "*composite*". Estos composites pueden estar formados por diferentes matrices polisacáridas, siendo el alginato la más habitual. Como material de relleno, se pueden incluir, entre otros, carbón activo, turba y tierra de diatomeas.

Alginato

El alginato es un polisacárido lineal, que consiste en uniones de (1-4) β-D-manuronato y α-L-glucuronato. Las proporciones relativas de manuronato y glucuronato varían dependiendo de la fuente de alginato (Johnson *et al.,* 1997). La fuente más común de alginato es la pared celular de las algas marinas pardas (*Phaeophyceae*) y para fines comerciales el alginato se extrae de las algas marinas (Sirviö *et al.,* 2014). Aunque, la producción por fermentación microbiana es también técnicamente factible (Draget & Taylor, 2011).

El alginato se puede utilizar para la formulación de adsorbentes inmovilizados (Hassan *et al.,* 2014; Zhang *et al.,* 2014). Por ejemplo, Devesa-Rey *et al.,* (2011) propuso la inmovilización de carbón activo en esferas de alginato cálcico y Pérez-Ameneiro *et al.,* (2014) propuso la formulación de un bioadsorbente basado en bagazo compostado atrapado en esferas de alginato cálcico. Estos procesos producen que el adsorbente sea más robusto y pueda mejorar las propiedades de adsorción. Además, la

retirada del adsorbente del agua, pensando en tratamientos in situ, una vez finalizado el proceso de adsorción es mucho más fácil.

Carbón activo inmovilizado

El carbón activo es un adsorbente ampliamente utilizado en diferentes procesos industriales, debido a su capacidad de adsorber gran cantidad de sustancias de diferente naturaleza, ya sean compuestos orgánicos, metales pesados, compuestos clorados, así como sustancias de naturaleza coloreada (Babel & Kurniawan, 2003; Derbyshire *et al.,* 2001). El carbón activo se encuentra en el mercado en forma granular o en forma de polvo, aunque este último presenta una mayor efectividad en los procesos de adsorción debido a su elevada área superficial. Aunque frente a su capacidad de adsorción favorable el carbón activo presenta varios inconvenientes que derivan principalmente de su elevada área superficial. Entre estos inconvenientes encontramos el precio del carbón activo, no ser selectivo e ineficaz para tintes dispersos y tinta, difícil manejo del mismo, así como su facilidad para obturar membranas (Crini, 2006).

El carbón activo inmovilizado en esferas de alginato cálcico, presenta carga negativa y por tanto adsorbe compuestos neutros, como el p-clorofenol, y compuestos cargados positivamente, como el azul de metileno (Lin *et al.,* 2005). Se ha comprobado también, que la adsorción de compuestos cargados negativamente como el ácido gálico o naranja de metilo sobre carbón activo inmovilizado se ve favorecida incrementando la concentración de iones calcio; ya que los iones calcio neutralizan la carga negativa del carbón activo inmovilizado, debido a la unión de los grupos carboxilo y los iones Ca, disminuyendo la repulsión entre las cargas negativas del ácido gálico o del naranja de metilo y las cargas negativas del carbón activo inmovilizado. Por otra parte, la adsorción de los compuestos cargados positivamente como el azul de metileno, se ve favorecida a bajas concentraciones de iones Ca. Por tanto, cuando se utiliza carbón activo inmovilizado el proceso de adsorción se puede controlar fácilmente variando la concentración de $CaCl_2$ utilizada en la formación del gel de alginato cálcico (Lin *et al.,* 2005).

Por otra parte, la capacidad de adsorción del carbón activo inmovilizado se puede ver favorecida cuando se introduce algún otro ion como por ejemplo el Fe (III), que favorece la adsorción del ácido gálico, incluso por encima de los niveles obtenidos utilizando carbón activo sin inmovilizar. Aunque en otros casos puede suceder totalmente lo contrario, por ejemplo la adsorción del azul de metileno disminuye con el incremento de la concentración de iones Fe (III). Esto puede ser debido a que cuando inmovilizamos carbón activo en alginato cálcico en presencia de iones Fe (III) el gel que se forma tiene zonas cargadas positivamente, aunque la carga global que predomine sea la negativa (Lin *et al.,* 2005). Por tanto, se puede decir que las propiedades de adsorción del carbón activo inmovilizado pueden variar en función de la presencia o ausencia de ciertos iones metálicos.

Devesa-Rey *et al.,* (2011) han llevado a cabo un proceso de adsorción de compuestos coloreados, a partir de un agua residual procedente de la industria vitivinícola, en el que se utilizó como adsorbente carbón activo inmovilizado en esferas de alginato cálcico que fue capaz de eliminar la totalidad de los compuestos coloreados con un 100% de eficacia. Estos datos concuerdan con los resultados obtenidos

por Lin *et al.,* (2005) los cuales fueron capaces de eliminar en su totalidad el azul de metileno de una disolución acuosa, utilizando carbón activo inmovilizado en esferas de alginato cálcico.

También, Bustos *et al.,* (2014) empleó carbón activo inmovilizado en alginato para el tratamiento de agua residual procedente de la caña de azúcar. Los mejores resultados se obtuvieron con una relación líquido/sólido 0,5:1 (volumen de agua residual/carbón activo inmovilizado) a pH = 6,5-7 durante 2 horas de adsorción. Bajo estas condiciones se eliminó un 90% de los compuestos coloreados del agua residual de la caña de azúcar. Los resultados de Bustos *et al.,* (2014) concuerdan con los resultados obtenidos por Devesa-Rey *et al.,* (2011), observándose que el carbón activo inmovilizado es un adsorbente eficaz para la eliminación de compuestos coloreados independientemente de la industria de la cual proceda el agua residual.

Turba

La turba es un material poroso y bastante complejo, formado por materia orgánica en diversas etapas de descomposición. Sobre la base de la naturaleza de los materiales que dieron lugar a la misma, la turba se puede clasificar en turba de musgo, turba herbácea, turba leñosa y turba sedimentaria. La turba contiene lignina, celulosa y ácido húmicos y fúlvicos como componentes principales. Estos componentes, especialmente el ácido húmico y la lignina, son grupos funcionales polares, tales como alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos, hidróxidos y éteres fenólicos. Al presentar este carácter polar tiene gran capacidad de adsorción de tintes en disolución.

La estructura celular de la turba hace que sea una opción ideal como eco-adsorbente (Anjaneyulu *et al.,* 2005). La turba es abundante, barata y fácilmente disponible (Brown *et al.,* 2000), lo que hace que la turba sea rentable y se pueda utilizar como eco-adsorbente. La capacidad de adsorción de la turba ha sido demostrada por numerosos investigadores. Así la turba ha sido probada principalmente como adsorbente de metales y compuestos coloreados en el tratamiento de aguas (Allen *et al.,* 2004; Sun & Yang, 2003). Tras la eliminación de tintes ácidos y básicos con turba, se observa que la eficacia del tratamiento es comparable a procesos de adsorción llevados a cabo con carbón activo, mientras que para colorantes dispersos, el rendimiento es mucho mejor (Crini, 2006).

Aunque la utilización directa de la turba tiene varios inconvenientes como baja resistencia mecánica, el incremento de partículas en el agua, pobre estabilidad química, tendencia a reducir o hinchar de tamaño, su difícil manejo y lixiviación de ácido fúlvico (Couillard, 1994) es interesante buscar nuevas formas de presentación de este producto que puedan facilitar su aplicación en el tratamiento de aguas.

Sun y Yang (2003) propuso la utilización de resina mezclada con turba, mediante la oxidación de la turba y su mezcla con alcohol de polivinilo y formaldehido con una capacidad de adsorción de 400-350 mg/g en función del colorante utilizado. Jeffers et al., 1991 investigó la inmovilización de la turba, utilizando polisulfona y N,N-dimetilformamida para la eliminación de metales pesados a partir de aguas contaminadas.

Tierra de diatomeas

Las diatomeas o diatomita son restos fosilizados de algas marinas con un gran poder de retención, tienen una pared celular transparente de sílice y una capa interna de pectina. El contenido orgánico de las diatomeas es destruido una vez que se han muerto, quedando únicamente su esqueleto de sílice en el fondo de los mares. La posterior extracción de esos restos fósiles en el fondo del mar es lo que se conoce como tierra de diatomeas. Pueden encontrarse en muchos medios acuáticos: agua dulce o salada. La alta porosidad y adsorción de la diatomea junto a sus buenos resultados y su abundancia hacen que tenga una gran demanda. El carbón y la tierra de diatomeas tienen una fuerte capacidad de adsorción aunque diferente porosidad, el carbón tiene una estructura macroporosa y la diatomea microporosa. Esta diferente porosidad podría incurrir en una mejora de la adsorción conjunta de ambos adsorbentes. Es por ello por lo que se han buscado diferentes alternativas que exploten esa combinación con otros adsorbentes. Un claro ejemplo es su uso como plantilla, donde además la tierra de diatomea es utilizada como catalizador del carbono debido a su acidez, evitando tener que utilizar ácido sulfúrico evitando un riesgo para el medioambiente (Dong, et al., 2012).

Desde la Universidad de China han llegado a la realización de lo que ellos llaman el carbono de diatomea con plantilla, donde la diatomea es utilizada como molde o plantilla y catalizador. Los mecanismos de preparación se han estudiado en base a la acidez de la diatomea lo cual simplifica el proceso de preparación del carbono. En esa experimentación se ha visto la capacidad de adsorción del carbono en la plantilla de diatomea tomando como referente el azul de metileno como contaminante. De la memoria se concluye que las capacidades de adsorción del azul de metileno sobre los carbonos de diatomita fueron altamente más altos que con el carbono activado. Se concluye que la morfología, porosidad y acidez de la diatomea tienen efectos más que notables sobre el carbono, lo que hace que sea algo prometedor dentro del ámbito de la purificación y adsorción (Dong, et al., 2012). La inmovilización de la tierra de diatomeas llevada a cabo por Senent (2015) demostró que, combinado con hierro metálico, puede reducir la turbidez de aguas con elevadas concentraciones de sedimentos en suspension (>600 NTU) hasta menos de 6 NTU, transformando un agua altamente contaminada en otra apta para su consume, de acuerdo con la legislación vigente.

Referencias

Allen S. & Koumanova B. (2005). Decolourisation of water/wastewater using adsorption. Journal of the University of Chemical Technology, 40, 175-192.

Allen S.J., Mckay G. & Porter J.F. (2004). Adsorption isotherm models for basic dye adsorption by peat in single and binary component systems. Journal of Colloid and Interface Science, 280, 322-333.

Anjaneyulu Y., Sreedhara Chary N. & Samuel Suman Raj D. (2005). Decolourization of industrial effluents - Available methods and emerging technologies-A review. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 4, 245-273.

Babel S. & Kurniawan T.A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. Journal of Hazardous Materials, 97, 219-243.

Bailey S.E., Olin T.J., Bricka M. & Adrian D.D. (1999). A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals. Water Research, 33, 2469-2479.

Bustos G., Carrizales M.A., Cervantes E., Vecino X. & Moldes A.B. (2014). Treatment of wastewater from sugarcane using entrapped activated carbon. CYTA-Journal of Food, 12, 189-194.

Calleja Pardo G., García Herruzo F., Martínez A. de Lucas, Prats Rico D. & Rodríguez Maroto J.M. (1999). Introducción a la Ingeniería Química, Ed. Síntesis, 313-322.

Couillard D. (1994). The use of peat in wastewater treatment. Water Research, 28, 1261-1274.

Crini G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. Bioresource Technology, 97, 1061-1085.

Derbyshire F., Jagtoyen M., Andrews R., Rao A., Martin-Gullon I. & Grulke E. (2001). Carbon materials in environmental applications. In: Radovic, L.R. (Ed.), Chemistry and Physics of Carbon, Vol. 27. Marcel Dekker, New York, pp. 1-66.

Devesa-Rey R., Bustos G., Cruz, J.M. & Moldes, A.B. (2011). Optimisation of entrapped activated carbon conditions to remove coloured compounds from winery wastewaters. Bioresource Technology, 102, 6437–6442.

Draget K.I. & Taylor C. (2011). Chemical, physical and biological properties of alginates and their biomedical implications. Food Hydrocolloids, 25, 251-256.

Hassan A.F., Abdel-Mohsen A.M., Fouda M.M.G. (2014). Comparative study of calcium alginate, activated carbon, and their composite beads on methylene blue adsorption. Carbohydrate Polymers, 102, 192-198.

Lin Y.B., Fugetsu B., Terui N. & Tanaka S. (2005). Removal of organic compounds by alginate gel beads with entrapped activated carbon. Journal of Hazardous Materials, 120, 237-241.

Pérez-Ameneiro M., Vecino X., Vega L., Devesa-Rey R., Cruz J.M. & Moldes A.B. (2014). Elimination of micronutrients from winery wastewater using entrapped grape marc in alginate beads. CyTA-Journal of Food, 12, 73-79.

Sanghi R. & Verma P. (2013). Decolorisation of aqueous dye solutions by low-cost adsorbents: a review. Coloration Technology, 129, 85-108.

Sharma P., Kaur H., Sharma M. & Sahore V. (2011). A review on applicability of naturally available adsorbents for the removal of hazardous dyes from aqueous waste. Environmental Monitoring and Assessment, 183, 151-195.

Sirviö J.A., Kolehmainen A., Liimatainen H., Niinimäki J. & Hormi O.E.O. (2014). Biocomposite cellulose-alginate films: Promising packaging materials. Food Chemistry, 151, 343-351.

Sun Q. & Yang L. (2003). The adsorption of basic dyes from aqueous solution on modified peat-resin particle. Water Research, 37, 1535-1544.

Yagub M.T., Sen T.K., Afroze S. & Ang H.M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. Advances in Colloid and Interface Science, 209, 172-184.

DETERMINACIÓN DE LA CAUSA DE ROTURA DE UN CILINDRO PERTENECIENTE A UN MOTOR DE UNA AERONAVE

Valles González María Pilar[1,*], González Meije Alejandro[1], García Martínez María[1], Pastor Muro Ana[1]

[1] INSTITUTO NACIONAL DE TÉCNICA AEROESPACIAL (INTA)

***** E-Mail: vallesgp@inta.es

Abstract:

Uno de los seis cilindros pertenecientes a un motor de cuatro tiempos de una aeronave se había fracturado en dos fragmentos, habiéndose producido dicha rotura entre la 13ª-14ª aleta de refrigeración. Para determinar la causa de la rotura fue necesaria la observación preliminar del conjunto del motor para comprobar el estado de las válvulas, asientos y bujías, y verificar si éstas estaban posicionadas correctamente y no había existido ningún problema de funcionamiento previo a la rotura. Posteriormente se llevó a cabo una caracterización química y mecánica del material, un análisis fractográfico de la superficie de rotura, y mediante técnicas metalográficas y microscópicas se determinó el estado de tratamiento del cilindro. También se hicieron observaciones de la superficie exterior e interior del cilindro con el fin de detectar defectos tales como grietas, picaduras, etc. En la pared externa se localizaron diversas picaduras. Se comprobó que el material era un acero del tipo AISI 4140 templado y revenido, se observó que la rotura era frágil con caracteres fractográficos típicos de una rotura progresiva, llegando a la conclusión que se había iniciado en una picadura generada por corrosión, localizada en la pared exterior del cilindro, desarrollándose por un mecanismo de fatiga.

Keywords: cilindro motor cuatro tiempos; microestructura; microscopía; fallo por fatiga; corrosión; estriaciones de fatiga

1. Introducción

Son múltiples los fallos que han sido reportados relacionados con el tipo de motor de cuatro tiempos que se va a someter a estudio en este trabajo. Estos fallos han afectado sobre todo a varios

componentes críticos del motor tales como bielas, pistones, cigüeñal y cilindros. Aunque en alguna ocasión la causa de la rotura hayan sido los defectos en la fabricación del material, o un ensamblaje incorrecto, en la mayoría de los casos la rotura se ha producido por desgaste o por fatiga. Así como los fallos por desgaste casi siempre son evitables, ya que se pueden detectar con anticipación a través de inspecciones de los filtros de aceite, análisis del aceite comprobando el tipo de partículas que contiene, a través de pruebas de compresión y con inspecciones boroscópicas, los fallos por fatiga suelen ocurrir de forma inesperada. La posibilidad de este mecanismo de rotura debe ser tenida en cuenta ya durante las fases iniciales de diseño, de tal forma que debe garantizarse que el elemento en cuestión no sufra rotura durante el número de horas de funcionamiento que se le asigne, o que entre dos períodos de inspección establecidos en el correspondiente programa, la longitud de grieta no haya alcanzado un valor crítico. Siempre hay que seguir los procedimientos establecidos por los fabricantes en cuanto a secuencia de revisiones y cambios de componentes. Si el motor opera dentro de sus límites de diseño, la vida útil de fatiga de los componentes del motor es algo que puede controlarse durante las revisiones. Los cilindros a menudo son reparados y reutilizados de acuerdo a su estado y a las pruebas y ensayos no destructivos realizados [1, 2, 3].

La rotura por fatiga se incluye dentro del grupo de roturas progresivas y requiere la acción combinada de cargas variables repetidas y tiempo. Se produce por aplicación repetida de cargas un número suficiente de veces, sin que el nivel nominal de esfuerzos aplicados sobrepase el valor que, en una sola aplicación, provocaría la rotura. El mecanismo de fatiga puede operar tanto iniciando y propagando una grieta, como solamente propagando una grieta que se ha generado por otro mecanismo o un defecto preexistente. Las grietas de fatiga se inician en superficies libres del material, exteriormente, que son los casos más frecuentes, o bien interiormente, en un defecto de forja o fundición, microgrieta de otro origen, o inclusiones del propio material. En todo caso actúan factores concentradores de esfuerzos, que en una pequeña zona al aplicar la carga, se sobrepasa el límite elástico local, produciéndose el consiguiente deslizamiento de planos cristalográficos, acompañado de una elevada densidad de dislocaciones asociadas a los mismos, dando lugar a la aparición de microgrietas. Una vez alcanzada por la grieta una determinada longitud, se propaga en cada uno de los ciclos, formando estriaciones dúctiles. Posteriormente se llega a una zona en la que el avance de la grieta se produce tanto por estriaciones dúctiles como por roturas parciales por carga estática, apareciendo cúpulas y seudodescohesiones. Finalmente cuando la grieta llega a una longitud crítica, se produce la rotura por carga estática de la sección remanente del material [4, 5, 6].

En este trabajo se presenta el procedimiento que se ha seguido para la determinación de la causa de rotura de uno de los seis cilindros de un motor de cuatro tiempos de una aeronave.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

El análisis químico del material del cilindro fue realizada mediante un equipo de fluorescencia de rayos X (FRX), Panalytical modelo PW2404 y por las técnicas de fusión y combustión con equipos LECO, y se muestra en la Tabla 1. Según esta composición el material corresponde a un acero del tipo AISI/SAE 4140.

Sobre una sección longitudinal del cilindro, en una zona alejada de la rotura, se llevó a cabo un ensayo de dureza empleando un durómetro Galileo Rockwel 4314-016400, obteniendo como resultado un valor medio de 41,5 ± 0,5 HRC.

Las probetas metalográficas utilizadas para la caracterización microestructural, se consiguieron embutiendo las zonas de interés en resina conductora, y después de un pulido adecuado y un ataque químico con el reactivo Nital 2% (2 ml de HNO_3 en 100 ml de etanol), se obtuvo la microestructura en un microscopio óptico Leica MEF4M. En este mismo microscopio utilizando un programa de análisis de imagen Leica Q550MW, se obtuvo su tamaño de grano cuando estas mismas probetas fueron atacadas con el reactivo Vilella (5 ml de HCl, 1 g de ácido pícrico y 100 ml de etanol), empleando el método planimétrico según la norma ASTM E112.

Para la observación de la superficie de fractura se utilizaron una lupa binocular Leica Wild M10 y un microscopio electrónico de barrido (SEM) Jeol 840 equipado con un sistema de microanálisis por dispersión de energías de rayos X (EDX) Bruker.

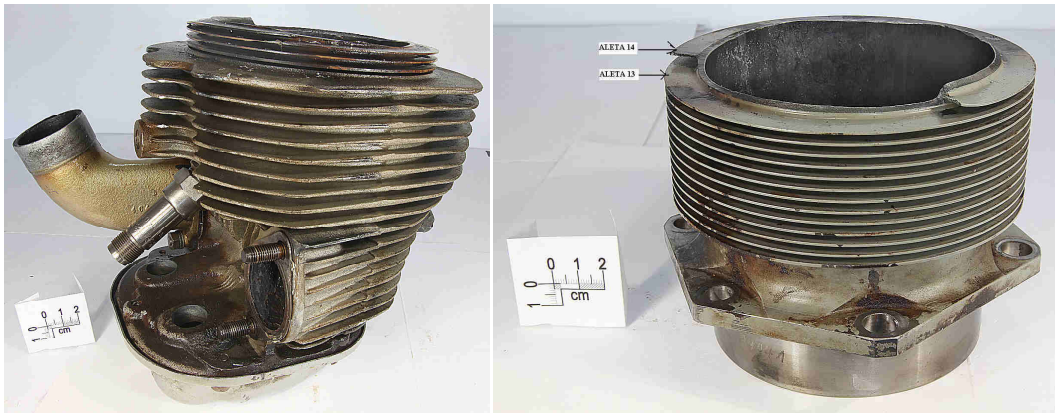
Fe	**C**	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Cr**	**Mo**
Base	0,41	0,30	0,88	0,017	<0,005	1,10	0,19

Tabla 1. Composición química del acero expresado en %Peso.

3. Resultados y Discusión

3.1. Observación visual

El cilindro estaba fragmentado en dos partes. Fue realizada una observación previa del cilindro roto, Fig. 1, comprobando que la cabeza del pistón se encontraba cubierta de improntas de gran entidad, Fig. 2, que por su geometría se habían producido después de la rotura del cilindro. Las bujías estaban posicionadas correctamente, así como las cabezas de las válvulas de admisión y de escape y sus asientos. En la pared interior del cilindro no se apreciaban señales de funcionamiento anormal.



a) b)

Figura 1. Cuerpo del motor que sufrió la rotura en su estado de recepción. a) Vista lateral. b) Vista frontal.

Todo esto confirmó que no había existido ningún problema de funcionamiento previo a la rotura.



a) b)

Figura 2. Pistón correspondiente al motor en su estado de recepción. a) Vista lateral. b) Vista frontal.

La observación del cilindro estableció que la rotura se desarrollaba entre las aletas de refrigeración 13ª-14ª, Fig. 3.



a) b)

Figura 3. a y b) Vista lateral de la rotura que se desarrolla en las aletas de refrigeración.

3.2. Estudio macrofractográfico

La superficie de rotura presentaba dos áreas diferenciadas: una, cuyo plano de desarrollo era perpendicular al eje de revolución del cilindro (zonas 1, 2 y 3 de la Fig. 4), y otra en la cual dicho plano se desarrollaba en bisel de unos 45º de inclinación respecto a la sección transversal (zona 4 en la Fig. 4). La superficie de rotura era suave y de carácter frágil. En las zonas mencionadas anteriormente se apreció lo siguiente:

Zonas 1 y 3: Se observaban marcas de avance y detención de grieta en dirección circunferencial (marcas de playa), típicas de una rotura desarrollada por un micromecanismo de fatiga, Figs. 5a y 5e.

Zona 2: Corresponde a la zona de inicio de la rotura, Fig. 5b. Se observó que el origen se situaba en las proximidades de la superficie exterior de la aleta, Fig. 5c, avanzando circunferencialmente por el espesor de la superficie del cilindro que se encuentra entre las dos aletas. La superficie interna presentaba un considerable aplastamiento. En el origen, Fig. 5d, había un gran depósito de lo que podrían ser productos de oxidación-corrosión.

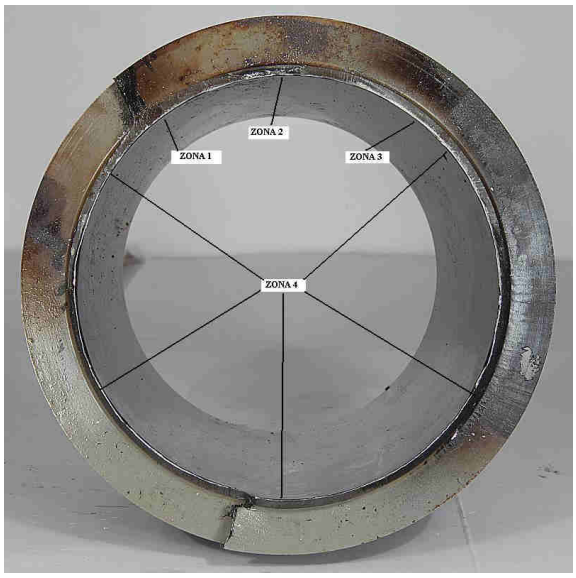


Figura 4. Vista frontal de la rotura. Se señalan las zonas a estudiar.

Zona 4: La rotura se desarrollaba en bisel a 45º de inclinación respecto del plano transversal que es perpendicular al eje de rotación del cilindro, típico de una rotura por sobrecarga estática, Fig. 5f.

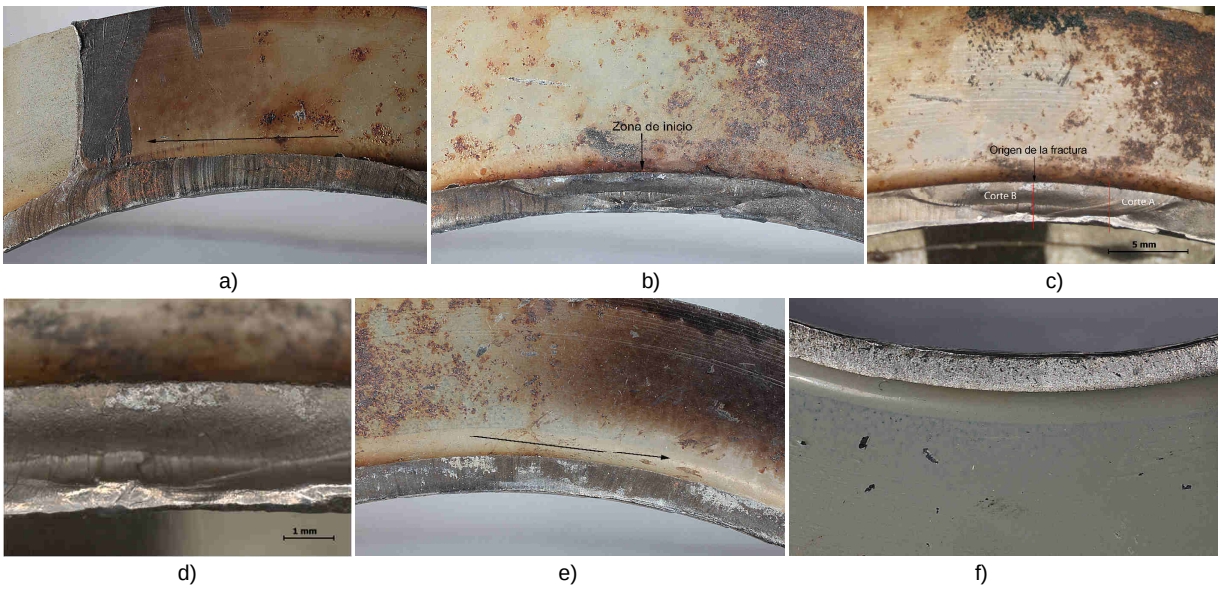
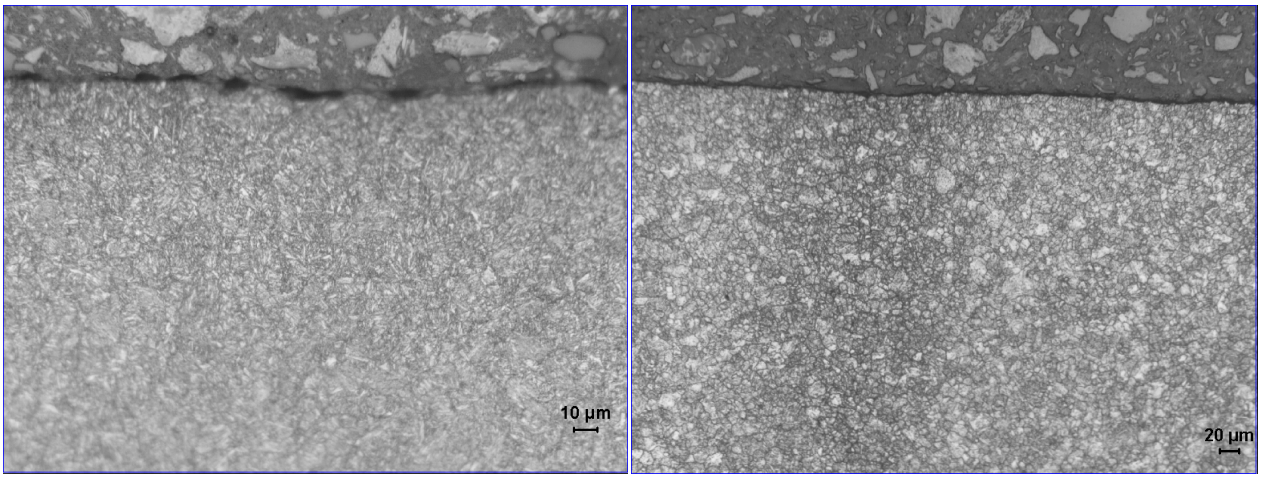


Figura 5. Superficie de rotura. a) Zona 1. b, c y d) Zona 2. e) Zona 3. f) Zona 4.

3.3. Caracterización microestructural

La Fig. 6 muestra una estructura de martensita revenida, perteneciente a una probeta metalográfica obtenida de una sección longitudinal de la zona 2, como corresponde al acero del cilindro después de haber sido sometido a un tratamiento térmico de temple y revenido. También se recoge una imagen del tamaño de grano cuyo índice se encuentra entre 10-11, que corresponde a 7,5 µm según ASTM E112.

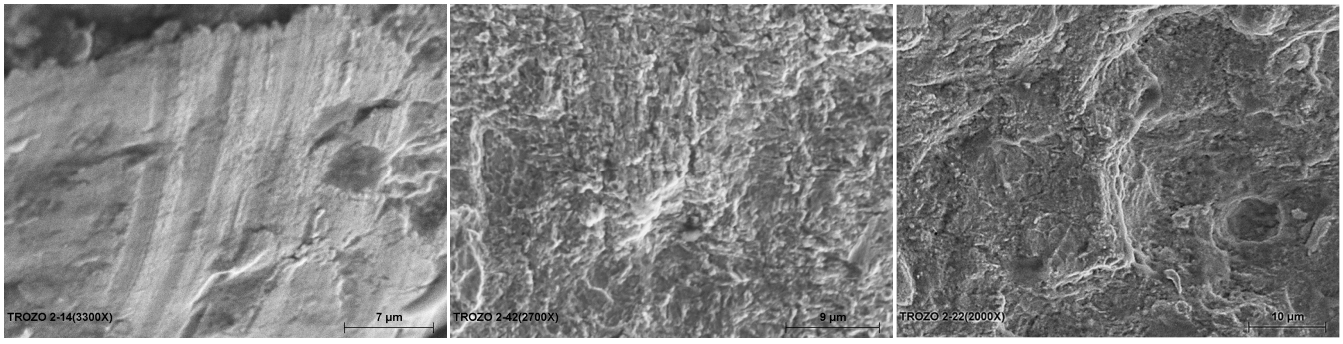


a) b)

Figura 6. a) Estructura de martensita revenida. b) Tamaño de grano.

3.3. Estudio microfractográfico

Localizada la zona de inicio de la fractura, zona 2, mediante un examen exhaustivo de la misma, se determinó la presencia de estriaciones de fatiga y microgrietas asociadas a estriaciones, en la zona inicial de propagación de la grieta, que luego en estadios de avance de la misma, aparecen estos caracteres microfractográficos mezclados con cúpulas o seudodescohesiones que corresponden a roturas parciales por carga estática, Fig. 7.



a) b) c)

Figura 7. a) Estriaciones de fatiga. b) Microgrietas asociadas a estriaciones. c) Cúpulas.

Una inspección de la zona correspondiente al inicio de la fractura, pero en la zona adyacente de la superficie externa de la aleta, reveló la existencia de una picadura, que una vez analizado por EDX el depósito que en ella se encontraba, se comprobó la existencia de elementos tales como oxígeno y cloro, que corresponden a productos de oxidación-corrosión, Fig. 8.

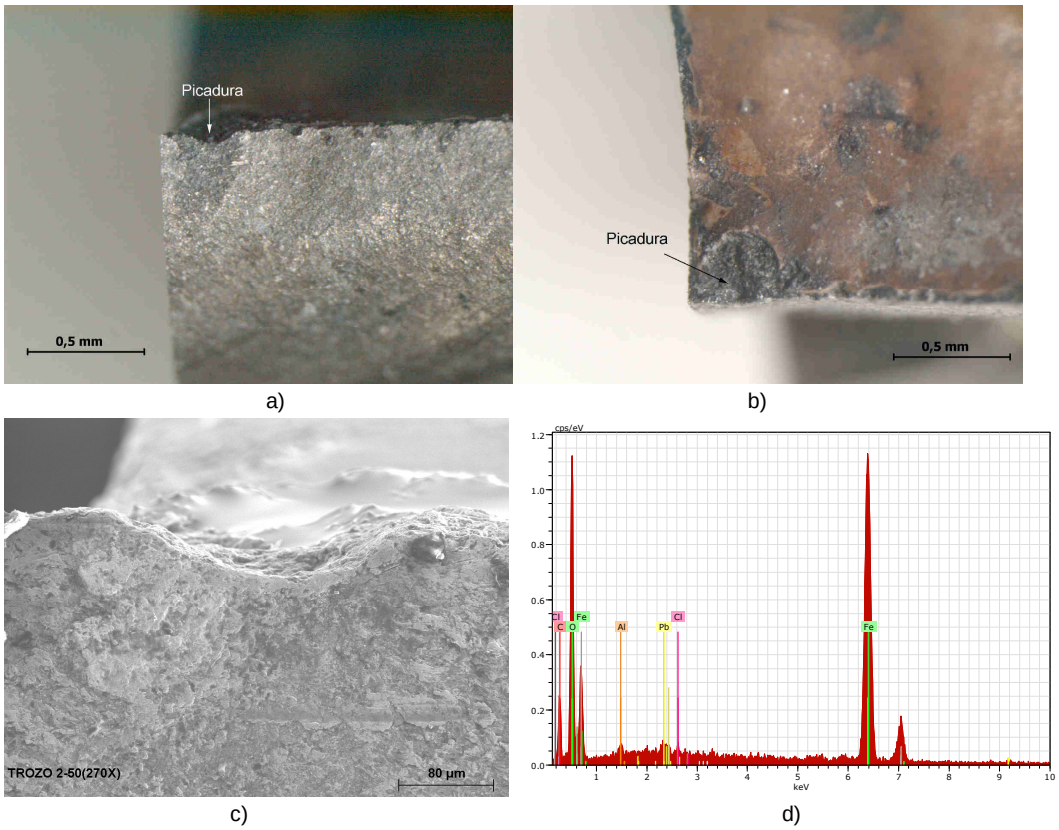


Figura 8. a) Picadura en la zona de inicio de la rotura. b) Misma picadura en el exterior de la aleta. c) Picadura a más aumentos. d) Análisis por EDX de los productos de corrosión.

En la zona 4, zona de salida de la grieta en la que se había producido la rotura final por sobrecarga estática, se observaron cúpulas de pequeño desarrollo como correspondía a un acero en el estado de tratamiento en el que se encontraba, Fig. 9.

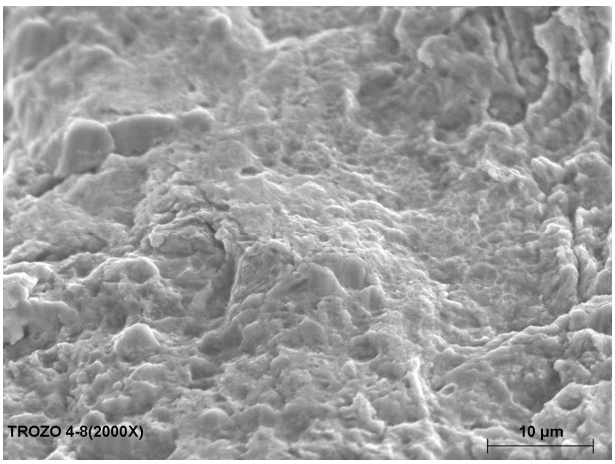


Figura 9. Cúpulas de pequeño desarrollo en zona 4.

4. Conclusiones

El cilindro del motor que había sido fabricado con un acero del tipo AISI 4140, presenta una microestructura de martensita revenida y un valor de dureza de 41,5 HRC, que corresponden a un estado de temple y revenido.

No se encuentran señales que indiquen un comportamiento mecánico anómalo en el funcionamiento de los diferentes elementos del motor previo a la rotura.

Teniendo en cuenta los caracteres fractográficos de la superficie de fractura que presenta el cilindro, la rotura se ha producido por un mecanismo de fatiga, cuyo origen se encuentra en una picadura generada por corrosión, localizada en la pared exterior del cilindro, entre las aletas 13ª-14ª, consumándose la rotura final por sobrecarga estática.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración de todo el personal del Área de Materiales Metálicos del INTA y en especial al del Laboratorio de Caracterización Microestructural y Microanalítica.

Referencias

1. Transportation Safety Board of Canada. *Aviation Investigation Report A08C0145,* **2008**.
2. Goel N; Case Study: Failure Analysis of Diesel Engine Cylinder Liners. **2009.**
3. Transportation Safety Board of Canada. *Aviation Investigation Report A10O0101,* **2010.**
4. Pintado Fé J.M*; Fallos en Servicio de los Materiales Metálicos,* 1ª ed.; C.R.P. S.A., **1992**.
5. Becker W.T.*; Principles of Failure Analysis. Fatigue Failures,* ASM International, **2002**.
6. *Fractography,* ASM Handbook Vol. 12, ASM International, **1987**.

Estudio preliminar de la problemática de aleaciones de Al-Mg en la Armada y posibilidades de solución

Pastor Núñez de Castro, Ángel Santos [1]* Laguna Iglesias, Manuel [2]

[1*] Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Armas Navales ETSIAN.
Email:angel_pastor@hotmail.com (APNC)

[2] Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Armas Navales ETSIAN.
Email: laguna.mano@gmail.com (MLI)

Abstract: Las aleaciones de Al-Mg son uno de los materiales básicos en la construcción naval al ofrecer un excelente compromiso entre peso, coste, soldabilidad, y resistencia estructural y a la corrosión; que favorecen el empleo de las aleaciones de Al-Mg en aplicaciones como superestructuras, donde el peso es un factor fundamental. A pesar de estas ventajas, la resistencia de las aleaciones Al-Mg a la fatiga mecánica y a las altas temperaturas es habitualmente inferior a la de los aceros navales. Además son vulnerables a ciertos tipos de corrosión como el agrietamiento por corrosión bajo tensión "Stress Corrosion Cracking" (SCC). El SCC es un fenómeno complejo que se inicia con la migración y progresiva concentración en los bordes de grano de los iones de Mg (sensibilización) favorecida por la temperatura. La ruptura de la superficie, habitualmente por causas mecánicas, expone el material sensibilizado a la intemperie. En ambientes marinos, éste se corroe rápidamente a través de los bordes de grano. Recientes investigaciones [2] [6] han confirmado la sensibilización en rangos de temperaturas (40º C a 60º C) muy inferiores a los considerados en los tests habituales. Actualmente se están desarrollando diferentes estrategias para minimizar el impacto de la sensibilización.

Keywords: aleaciones aluminio magnesio; sensibilización; agrietamiento por corrosión bajo tensión; fase β (Al_2Mg_3); construcción naval

1. Introducción

Las aleaciones de aluminio son actualmente uno de los materiales fundamentales en la construcción naval, al proporcionar un buen compromiso entre peso, coste, facilidad de soldadura y resistencia estructural y a la corrosión [1]. Aunque el coste al peso de las aleaciones de aluminio es hasta cinco

veces superior al acero naval, la reducción de peso (de hasta el 50%) y la resistencia a la corrosión favorecen su empleo en buques de gran velocidad o en elementos en los que el peso es un aspecto fundamental (elementos de la superestructura).

A pesar de estas ventajas, las aleaciones de aluminio presentan ciertas limitaciones respecto al acero. Su resistencia mecánica disminuye considerablemente por la fatiga mecánica y el incremento de temperatura. Su comportamiento ante la corrosión es también diferente. Por un lado su mayor electronegatividad se ve compensada parcialmente por su capacidad de pasivación superficial. Por otro lado las aleaciones de aluminio están sometidas a mecanismos electroquímicos complejos (sensibilización) que originan fenómenos de corrosión interna difíciles de detectar y de corregir una vez iniciados.

El fenómeno de sensibilización es actualmente, junto a la fatiga mecánica, uno de los aspectos que más limitan el empleo de las aleaciones de aluminio en el sector naval. Recientes investigaciones han confirmado la existencia de fenómenos de sensibilización a temperatura ambiente (40ºC-70ºC), muy inferiores a las contempladas hasta la fecha en los ensayos normalizados.

En las aleaciones de aluminio que contienen por encima del 3% en peso de Mg, y expuestas a temperaturas elevadas, el Mg en saturación en la matriz tiende a migrar a lo largo del tiempo hacia los bordes de grano donde precipita en forma de fase β (Al_2Mg_3).

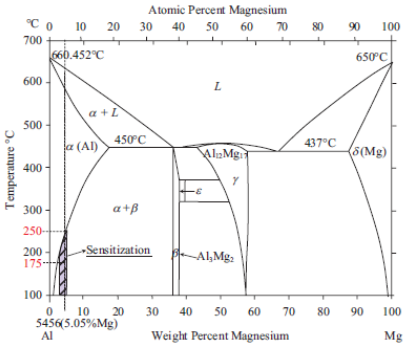


Figura 1. Diagrama de composición del de sistema binario Al-Mg con indicación de la región en la que se producen los fenómenos de sensibilización de las aleaciones de uso naval [2]

Esta fase β es fuertemente anódica respecto a la matriz de aluminio y supone una zona de corrosión preferencial en la aleación. Mientras se mantiene la integridad de la película pasivizante superficial que protege el interior de la aleación, la situación es difícil de detectar.

Sin embargo, en presencia de:

- Tensiones mecánicas (cargas estructurales, esfuerzos mecánicos o tensiones residuales de procesos de soldadura) que favorecen la rotura de la película pasivizada, y la exposición del interior sensibilizado al exterior.

- Un ambiente corrosivo (humedad y cloruros) que favorece el intercambio iónico y alimenta las reacciones químicas responsables de la corrosión).

La corrosión avanza rápidamente a través de los bordes de grano. Este proceso que combina la sensibilización, las tensiones mecánicas y el ambiente corrosivo se denomina agrietamiento por corrosión intergranular bajo tensión IGSCC, o directamente SCC (Stress Corrosion Cracking).

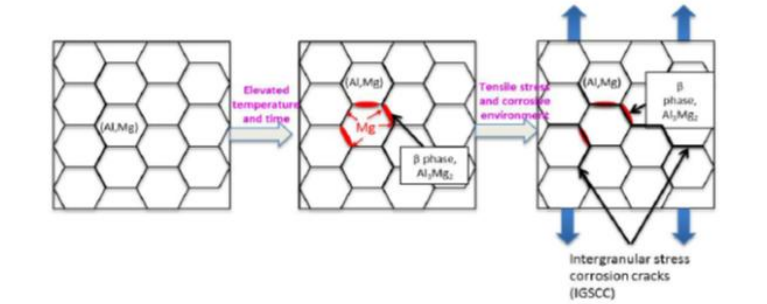


Figura 2. Mecanismo de corrosión intergranular bajo tensión [3]

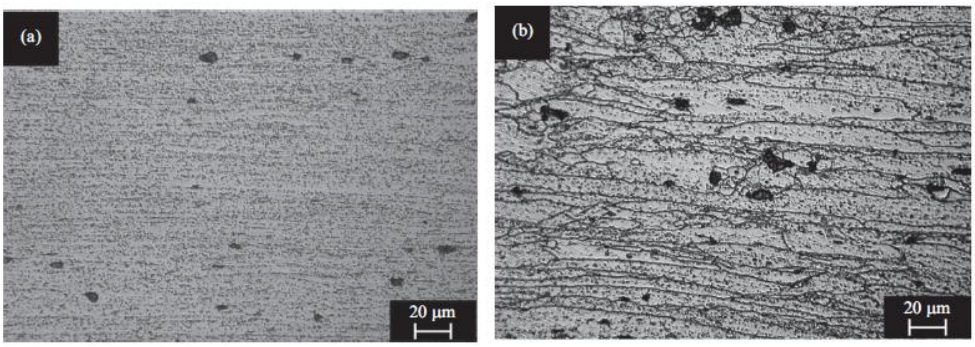


Figura 3. Microestructura de aleación 5456-H116 en estado inicial (a) en el que no se detectan los bordes de grano y sensibilizada (b) mostrando una red continua de bordes de grano [2]

En el caso concreto de la Armada, a partir de 2006 (unos 15 años después del inicio de la construcción), se empezaron a detectar en la superestructura de las fragatas tipo Santa María grietas debidas a la sensibilización de la aleación de aluminio-magnesio. Estas grietas comprometen la estanqueidad y han supuesto un incremento considerable en los costes de mantenimiento.

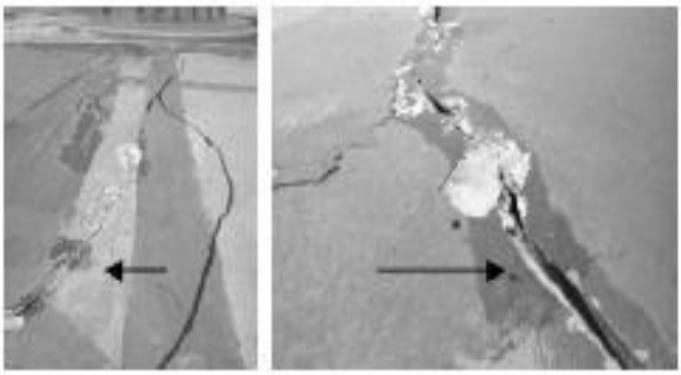


Figura 4. Corrosión bajo tensión en superestructura de cruceros tipo Ticonderoga. [4]

La US Navy, con problemas similares en sus fragatas FFG y en sus cruceros CG Ticonderoga, está desde hace años adoptando una estrategia proactiva para comprender los mecanismos asociados a la sensibilización y proponer medidas para minimizar sus efectos. En concreto la oficina de investigación

naval (Office of Naval Research ONR) ha establecido en [5] las siguientes líneas de trabajo en este campo:

- Modelos matemáticos para la caracterización de la sensibilización.
- Técnicas no destructivas de diagnóstico de la sensibilización, aplicables directamente a bordo.
- Revestimientos superficiales que minimicen la exposición del material sensibilizado.
- Revestimientos de alta reflectividad que reduzcan la carga solar.
- Tratamientos de reversión del material sensibilizado aplicables directamente a bordo.
- Métodos de soldadura que minimicen la sensibilización del material.

Conscientes de la situación, la industria del aluminio está además desarrollando nuevos temples con mayor resistencia a la sensibilización.

Yakun Zhu desarrolla en [6] un completísimo estudio sobre la sensibilización de aleaciones de aluminio para aleaciones con distintos tratamientos térmicos y sometidas a temperaturas entre 40ºC y 70ºC durante periodos prolongados de tiempo (hasta 18 meses). El objetivo de ese estudio es depurar un modelo matemático de predicción del grado de sensibilización, de forma que sea válido en condiciones de exposición prolongada (hasta varios años) y temperaturas moderadas (40º a 70ºC), que son las que más parecen condicionar el fenómeno de sensibilización de aleaciones de aluminio en las construcciones navales. Algunas de las conclusiones más importantes del estudio se pueden sintetizar en el siguiente gráfico:

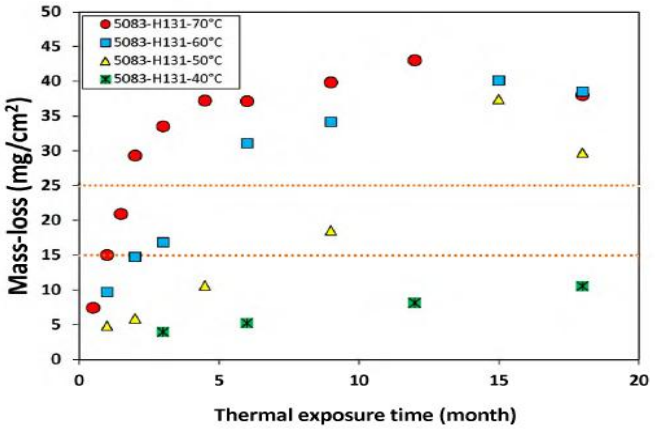


Figura 5. Correlación entre pérdida de masa según ensayo ASTM G67 y tiempo de exposición térmica (en meses). [6]

– Para periodos amplios de tiempo (años), la sensibilización tiene lugar incluso a temperaturas tan reducidas como 40ºC, alcanzables en condiciones de irradiación solar intensa.

– A bajas temperaturas (inferiores a los 50ºC) y para pérdidas de masa moderadas (inferiores a los 25 mg/cm^2) el grado de sensibilización parece seguir una distribución lineal con la duración de la exposición. Según el criterio ASTM G67, el umbral de sensibilización comienza a partir de los 15 mg/cm^2 y a partir de los 25 mg/cm^2 ya se considera sensibilizada.

– El grado de sensibilización parece estabilizarse al alcanzar un valor en torno a los 40 mg/cm^2 de pérdidas correspondientes a la sensibilización total (agotamiento total del Mg de la matriz para

transformarse en fase β). (El autor indica en su estudio que no toda la pérdida de material se puede atribuir al desprendimiento de granos por la corrosión de fase β y que un porcentaje de la pérdida de este material podría ser debida a la corrosión de la propia matriz.

Respecto a la determinación cuantitativa de la sensibilización, el test normalizado [7] ASTM G67 basado en un ataque químico controlado y medición de la pérdida de masa resultante es lento, laborioso e implica la destrucción de las muestras. Se han intentado desarrollar métodos no destructivos de determinación basados en ultrasonidos [8]. Otras técnicas de determinación, incluyen el empleo combinado de espectroscopia de rayos X (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy EDS) y microscopio de barrido electrónico (Scanning Transmission Electron Microscopy STEM). La capacidad de estas técnicas es considerable y su combinación con el tratamiento automatizado de imágenes podría ser la base para un procedimiento de determinación cuantitativa no destructivo más ágil que el actual.

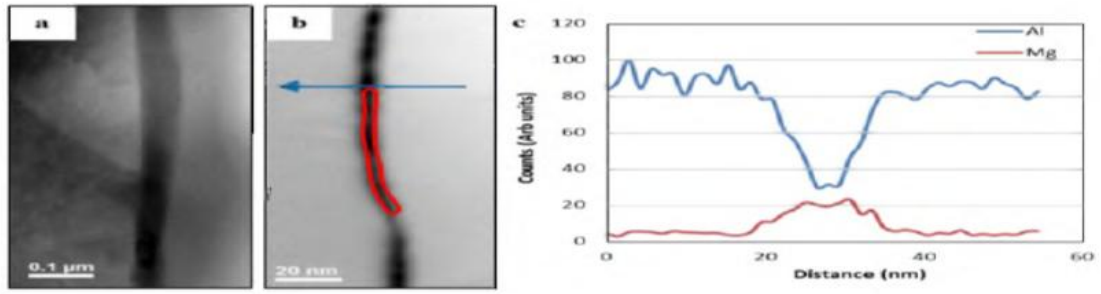


Figura 6. Imágenes de bordes de grano obtenidas a) 175ºC durante 15 días b) 70ºC durante un año. c) sección escaneada mediante EDS correspondiente a la línea azul de la imagen b) mostrando la relación 3:2 para el Al-Mg característica de la fase β. El área de la zona roja también fue cuantificada mediante STEM-EDS. [6]

Respecto a un posible proceso de reversión de la sensibilización, el siguiente gráfico data de 1959 y ya describe el comportamiento del magnesio en las aleaciones de aluminio.

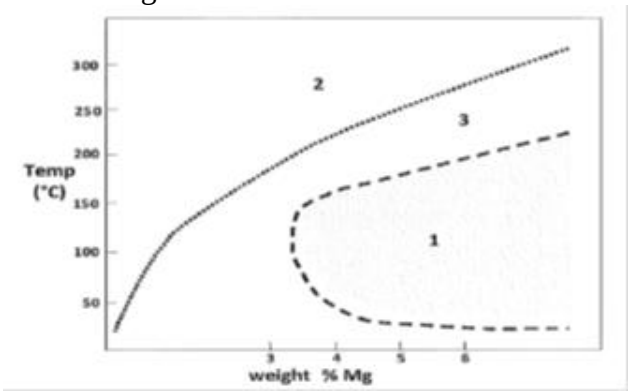


Figura 7. Comportamiento del magnesio en aleaciones Al_Mg en función de la composición y la temperatura. [9]

En función del porcentaje en Mg y su temperatura, las aleaciones de aluminio magnesio pueden resultar sensibilizadas (zona 1) con precipitación de la fase β en los bordes de grano. La zona 2 indica

la zona en el que la aleación pierde su temple y gran parte de sus propiedades mecánicas. En la zona 3 es posible solubilizar la fase β para facilitar de nuevo la distribución homogénea del Mg en la aleación sin comprometer excesivamente las propiedades mecánicas.

En base a este comportamiento, en [10] se propone un procedimiento para revertir la sensibilización mediante el calentamiento de forma controlada de la zona de la estructura afectada. La temperatura de calentamiento se sitúa en torno a los 250ºC y el tiempo entre 10 y 30 minutos. De modo que es posible reducir considerablemente el grado de sensibilización sin llegar a afectar a las propiedades mecánicas.

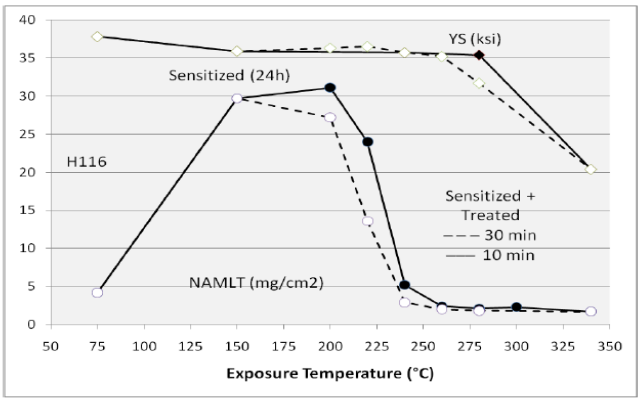


Figura 8. Evolución del grado de sensibilización y las propiedades mecánicas en función de la temperatura y el tiempo de exposición. Kramer et al 2013. [10].

Finalmente, existen en el mercado revestimientos de uso naval con una alta reflectividad en la banda de infrarrojos que disminuyen considerablemente las temperaturas alcanzadas a consecuencia de la irradiación solar. Además de reducir las necesidades de refrigeración a bordo, estos revestimientos podrían reducir considerablemente o incluso llegar a detener el proceso de sensibilización.

2. Sección experimental.

2.1 Objeto del trabajo.

La sensibilización de aleaciones de Al-Mg tiene un impacto considerable en el mantenimiento de las superestructuras de las fragatas tipo Santa María de la Armada Española. Este estudio pretende identificar en la bibliografía métodos que permitan retardar la aparición o incluso revertir los efectos de la sensibilización, evaluar las posibilidades de aplicación práctica a bordo, y establecer la combinación más económica y efectiva de las distintas alternativas disponibles. Los objetivos incluyen:

1. Caracterizar el comportamiento de sensibilización a baja temperatura de los tratamientos térmicos recientemente desarrollados para su minimización, como el Nautic H128 de Alcoa para la aleación 5083.
2. Esto permitiría incluir la resistencia a la sensibilización a bajas temperaturas como uno de los criterios a la hora de seleccionar aleaciones de aluminio-magnesio para futuras construcciones navales (ej Programa F110) y ayudar a evaluar la aleación 5083 con el temple H128 en base a este criterio. Comprobar la viabilidad de la aplicación a bordo de procesos de

reversión, así como evaluar los posibles efectos a largo plazo sobre el material (deterioro del material o sus propiedades, efectos de memoria, etc.) ante ciclos continuados de sensibilización y reversión.

3. Establecer el grado de sensibilización previsible en las superestructuras en función del tiempo y condiciones de exposición para la programación de acciones periódicas de inspección y corrección de la sensibilización.

Según [6] en el rango más habitual de temperaturas previsto para la exposición solar (40ºC a 50ºC), es previsible una distribución lineal del grado de sensibilización con el tiempo de exposición en el rango previsto de temperaturas, lo que facilita la estimación del grado de sensibilización en función del tiempo de exposición.

En función de los resultados de [6] y los problemas de sensibilización identificados en los buques, se estima que entre la construcción y la vida operativa de un buque podrían ser necesarios entre 2 y 8 tratamientos de reversión para mantener las aleaciones de Al-Mg en valores aceptables de sensibilización (inferiores a 25 mg/cm^2) en función del tipo de la composición y el perfil de exposición térmica.

4. Evaluar la posible reducción de la sensibilización mediante revestimientos de muy alta reflectividad que reduzcan la temperatura de la superficie expuesta en condiciones de alta irradiación solar.

2.2 Métodos y materiales.

Para el objetivo 1 se inducirá la sensibilización de muestras de aleación 5083 con temple H128 a temperaturas de 50º y 70º durante un plazo de hasta 10 meses. Periódicamente se medirá el grado de sensibilización conforme al ensayo normalizado ASTM G67 hasta desarrollar una curva de tiempo sensibilización similar a las desarrolladas en la figura 5.

Para el objetivo 2, aprovechando los periodos de inmovilización de las FFG, se propondrá a la Jefatura de apoyo logístico la realización de pruebas de reversión de sensibilización localizadas, empleando un método de calentamiento como almohadillas eléctricas y controlando la temperatura del tratamiento con ayuda de una cámara termográfica.

Para el objetivo 3 se recopilará información disponible sobre temperaturas e irradiación solar en escenarios de operaciones más habituales.

Para el objetivo 4, se propondrá a la Jefatura de Apoyo Logístico la toma de imágenes termográficas de la superestructura de las FFG en condiciones controladas, para evaluar el comportamiento (temperatura de la superestructura) de los distintos tipos de revestimiento actualmente en condiciones de alta irradiación solar.

3. Conclusiones.

La sensibilización de las aleaciones Al-Mg impacta considerablemente en el mantenimiento de los buques militares. Actualmente existen diversas iniciativas entre las que destacan la reversión mediante calentamiento controlado y el empleo de revestimientos de alta reflectividad que adecuadamente combinados pueden minimizar o resolver el efecto de la sensibilización.

Agradecimientos

Al personal de la empresa Andre Roman Soldaduras Especiales SL, quienes ya en 2008 sugirieron la sensibilización a temperaturas moderadas como una posible causa de los agrietamientos anómalos (no atribuibles a fatiga) que aparecían en la superestructura de las fragatas FFG de la Armada.

Referencias

1. Sielski, R. A., "The history of aluminum as a deckhouse material" *Naval Engineers Journal*, Vol. 99, No. 3, pp. 165-172 (1987).
2. Ren-Yu Chen and Cheng-Chyuan Lai, "Reversing sensitization of naturally exfoliated 5456-H116 Aluminum alloys "Journal of Marine Science and Technology, Vol. 22, No. 4, pp. 450-454 (2014)
3. Emily C. Cormack The effect of sensitization in the stress corrosion cracking of aluminum alloys 5456. June 2012. Thesis to the US Naval Postgraduate School. Monterrey California.
4. Schwarting, R., Ebel, G., and Dorsch, T. J., "Manufacturing techniques and process challenges with CG47 class ship aluminum superstructures modernization and repairs," Fleet Maintenance and Modernization Symposium 2011, San Diego, CA (2011).
5. ONR BAA Announcement # ONRBAA14-003 Aluminum Alloy Corrosion Control and Prevention
   6 December 2013
6. Zhu, Y "Characterization of Beta Phase Growth and validation of long term thermal exposure sensitization of AA5XXX alloys". A dissertation submitted to the faculty of The University of Utah in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science May 2013.
7. ASTM G67, Standard Test Method for Determining the Susceptibility to Intergranular Corrosion of 5XXX Series Aluminum Alloys by Mass Loss After Exposure to Nitric Acid (NAMLT Test), ASTM International, West Conshohocken, PA (2004).
8. Fang Li Dan, Xiang Yexiang Qin, Robert B. Pond Jr, Kile Slusarski "Measurements of degree of sensitization (DoS) in aluminum alloys using EMAT ultrasound" Ultrasonics Vol. 51, Issue 5, pp 561–570 (2011)
9. E. H. Dix, Jr., W. A. Andersen, M. B. Schumaker, "Influence of Service Temperature on the Resistance of Wrought Aluminum-Magnesium Alloys to Corrosion" Corrosion, Vol. 15, No. 2, pp. 55t-62t (1959).
10. Kramer, L., Phillippi, M., Tack, W. T., and Wong, C., "Locally reversing sensitization in 5xxx aluminum plate," Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 21, No. 6, pp. 1025-1029 (2012).

Sesión II-D

Entorno, Sistemas y Modelado

Análisis del consumo energético en buques con estancias prolongadas en puerto

Arce Fariña, María Elena*; Cacabelos Reyes, Antón, Ulloa Sande, Carlos; González Gil, Arturo y Rodríguez Rodríguez, Javier

Centro Universitario de la Defensa (CUD), Escuela Naval Militar (ENM), Plaza de España 2, 36920, Marín. Emails: elena.arce@cud.uvigo.es (M.E.A.F.), acacabelos@cud.uvigo.es (A.C.R.), carlos.ulloa@cud.uvigo.es (C.U.S.), arturogg@cud.uvigo.es (A.G.G.), fjavierrodriguez@cud.uvigo.es (F.J.R.R.)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: elena.arce@cud.uvigo.es

---

Abstract: Se climatiza el ambiente interior de una construcción, como puede ser un buque, para que sus usuarios puedan habitarlo en condiciones de confort y porque los equipos o instalaciones necesitan de ciertos requerimientos térmicos. Las condiciones de confort se consiguen si determinados parámetros físicos y químicos de dicho ambiente interior se mantienen dentro de unos determinados rangos. Además, en la actualidad, a las instalaciones térmicas de los buques se les exige, entre otros, que sean eficientes energéticamente, integrables arquitectónicamente y fáciles de mantener y operar. En esta línea, la simulación térmica se presenta como una herramienta adecuada para el análisis de la demanda energética. Sin embargo, si se quiere garantizar la fiabilidad de este instrumento es necesario ajustar los parámetros de la simulación a la realidad de la construcción. En este contexto, este trabajo analiza el efecto de la temperatura de consigna en las demandas de calor y frío de un buque en puerto, más concretamente, el patrullero Tabarca con base en la Escuela Naval Militar. Este patrullero, al igual que otros buques de la Armada, se encuentra atracado en puerto una gran parte del año, generando consumos energéticos.

Keywords: demandas térmicas; buque; puerto; sensores; simulación

---

1. Introducción

En la actualidad, las simulaciones de edificios (SE) ya construidos están adquiriendo una creciente demanda y protagonismo. Esto se debe a que el comportamiento final de las edificaciones no se corresponde con lo que se había diseñado en el proyecto. Este interés en analizar rendimientos para reducir el consumo energético se debe a que en Europa el 42% del consumo de energía se produce en los edificios [1]. Un buque, entendido como una construcción flotante que da servicio al personal de dotación que trabaja en el mismo, debe ser lo más eficiente posible, y su simulación es comparable a la de una edificación. Que un buque sea más eficiente energéticamente inducirá, además de un ahorro económico, que disponga de una mayor autonomía.

Si se desea que SE sea una herramienta fiable, los parámetros que se utilizan en el modelo deben estar ajustados con la realidad del edificio. Esto es especialmente importante cuando se estudia un sistema en etapas de post-construcción [2,3]. Por ello, no siempre resulta recomendable emplear datos del marco normativo [4], tales como las temperaturas de consigna para realizar simulaciones de demanda energética fiables [5,6].

En base a lo anterior, se ha estudiado el efecto de la variable temperatura de consigna en la demanda térmica, comparando resultados con datos de diseño, datos del marco normativo de edificación y datos reales del buque. Las estadísticas de días de mar de los últimos 5 años (periodo 2010-2014) permitan afirmar que el patrullero permanece en puerto una media de 300 días al año. Es por esto que el análisis de demandas energéticas se ha efectuado con mediciones registradas en puerto.

2. Metodología

2.1. Descripción del buque objeto de análisis

El buque analizado posee base en la Escuela Naval Militar, en Marín, Pontevedra [7]. Se trata de un buque de construcción totalmente soldada, de acero de calidad A naval, de 44.5 metros de eslora y 6.6 metros de manga (Figura 1). La dotación del buque está formada por 27 personas. En puerto, el buque se encuentra aproado al sur. Tal y como se puede apreciar, en el costado de estribor existe un edificio, cuya sombra le afectará a últimas horas del día.



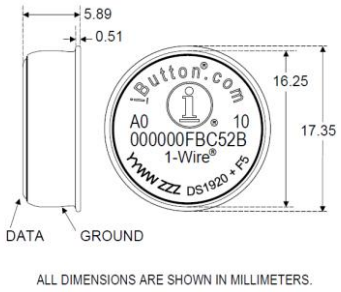
Figura 1. Imagen del Patrullero Tabarca

2.2. Sensores de temperatura

Para el estudio se utilizaron sensores iButton® (DS1920) de la casa Maxim (Figura 2), que permiten monitorizar temperaturas en espacios confinados con un tamaño de registro de 16 bits. La información se envía desde el sensor a través de una interfaz 1-Wire. La resolución máxima de estos sensores es de

0.5°C, con un rango de medición de temperaturas que va desde -55°C a +100°C. A máxima resolución, cada dispositivo es capaz de realizar 2048 mediciones. Las mediciones fueron desarrolladas en espacios temporales de 5 minutos.





a) b)

Figura 2. a) Sensor de temperatura ubicado en el puente del buque. b) Características geométricas del sensor iButton® (DS1920)

Se colocaron 7 sensores de temperatura a lo largo del buque: seis en la obra muerta (encima línea de flotación) y uno en la obra viva (debajo línea de flotación). Concretamente, tres sensores en el puente del buque (uno en zona proa, uno a estribor y uno a babor), 1 en la sala de suboficiales (primera cubierta debajo de la cubierta, estribor), un en el camarote de suboficiales (primera cubierta debajo de la cubierta, babor), 1 en sala de máquinas (popa) y un sensor en el sollado de marinería (debajo línea flotación, babor).

3. Resultados y Discusión

3.1. Condiciones térmicas en el interior del buque

Se monitorizaron datos de temperatura del buque durante un periodo de 7 días, concretamente, la semana del 22 al 27 de mayo de 2015. Se escogió una semana de temperaturas ambientales elevadas, para que la variación diaria de la temperatura fuese pronunciada. Además, las altas temperaturas exteriores, las cargas de refrigeración fluctuasen a lo largo del día.

En el puente del buque se colocaron tres sensores, lo que permitió observar el efecto de la ración solar en la temperatura del compartimento. Si se analiza un gráfico de temperatura de un día de verano (Figura 3), se observa, que en el intervalo de 8 a 9 horas, el sensor que está ubicado en la parte de proa del puente detecta un pico de temperatura que en media es de 2.5°C. Esto se debe a que este sensor se encuentra ubicado bajo un ventanal (Figura 4). La cantidad de calor por radiación solar suele llegar al 50 % de las ganancias totales de calor [8], lo cual refleja la importancia que posee en la evaluación de la carga las ganancias por radiación solar a través de elementos que componen el contorno (exterior) del local estudiado (i.e. ventanas, paredes, puertas, suelos y techos). A partir de las 21 horas se observa una subida brusca de las temperaturas (Figuras 3 y 4). Este cambio de temperaturas es debido a que al ocaso, aproximadamente a las 20 horas, al bajar las temperaturas, se apagan los equipos de aire acondicionado. La sombra del edificio, situado a un costado del buque (Figura 1), genera que el perfil de temperaturas varíe bruscamente a partir de las 19 horas para las zonas térmicas ubicadas a estribor. Además, al

terminar la guardia (21 horas), se suelen cerrar las puertas, con lo que se reducen las infiltraciones de aire exterior. El puente posee tres puertas por las que entra aire exterior, que aportan calor sensible a la zona. El marcado descenso de las temperaturas a partir de las 20 horas puede estar, asimismo, influenciado por la ausencia de personal, lo que reduce las disipaciones de calor de los elementos del interior de los locales.

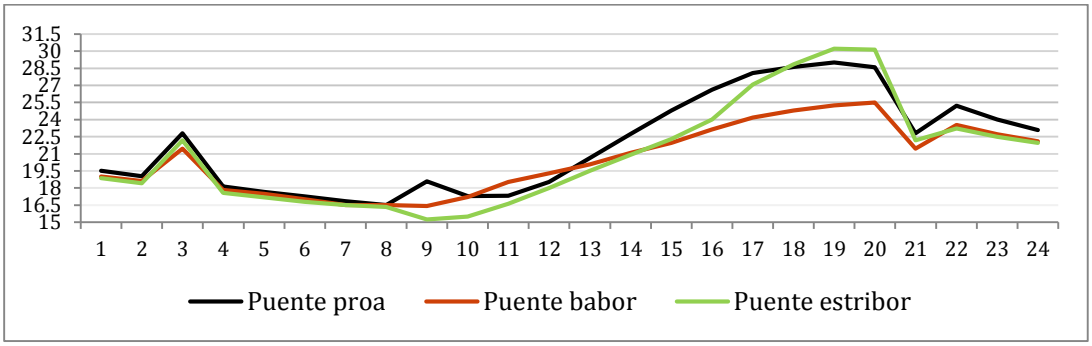


Figura 3. Temperaturas en tres zonas del puente buque durante 24 horas (23/05/2015)



Figura 4. Ubicación sensor temperatura en la proa del puente del buque

Para otras zonas del buque se obtuvieron perfiles de temperaturas similares (Figura 5). Así, el sensor ubicado en el sollado de marinería, por encontrarse en la obra viva del buque, registró siempre datos de temperaturas más bajos que el resto de sensores. Por la resistencia térmica de las paredes y techos a la conducción de calor hacia el interior del compartimento existe un retardo de 2 a 5 horas en notarse en el efecto de la radiación solar [1]. Por ello, en todas las curvas de temperaturas de los compartimentos situados a babor se observa una brusca subida a partir de las 13 horas (Figuras 4 y 5). Para los compartimentos a estribor esta subida de temperaturas se produce a partir de las 16 horas (Figura 5).

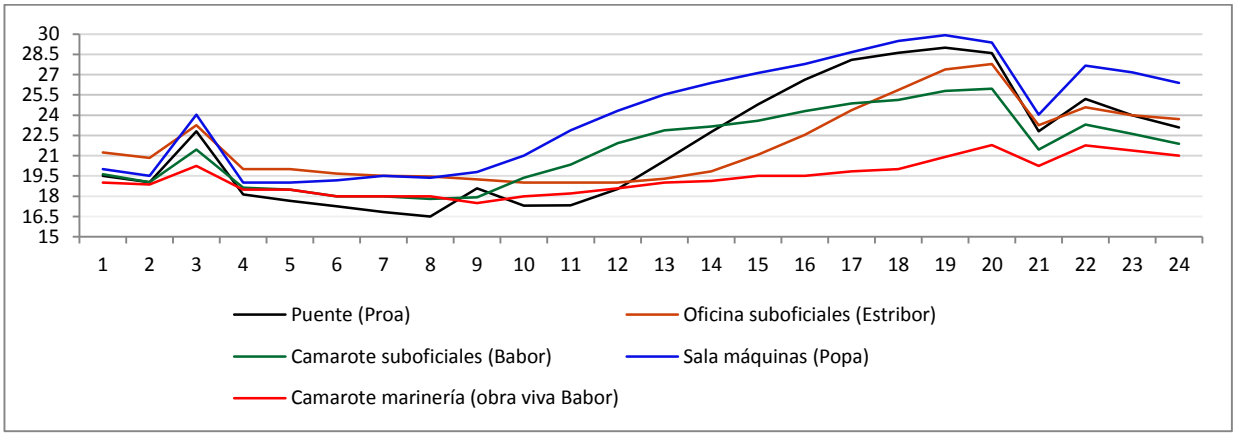


Figura 5. Temperaturas en cinco zonas del buque durante 24 horas (23/05/2015)

Para conocer cómo varía la temperatura en función de la ubicación, los datos registrados fueron analizados con el software SPSS (versión 22). Los resultados mostraron un efecto significativo de la zona térmica en la temperatura registrada, $F(6, 4543) = 187.42$, $p < .001$, $\eta^2 = .198$, explicando el 19.8% de la varianza. Las comparaciones a posteriori con el nivel de protección de Bonferroni (.05/21 = .0024) evidenciaron que los registros de temperatura del puente (proa bajo ventanal) mostraron diferencias significativas ($p < .001$) con los registros del puente en las zonas de estribor y babor, con un tamaño del efecto pequeño ($d = .39$ y $d = .28$, respectivamente). También se encontraron diferencias significativas ($p < .001$) al comparar los registros de temperaturas del sollado de marinería y sala de máquinas con el resto de compartimentos, con un tamaño del efecto grande (d de Cohen > 0.8). Cuando se compararon los datos registrados en las zonas del puente de estribor y babor con otras zonas por encima de la línea de flotación, no se obtuvieron diferencias significativas, lo que evidencia la importancia del efecto de la radiación solar y de las condiciones de contorno. La conductividad del agua de mar es 24.2 veces superior a la del aire, por lo que al comparar las temperaturas de espacios que poseen paredes en contacto con uno u otro fluido se aprecian diferencias. La sala de máquinas tiene condiciones diferentes al resto de zonas térmicas del buque, debido a las ganancias internas (e.g. generadores y motores).

Los datos de temperaturas interiores del buque se compararon con datos meteorológicos de una estación de la red de MeteoGalicia (Lourizán) ubicada en una zona próxima al emplazamiento del buque. Se observó que los picos de temperatura en el interior del buque, fruto del efecto de las cargas térmicas, superaron siempre las temperaturas ambiente exteriores. A modo de ejemplo, en la Tabla 1 se muestran los datos meteorológicos para el día 23/05/2015.

Parámetro	Valor
Temperatura media (^{0}C)	18.2
Temperatura máxima (^{0}C)	26.8
Temperatura mínima (^{0}C)	11
Horas de Frío (Base 7 ^{0}C) (h)	0
Horas de Sol (h)	12.2
Velocidad del Viento (km/h)	5.94

Tabla 1. Datos meteorológicos estación Lourizán (MeteoGalicia)

3.2. Efecto de la temperatura en la demanda térmica

Para el estudio de la temperatura en la demanda térmica se utilizó el software de simulación se sistemas transitorios TRNSYS.

3.2.1. Estudio de los cerramientos

Previamente a la construcción del modelo del buque para la simulación, se estudiaron detalladamente los materiales de los cerramientos del mismo. El casco del buque, de acero calidad A naval de 7 cm de espesor, está recubierto en su cara interna por una capa de 5 cm de un material aislante térmico (lana de roca) (Figura 6 a). La transmitancia térmica de las paredes externas se fijó en 0.496 W/m^2·K [9]. Los mamparos de los compartimentos están formados por un panel sándwich de 15 mm de espesor total (Figura 6 b). Dicho panel está formado por dos capas externas de aluminio de 1 mm de espesor y con una capa intermedia de lana de roca de 13 mm y su transmitancia térmica se fijó en 0.496 W/m^2·K [9]. El falso techo está constituido por un panel sándwich de 10 mm de espesor total (Figura 6 c). Este panel está formado por dos capas de aluminio de 1 mm y una capa intermedia de espuma de poliuretano y su transmitancia térmica empleada de 1.357 W/m^2·K [9]. El elemento de separación horizontal (ESH) está formado por una chapa de 7 mm de espesor cubierta con una moqueta de goma de 3 mm de grosor (Figura 6 d).

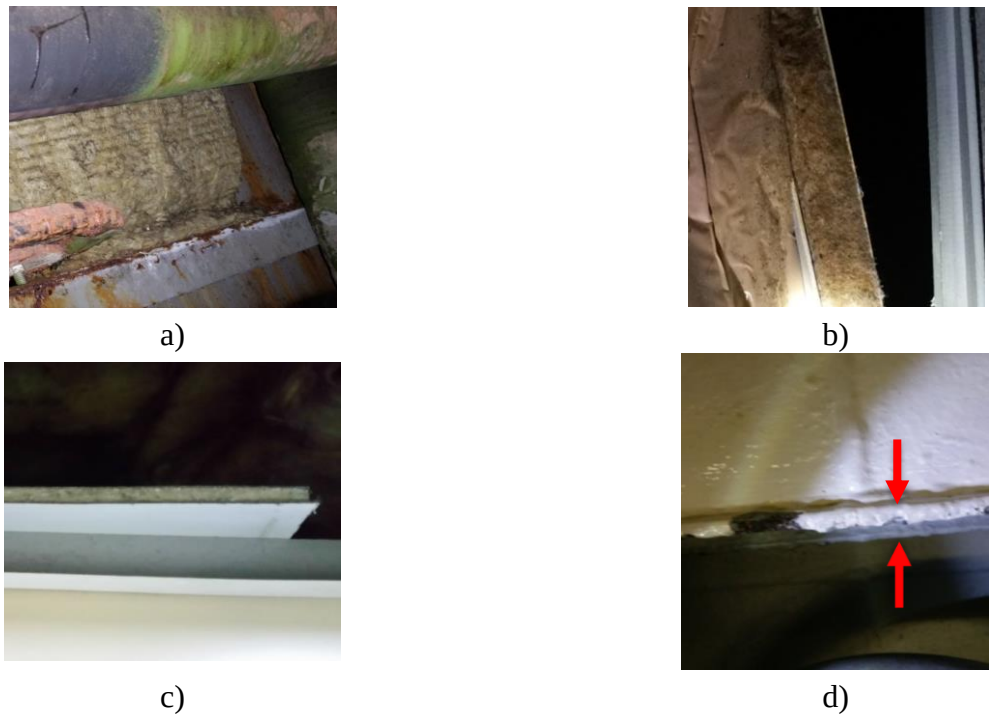


Figura 6. a) Capa de material aislante térmico en el casco. b) Mamparos de panel sándwich de los compartimentos, en base a lana mineral. c) Falso techo de panel sándwich con espuma de poliuretano en la cámara. d) Chapa metálica que compone el ESH de los compartimentos

3.2.2. Modelo en TRNSYS

Se construyó un modelo en SketchUp de una zona térmica basado en las características geométicas del sollado de marinería. Este modelo se importó en TRNSYS para su evaluación (Figura 7). Los datos meteorológicos y la temperatura del agua se obtuvieron de Meteonorm [10] y Panoply, respectivamente. Todas las simulaciones fueron realizadas para un mes de verano tipo en el puerto base.

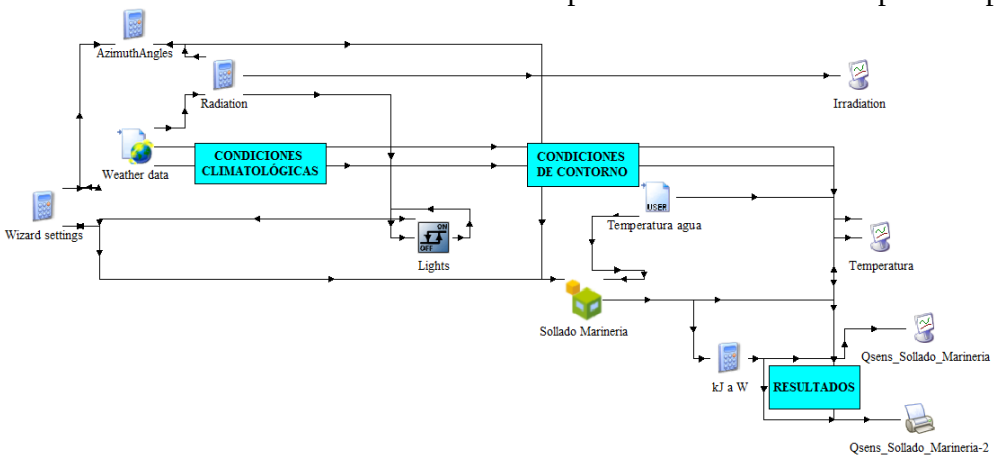


Figura 7. Modelo para la zona térmica del sollado de marinería en TRNSYS

Una vez definido el modelo, se analizó éste en tres escenarios: condiciones marcadas en el Código Técnico de Edificación (CTE) [11] y por el Instituto para la Diversificacion y Ahorro de la Energía (IDAE) [12], condiciones de diseño del equipo de aire acondicionado y condiciones reales de la instalación. Para periodos de verano el IDAE fija la temperatura de consigna en 26^{0}C. El equipo de aire acondicionado instalado en el buque y dimensionado para trabajar a una temperatura de consigna de 25^{0}C. De los registros de actividad del buque se fija la temperatura de consigna para verano en 27^{0}C. Se supuso una ocupación de 3 personas en horario de 21 a 8 horas, ya que el compartimento se utiliza principalmente para descanso. Los resultados de las simulaciones se muestran en la Tabla 2. Existe una variación superior a un 20% entre la demanda energética para condiciones reales y condiciones de diseño, y de más de un 10% entre la situación de mantener climatizada una zona térmica en base a lo que especifica el IDAE y las condiciones de funcionamiento reales del sistema.

	Condiciones diseño (AC)	**Especificaciones CTE e IDAE**	**Condiciones reales**
Promedio (W)	97.98	89.22	80.68
Demanda energética (Wh)	72894.71	66376.69	60025.63
Desviación típica (W)	70.44	69.90	68.90
Demanda pico (W)	223.25	214.37	205.50

Tabla 2. Resultados de demandas térmicas en los tres escenarios

4. Conclusiones

La monitorización de las temperaturas en distintos puntos del buque y las simulaciones realizadas para una zona térmica tipo permiten destacar la importancia de la evaluación de las ganancias por radiación solar a través de los elementos que componen la envolvente del sistema, las ganancias por transmisión de calor a través de mamparos, ESH, ventanas, puertas y techos, las ganancias por las cargas

internas (e.g. personas, máquinas, ordenadores, iluminación) y las ganancias por ventilación (incorporación de aire exterior).

En la etapa de diseño, el empleo de un modelo de simulación que no se ajuste a la realidad del sistema a analizar, supondrá que el equipo de climatización que se dimensione para dicho sistema no sea eficiente, bien porque no satisfaga las condiciones de confort proyectadas o porque esté sobredimensionado. En un estudio en fase de post-construcción, no ajustar la simulación a las condiciones reales puede inducir un incremento de más de un 20% en la estimación de la demanda energética del buque para un mes de verano tipo. Asimismo, cabe destacar que, a diferencia de una edificación al uso, en un buque no es adecuado considerar una única temperatura de consigna, pues los resultados mostraron que la ubicación de la zona térmica explica el 19.8% de la varianza de la temperatura.

Agradecimientos

Grupo de Tecnología Energética – GTE de la Universidad de Vigo.

Referencias

1. Agrupación de Fabricantes de Cemento de España. "*Construcción sostenible en hormigón. Ventajas"*. Recuperado de: https://www.oficemen.com/reportaje.asp?id_rep=1069 (**2015**).
2. Martínez, F.J.R., Gómez, E.V. *Eficiencia Energética En Edificios: Certificación Y Auditorías Energéticas*. Paraninfo: Madrid, **2006**.
3. Domínguez, M. Eficiencia energética en las instalaciones del frío y de climatización (I). *El Instalador*, **2005**, pp. 70-109.
4. España. Ministerio de Industria y Energía. *Reglamento De Instalaciones Térmicas En Los Edificios: RITE: Reales Decretos 1751/1998 y 1218/2002*. Thomson: Madrid, **2003**.
5. Fabrizio E.; Monetti, V. Methodologies and Advancements in the Calibration of Building Energy Models. *Energies*, **2015**, 8, pp. 2548-2574.
6. Ulloa, C.; Eguía, P.; Miguez, J. L.; Porteiro, J.; Pousada-Carballo J. M.; Cacabelos, A. Feasibility of using a Stirling engine-based micro-CHP to provide heat and electricity to a recreational sailing boat in different European ports. *Applied Thermal Engineering*, **2013**, 59, pp. 414-424.
7. (**2015**, Jul 27). Armada Española (Unidades). Recuperado de: http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/buques_superficie/prefLang_en/08_patrulleros--04_patrulleros-clase-anaga--04_patrullero-tabarca-p-28
8. Díaz, V.S.; Barreneche, R.O., *Acondicionamiento Térmico de Edificios*. Buenos Aires: Nobuko, **2005**.
9. (**2015**, Sept 16).Instituto Valenciano de la Edificación. *"Cuadernos de rehabilitación".* Recuperado de: http://www.five.es/descargas/archivos/P1_portada.pdf.
10. (**2015**) Meteonorm. Recuperado de: http://meteonorm.com/.
11. *Código Técnico de Edificación (CTE), Documento básico HS-3: Calidad de Aire Interior*. Ministerio de Fomento: Madrid, **2006**.
12. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). *Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020.* Ministerio de Industria, Turismo y Comercio: Madrid, **2011**.

La obra civil y la segregación, los retos de Navantia

Alonso González, Ángel[1,*]

[1] Departamento de Economia Aplicada.Universidad de Vigo; Email: angelalonsogo@yahoo.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo; Email: angelalonsogo@yahoo.es

---

Abstract: Las oficinas centrales de la sociedad Navantia están situadas en Madrid y los centros de producción se encuentran en: Ría de Ferrol (Ferrol y Fene), Bahía de Cádiz (Cádiz, Puerto Real y San Fernando Cartagena).

El parlamento gallego demanda que Navantia retome la construcción civil, por una iniciativa legislativa popular que dio lugar a la ley 4/2010 del sector naval; ello ampara el debate sobre soluciones civiles para los astilleros públicos.

Informe Dafo: debilidades, fortalezas, amenazas, oportunidades, diversificación, obra civil, flóteles, eólica marina, petroleros, etc.

Analizamos los contratos importantes civiles: flóteles Pemex, eólica marina, petroleros.

Realizamos una primera aproximación a un informe Dafo sobre el sector naval agradeciendo las colaboraciones prestadas: asociaciones – contratos con empresas pioneras: Pemex, Daewoo, Iberdrola, Windair renovables.

Vemos el personal directo de Navantia a través de sus memorias oficiales y, pese a ser un dato, contrastamos que es muy superior el empleo de todo un sector naval dependiente de esta empresa y revisamos su infraestructura en Ferrol (pertinencia de un nuevo dique).

Keywords: construcción civil naval, Dafo naval, energía eólica, diversificación.

---

1. Introducción

Navantia es una sociedad SAU que nace de los astilleros públicos de construcción de buques para la armada española y es uno de los pilares sobre los que se levanta gran parte de las industrias auxiliares de Ferrol, Fene, Bahía de Cádiz, Puerto Real y San Fernando Cartagena.

Posee una elevada fuerza de trabajo, tanto propia como adherida. Los contraltos (y la carga de trabajo a ellos unida) no afectan solo al personal de los astilleros sino a todo el de las tres zonas implicadas.

2. Aproximación a un Informe Dafo sobre el sector naval

Desde el propio sector se ve la necesidad de evaluar sus fortalezas, debilidades y oportunidades.

2.1. Debilidades

Excesivamente dependiente de factores exógenos de competitividad (incentivos fiscales, tipos de cambio, regulación, etc.).

- Debilidad financiera: El astillero es el único responsable financiero hasta la entrega del buque lo que le hace afrontar costes elevados.
- Escasez de créditos de prefinanciación y falta de financiación y conocimiento para armadores.
- Escasa oferta tecnológica propia, falta de capacidad de comercialización y diseño y desarrollo de proyectos (demasiados proyectos provienen del exterior, escasos proyectos de aplicación y validación de tecnología, para la implicación de los astilleros en I+D, escasa cultura de la gestión del I+D.
- Industria auxiliar y subcontratista atomizada y, de valor añadido básico, formación inadecuada, falta de formación intersectorial.
- Inestabilidad social.
- Inadecuada estructura laboral (pirámide de edad desajustada, con una media muy elevada, envejecida y muy orientada al proceso productivo y no al diseño o a las ventas), convenios laborales inadecuados, falta de mecanismos de apoyo a la incorporación de jóvenes trabajadores al sector (o inoperancia de los que se arbitran).
- Escasa formación para mandos intermedios y superiores, falta de reciclaje y gestión del conocimiento.
- Instalaciones en lugares problemáticos (sitios en el centro de la ciudad, falta de espacio y suelo industrial, etc.).
- Dispersión de organismos relacionados con el sector y solapamiento de actividades, falta de un organismo integrador.

2.2. Fortalezas

- Situación geográfica: así como es dificultad por su escasez, es Fortaleza su presencia en el

centro.

- Liderazgo internacional en construcción naval militar (a lo largo de muchos años).
- Especialización en sectores de Mercado con futuro (offshore, energía eólica, etc.; profundizaremos en el apartado siguiente).
- Clúster: alta concentración geográfica de actividades y arrastre de otras actividades; sería deseable mayor implicación en I+D.
- Industrias de alta capacidad exportadora.
- Industrias de alta capacitación profesional.
- Competitividad en precios.
- Alta flexibilidad y calidad productiva.
- Larga tradición y experiencia en la construcción naval. Gran experiencia en buques pesqueros, graneleros y militares.
- Plantilla adaptada a los ciclos bajos de producción.
- Existencia de amplias posibilidades de formación de los trabajadores.
- Industria de alta intensidad tecnológica.
- Excelentes profesionales. Alta cualificación técnica. Conocimientos comerciales y financieros aceptables.

2.3. Amenazas

- Mercado globalizado sin mayores barreras de entrada. Reiterada competencia desleal de parte de los países de extremo oriente en segmentos propiamente europeos (con dumping laboral y social).
- Industria tractor y de desarrollo industrial, altamente subvencionada y protegida fuera de la UE. Entrada de nuevos países en vías de desarrollo.
- Falta de voluntad política de lucha de medios proteccionistas de la UE frente al extremo oriente.
- Pérdida de Mercado y capacidad productiva por ausencia de financiación y de garantías.
- Pérdida definitiva de su tejido industrial por falta de contratos.
- Pérdida definitiva de conocimiento tecnológico y masa crítica que afectaría muy negativamente a la construcción militar y de defensa y, por ende, a las actividades conexas de seguridad y protección territorial.
- Graves efectos sobre el empleo de trabajadores altamente cualificados, especialmente en regiones severamente afectadas por la crisis.
- Pérdida de representación institucional y desaparición de los astilleros por dificultades técnicas y financieras. Retroceso en los avances conseguidos para la banca nacional en las nuevas construcciones (financiando y avalando astilleros solventes).
- Continuidad de la crisis en el sector pesquero por falta de renovación y modernización de la flota.

2.4. Oportunidades

Los mercados de nuestros astilleros están próximos a recuperarse (offshore, dragas, graneleros, ferris, etc.).

- Apoyo de la UE mediante numerosos programas (marco Polo II , TEN: T, etc.).
- Demanda de mayor protección medioambiental. Desarrollo de "cleanship". Posibilidad de explorar nuevos nichos de Mercado bajo una futura reducción de emisión de gases de efecto invernadero en el transporte marítimo, en una estrategia general de desarrollo de una economía española baja en carbón.
- Posibilidades de cooperación entre astilleros. Concentración y externalización de actividades.
- Reducción de costes por nuevas aplicaciones de gestión e ingenierías concurrentes en el sector naval (aplicación del plan Lean Manufacturing)
- Mejora de la calidad en las industrias auxiliares de subcontratistas e incremento de la cooperación entre astilleros e industria auxiliar.

3. Diversificación

3.1. Líneas de actividad

- Construcción Naval
- Sistemas
- Reparaciones
- Motores Diesel
- Turbinas
- Apoyo al Ciclo de Vida
- Eólica
- Transferencia de Tecnología y A.T.

Es de destacar la apertura a obra civil que va a permitir diversificar:

Obras para Pemex, fueron negociaciones difíciles pero al final Navantia Ferrol construye parte de un flotel para Pemex. Así Navantia Fene está fabricando módulos para el buque flotel de Pemex que está creciendo en la grada de Ferrol, tareas que están empleando a cerca de un centenar de trabajadores de compañías auxiliares. La ocupación comienza a recuperarse, aunque las factorías públicas aún no disponen de encargos que garanticen faena para su plantilla directa.

Navantia volverá a hacer petroleros al aliarse con Daewoo (3.2) y eólica marina con Winger e Iberdrola (3.3):

3.2. Daewoo

Proyecto de Ondimar para Navantia (solo parte en Ferrol). Característica Ondimar: subcontratistas de Daewoo. Barcos tipo Suezmax-diseñados para navegar por el canal de Suez-, tendrán una eslora (largo) de 276 metros y 48 de manga (ancho). Pesarán 156.000 toneladas, 20.144 de las cuales serán acero. Cada uno implicará 21 meses de proceso de fabricación y el primero de los navíos tendrá que estar entregado a finales del 2017.

Hay expectativas de lograr un pedido para fabricar dos buques logísticos para la Armada de Australia.

El consejo de administración de la Sociedad Estatal de Participaciones Industriales (SEPI), ha emitido este miércoles las autorizaciones pertinentes para que Navantia pueda suscribir el contrato de construcción de cuatro buques petroleros tipo Suezmax para Ondimar Transportes Marítimos, filial de la naviera Idiazábal.

De este modo, el consejo de SEPI ha trasladado a Navantia su autorización para hacer frente a los riesgos que se identifican en este proyecto, así como su aprobación a las cartas de conocimiento propias de estas operaciones. Se repartirán entre los astilleros de la bahía de Cádiz (Puerto Real y San Fernando) y Galicia (Ferrol y Fene).

El consejo de administración de la Sociedad Estatal de Participaciones Industriales (SEPI) ya ha emitido (29/07) las autorizaciones pertinentes y ha adoptado los acuerdos necesarios para el contrato de construcción, por parte de Navantia, de los petroleros del tipo Suezmax para hacer frente a los riesgos que se identifican en el proyecto, así como su aprobación a las cartas de conocimiento propias de estas operaciones.

3.3. Eólica marina

Navantia y la compañía asturiana Windar Renovables sellaron en Oslo su segundo contrato en el sector de la eólica marina en medio año. La empresa Hywind Scotland, filial de Statoil, acaba de adjudicar a esta alianza de empresas la construcción de cinco superestructuras flotantes que están diseñadas para sujetar aerogeneradores de seis megavatios de potencia en alta mar.

El encargo se ejecutará íntegramente en las instalaciones de Navantia Fene, que en estos momentos está a punto de iniciar la fabricación de su primer pedido en el mercado de la eólica marina, con la construcción, conjuntamente con Windar Renovables, de 29 estructuras tipo jacket para el parque Wikinger que promueve Iberdrola en Alemania.

Las plataformas para Statoil -gigante noruego del sector energético- estarán instaladas en el primer parque eólico marino flotante del mundo, en Hywind (Escocia) y sus dimensiones son superlativas. Así, tendrán un peso de 3.500 toneladas -siete veces más que cada uno de los jackets contratados para Iberdrola-, 90 metros de largo y un diámetro de 14,5 metros, apuesta en común de la empresa pública y Windar Renovables por el sector de la eólica marina, en donde compiten en otros concursos internacionales por los encargos.

Las capacidades de los astilleros públicos, por un lado, y la experiencia en la fabricación de componentes eólicos de Windar, por otro, han sido valoradas por los promotores del parque esco-

cés, que se enfrentan al reto tecnológico de poner en marcha un recinto con sujeciones para los molinillos flotantes.

Navantia y Windar Renovables parten con una importante ventaja, experiencia en un sector nuevo.

Las estructuras flotantes pueden resolver el problema con el que se encuentra el sector de la eólica marina para asentar los aerogeneradores en aguas con más de 60 metros de profundidad. Hasta el momento, los estudios no habían pasado la barrera de las investigaciones y de los prototipos, mientras que ahora tendrán una plasmación real.

La ejecución de las estructuras copará el astillero de Fene, que ya ha llevado a cabo tareas de adecuación al negocio de la eólica marina, como la construcción de las cimentaciones sobre las que se colocarán los jackets para Iberdrola, una vez terminados; y también de modificación de la grúa pórtico para poder mover las gigantescas piezas.

La disponibilidad de grandes instalaciones tanto para fabricar como para manipular los componentes, el acceso directo al mar para desestibar las piezas y la capacidad tecnológica para adentrarse en nuevos mercados son las fortalezas que han permitido que Windar y Navantia hayan obtenido contratos en el sector en poco tiempo.

Primeros encargos: surgen a través de las dificultades: la adjudicación de los 29 jackets para Iberdrola y el Buque de Acción Marítima (BAM) para la Armada española. Las tareas del barco militar están paralizadas, la obra de la eléctrica vasca tampoco ha arrancado, los floteles se va reduciendo.

Los jackets del parque Wikinger de Iberdrola tendrán cuatro patas

Medio año después de firmado el contrato con la eléctrica Iberdrola para la fabricación de 29 jackets -estructuras sobre las que van anclados los aerogeneradores en el mar-, Navantia pondrá mañana en marcha en sus instalaciones de Fene los trabajos de este encargo, destinados al parque Wikinger, en Alemania. Es un pedido que lo ha situado como suministrador de referencia para la eléctrica de origen vasco y le abre la puerta a otros posibles contratos. De hecho, Navantia ya se encuentra precalificada para participar en el concurso que abrirá en breve la empresa en el marco del proyecto de materialización del que será su segundo parque eólico en el Reino Unido, el East Anglia One, de 714 megavatios de potencia.

El futuro recinto contará con unos 100 aerogeneradores. Las máquinas, de 7 megavatios, ya han sido contratadas a Siemens, y la empresa baraja actualmente cómo repartir los concursos de los jackets que sustentarán estos molinos. Así, podría abrir tres licitaciones de más de una treintena de este tipo de sujeciones, o únicamente dos, ofertando cincuenta en cada una. Y ese es el negocio al que optará Navantia a corto plazo. Aunque parte con el aval de haber resultado elegida -en alianza con la empresa Windar Renovables-, tendrá que medirse con el resto de astilleros y empresas que a nivel internacional están pujando por hacerse un hueco en este sector. De hecho, si bien Navantia fabricará los 29 jackets para el parque Wikinger, la danesa Bladt también participa en la obra, con un número significativamente mayor de componentes, en concreto 41, por lo que se prevé que esta compañía también concurra en las próximas licitaciones.

El East Anglia One -si el Reno Unido llega a desarrollar todas las rondas que tiene previsto del parque será el más grande del mundo, con 7.200 MW- comenzará a construirse en el 2018 y estará listo para operar dos años después.

Los jackets para este recinto incluirán algunas modificaciones con respecto a los que fabricarán Navantia y Windar para Wikinger, aunque por el momento el diseño no está cerrado al cien por cien. Podrían asentarse sobre tres patas en vez de las cuatro del proyecto alemán y también variará la estructura de la pieza de transición, puente entre la cimentación y los molinos, y que permite corregir posibles inclinaciones.

A las puertas de preparar su participación en la licitación del East Anglia One, Navantia se pone manos a la obra con los componentes para el Wikinger. El pedido reporta 641.000 horas de trabajo para la ría ferrolana, lo que se traduce en ocupación para medio millar de trabajadores.

4. Personal

Personal directo en Navantia en sus tres sedes:

Plantilla Media	**2011**	**2012**	**2013**
Técnicos superiores	1.047	1.064	1.051
Empleados	1.602	1.629	1.632
Operarios	2.883	2.854	2.817
Total	5.532	5.537	5.500

Tabla 1. Personal según memoria de Navantia S.A.U.

A ello hay que sumar el fuerte empleo inducido que hace de las tres zonas muy dependientes de los subcontratos.

5. Inversión en Capital

Navantia duda del dique de Ferrol, mientras apuesta por las reparaciones, se apuestas por la continuidad puesto que parece innegable que esa (alta) inversión en capital fijo posibilitaría mayores obras. En la actualidad el 68% de los 301 millones de euros que el grupo naval contrató en 2013 correspondían al área de Reparaciones (204,4), la mayor parte en buques civiles (70%). Esta división volvió a ser la única que generó beneficios: casi cinco millones en positivo (4,85) que son el contrapunto a los 59,7 en pérdidas netas que acumuló el pasado ejercicio, la una compañía se mueve en los números rojos.

Aunque el documento no desglosa los datos por centros, los diques de Ferrol y Fene aportan buena parte de esos réditos en carenas. Por la ría pasaron 45 buques para reparar en 2013 y 20 de ellos eran gaseros (LNG), con un mantenimiento muy exigente en el que se han especializado las factorías gallegas. Fueron menos barcos que en 2012 pero con facturas más abultadas. “Reparaciones Ría de Ferrol tuvo el mejor año de su historia”, refleja el Informe anual de actividades de Na-

vantia. El dique flotante pretende aumentar la capacidad de la factoría ferrolana para reparar grandes buques no obstante se duda de la viabilidad de "acometer inversiones significativas" en mercados que considera que no son los "naturales" para un grupo enfocado al segmento militar, en caída libre de pedidos desde el inicio de la crisis. Apunta, además, que las rutas de mayor tonelaje se localizarán en el sudeste asiático y Oriente Medio.

Se trata de una plataforma marina que permitiría a los astilleros gallegos de Navantia reparar grandes buques portacontenedores, un nicho de negocio para el que no disponen de espacio físico. El dique, con una inversión estimada de 140 millones de euros, lleva tres años en la lista de exigencias de la plantilla y ha recabado el apoyo de todas las formaciones políticas, especialmente en época electoral, pero no termina de concretarse. El último tropiezo ha sido con la Comisión Europea. La Xunta, que reservó cinco millones de los presupuestos de 2013 para esta infraestructura, se escuda ahora en que Bruselas se opone a financiarlo con dinero público porque sería una ayuda de Estado irregular. Los socialistas lo desmienten y airean una carta del comisario de la Competencia, Joaquín Almunia, donde expone que la consulta del Gobierno central sobre el dique fue "informal" y que la UE no está en condiciones de pronunciarse aún.

Referencias

Anexo legislativo: Ley 4/2010, 23 junio rectificada por Corrección de errores («D.O.G.» 6 julio), por la que se procede a subsanar el error en su numeración.

Reducción del Ruido de Origen Estructural en las Cabinas de las Aeronaves: Diseño de Espumas Metálicas para Depósitos de Queroseno.

L. Sanchez-Ricart[1,*] and J. García-Peláez[2]

[1] Departamento de Estructuras y Construcción, Universidad Politécnica de Cartagena, Campus Alfonso XIII, 30203 Cartagena (Murcia), España

[2] Dirección de Ingeniería, DICA, Astillero de Cartagena, Navantia S. A., Murcia, 30205, España

* E-Mail: luis.sricart@upct.es

Resumen: Los materiales porosos se usan con frecuencia para la reducción de ruido en aplicaciones en el aire. Sin embargo, estos materiales pierden sus propiedades acústicas como absorbentes cuando son saturados de un medio líquido. Con el objetivo de reducir el ruido de origen estructural en las cabinas de las aeronaves, se diseñan espumas metálicas con buenas propiedades de absorción cuando se saturan de queroseno, pudiendo ser utilizadas como recubrimiento interior o de completo relleno de los depósitos de combustible. El objetivo es atraer y disipar en los depósitos el ruido de origen estructural mediante el acoplamiento viscoso entre las espumas metálicas y el queroseno. Con este objetivo, se han desarrollado soluciones analíticas para los coeficientes de reflexión, absorción y transmisión acústica. El recubrimiento interior de los depósitos de queroseno puede producir unas reducciones de las reflexiones en torno a 8 dB si la espuma se diseña de forma apropiada. Además, al tener porosidades de hasta el 98 % del volumen, incluso con el relleno completo del depósito con la espuma metálica, el depósito sólo perdería una capacidad de almacenaje del 2 %. Es previsible que la interacción entre el queroseno y la espuma, reduzca no sólo el ruido, sino también las vibraciones durante las maniobras.

keywords: poroelasticidad, espumas metálicas, ruido interior en aeronaves, absorción de ruido, reducción de vibraciones, depósitos de combustible, queroseno

---

1. Introducción.

En este artículo, se diseña un material poroso para su utilización en los depósitos de queroseno, con el objetivo de atenuar el ruido interior de origen estructural en las cabinas. Algunos ensayos [1,2] muestran que el fuel en los depósitos de las alas de las aeronaves puede producir una reducción sustancial, en torno a 15 dB, del ruido en el interior de la cabina de origen estructural. La idea esencial de este artículo es la utilización de un recubrimiento interior o el relleno completo del depósito con espumas metálicas para aumentar drásticamente la absorción y disipación del ruido en el interior de la cabina de origen estructural. El objetivo es capturar y disipar el ruido de origen estructural en los depósitos de queroseno [3,4].

Las principales fuentes de sonido en una aeronave están relacionados con el ruido producido por el sistema de propulsión y el ruido producido por las capas límite turbulentas o ruido aerodinámico. Estas fuentes podrían interactuar con las vibraciones de la estructura de la aeronave y el equipo, generando fuentes secundarias de ruido. El ruido se propagaría a la cabina de la aeronave, y la frecuencia de las amplificaciones o reducciones selectivas de ruido se producirían durante su propagación. Con el fin de tener un orden de magnitud, puede ser mencionado que los paneles de un fuselaje de avión tienen frecuencias críticas en el intervalo de 6000 a 12.000 Hz. Las frecuencias naturales del fuselaje anillo están en el rango de 400-900 Hz [5].

La respuesta de la estructura del fuselaje y los niveles de presión de sonido interiores en aviones propulsados por hélice se concentran en las frecuencias discretas relacionadas con frecuencias angulares de la hoja, sus armónicos y la de los ángulos de fase de las hélices [6]. El ruido de los aviones a reacción es más importante en las condiciones de ascenso, pero el ruido aerodinámico domina en condiciones de crucero [7-9]. Tanto el ruido de los reactores como el ruido aerodinámico son de frecuencia de banda ancha. El ruido de los reactores no estimulará las resonancias de los paneles del revestimiento del fuselaje ni las resonancias del anillo del fuselaje, ya que la fuente de ruido típica de chorro oscila entre 200 y 400 Hz [10].

El ruido en el interior de aeronaves se puede dividir en dos vías de transmisión, ruido aéreo y ruido estructural. La respuesta de la estructura de la aeronave, en su interacción con el sistema de propulsión y con el ruido aerodinámico, son las principales fuentes de ruido propagado por la estructura.

El artículo se concentra en el diseño de un metal poroso saturado por queroseno con el fin de trabajar como amortiguador de sonido en los depósitos de combustible de las aeronaves. El objetivo es sacar provecho de la interacción del metal poroso con el queroseno que lo satura para disipar el ruido estructural. Dado que este material podría ser muy ligero, con porosidades de hasta el 98 % en volumen, cabe incluso la posibilidad de rellenar por completo los depósitos de espumas metálicas, perdiendo sólo una capacidad de almacenaje del 2 %. El objeto es reducir el ruido transmitido por la estructura absorbiéndolo en los depósitos de combustible, y por lo tanto, reducir el ruido transmitido a la cabina.

2. Materiales Porosos Saturados de líquidos.

La experiencia ha demostrado que las propiedades acústicas de los materiales porosos para la reducción de ruido en el aire se pierden por completo cuando el material poroso está saturado por un líquido, como lo es en el caso de queroseno en los depósitos de un avión. Cuando se sumerge el medio poroso en un

líquido, las burbujas de aire están inicialmente atrapadas en el esqueleto poroso y el material presenta buenas propiedades de absorción. Conforme avanza el sonido incidente y la vibración, el material comienza a liberar las burbujas de aire y el líquido satura por completo el medio poroso. En esta situación, el material poroso pierde por completo su capacidad de absorción de sonido, como veremos en la sección 5.

Con el fin de reducir el ruido, se utilizan otros tipos de materiales en ambientes con líquidos, como materiales elastómeros en la que el aire está confinado en poros cerrados. La presencia de burbujas de aire en el interior de matrices de elastómeros garantiza una buena capacidad de absorción en un medio líquido. Sin embargo, este tipo de material tiene algunas desventajas, ya que debido a las condiciones de trabajo (alta presión, vibración, efectos de la temperatura o la fatiga), la porosidad cerrada se va parcialmente transformado en porosidad abierta, perdiendo el material elastómero su capacidad de absorción.

Por el contrario, los metales porosos tienen propiedades que podrían ser útiles en diferentes aplicaciones de ingeniería. La ductilidad, la resistencia al calor o la conductividad eléctrica, la alta rigidez, o la estabilidad a alta temperatura o alta presión hacen que el uso de metales porosos pueda ser ventajoso en comparación con los medios porosos formados por materiales no metálicos o elastómeros. En el presente artículo, vamos a diseñar metales porosos con el fin de garantizar una buena capacidad de absorción cuando se satura con queroseno, con el fin de utilizar este tipo de material en el interior de los depósitos de combustible de la aeronave.

La primera teoría sobre la acústica en medios porosos fue propuesta por el físico británico Lord Rayleigh, quien desarrolló *The Theory of Sound* en 1877 [11] y que publicó en 1883 *On porous bodies in relation to sound* [12]. Un enfoque de mecánica racional para el comportamiento mecánico y acústico de los medios porosos saturados fue desarrollada por Biot [15-21], que publicó durante un período de 20 años, desde la *General Theory of Three-Dimensional Consolidation* hasta la *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid,* con extensiones a bajas y altas frecuencias. La Teoría de Medios Porosos de Biot se puede observar como un caso lineal particular de la más general *Theory of Mixtures*. Para el tratamiento de los problemas acústicos en medios poroelásticos saturadas de aire, las dos ondas que se propagan principalmente por el esqueleto sólido se pueden despreciar. Por lo tanto, los modelos equivalentes que sólo reproducen la onda que se propaga principalmente por el fluido en su interacción con el esqueleto sólido se pueden emplear en general [22-38]. El modelo más utilizado puede ser el modelo Allard-Johnson-Biot, que representa la compresibilidad del aire y los efectos de la temperatura. En el artículo nos remontamos a la teoría más general de Biot, *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid*, ya que las ondas que se propagan a través del esqueleto sólido no son despreciables cuando el fluido que satura el esqueleto sólido es un líquido. En dos publicaciones anteriores de los autores, el modelo de Biot se ha extendido a bajas frecuencias para metales porosos [39] con el desarrollo de un modelo para el acoplamiento estático, y se ha extendido a altas frecuencias con el desarrollo de un modelo viscoso macroscópico para materiales porosos saturados basado en conceptos de energía [40], extendiendo el límite de validez del modelo de Biot a frecuencias ultrasónicas. Una configuración útil para probar la capacidad de absorción de un medio poroelástico saturado por queroseno se define en la sección 3. La configuración está formada por queroseno, una capa porosa de aluminio, aluminio y aire.

En la sección 4 se han desarrollado soluciones analíticas, con o sin el medio poroelástico, con el fin de calcular las reducciones de energía en dB producidos por la presencia del medio de poroelástico. Por último en la sección 5, se diseña el esqueleto sólido de forma que saturado por queroseno proporcione buenas propiedades disipativas para absorber las ondas acústicas.

3. Teoría General sobre Propagación Acústica en Medios Porosos de Biot.

Vamos a utilizar notación indicial. Las ecuaciones cinemáticas en la teoría de Biot relacionan los desplazamientos macroscópicos del esqueleto sólido, u_i, con los desplazamientos macroscópicos del fluido que lo satura, υ_i, con las deformaciones macroscópicas del esqueleto sólido, ε_{ij}, y las deformaciones macroscópicas del fluido, e_{ij}.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(u_{i,j} + u_{j,i}\right) \qquad (1)$$
$$e_{ij} = \frac{1}{2}\left(\upsilon_{i,j} + \upsilon_{j,i}\right)$$

Las ecuaciones constitutivas del modelo de Biot establecen el comportamiento de un esqueleto sólido poroso saturado de un fluido. El modelo se reduce a 4 constantes en el caso de comportamiento isótropo:

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij}\left(\lambda' \varepsilon_{kk} + B e\right) + 2\mu \varepsilon_{ij} \qquad (2)$$
$$s = B \varepsilon_{kk} + A e$$

En las ecuaciones anteriores, σ_{ij} son las tensiones macroscópicas del esqueleto sólido, s es la presión hidrostática del fluido a nivel macroscópico cambiada de signo y e es la dilatación cúbica del fluido a nivel macroscópico. λ' y μ son las dos constantes que relacionan la tensión y la deformación del esqueleto sólido. Anotamos λ' porque no es exactamente la constante de Lame del esqueleto sólido; ni en condiciones de saturación drenada, ni en condiciones de vacío. λ' es la constante de Lame para una trasformación isócora del fluido a nivel macroscópico. La constante elástica, A, es el módulo elástico que relaciona las componentes esféricas de las deformaciones y de las tensiones de fluido. Por último, B, es el acoplamiento estático a nivel macroscópico. B relaciona la dilatación cúbica del fluido con la tensión esférica del esqueleto sólido, y de forma recíproca, la dilatación cúbica del esqueleto sólido y la tensión esférica del fluido.

La ecuación (3) representa el equilibrio dinámico del esqueleto sólido y el fluido, donde f_i y ϕ_i son las fuerzas externas por unidad de volumen sobre el esqueleto sólido y el fluido, ρ_{11} es la densidad aparente asociada con la aceleración del esqueleto, ρ_{22} es la densidad aparente asociado con la aceleración del fluido y ρ_{12} es la densidad aparente asociada con el acoplamiento dinámico del esqueleto sólido y el fluido, cambiada de signo. b_{ij} es la resistencia al flujo de fluido, donde las fuerzas viscosas por unidad de volumen representan la ley de Darcy generalizada.

$$\sigma_{ij,j} + f_i = b_{ij}\left(\dot{u}_j - \dot{\upsilon}_j\right) + \rho_{11}\ddot{u}_i + \rho_{12}\ddot{\upsilon}_i \qquad (3)$$
$$s_{,i} + \phi_i = b_{ij}\left(\dot{\upsilon}_j - \dot{u}_j\right) + \rho_{12}\ddot{u}_i + \rho_{22}\ddot{\upsilon}_i$$

ρ_{11}, ρ_{12} y ρ_{22} están directamente relacionados con la porosidad abierta, β, la densidad del material de base del esqueleto sólido, ρ_s, la densidad del fluido, ρ_f, y densidad aparente de la dinámica de acoplamiento, ρ_a:

$$\begin{aligned}\rho_{11} &= (1-\beta)\rho_s + \rho_a \\ \rho_{22} &= \beta\rho_s + \rho_a \\ \rho_{12} &= -\rho_a\end{aligned} \tag{4}$$

ρ_a es la densidad aparente de fluido movilizado por la aceleración del esqueleto sólido, o recíprocamente, la densidad aparente esqueleto sólido movilizado por la aceleración del fluido. Si la permeabilidad del esqueleto sólido es isótropa, la resistividad de flujo se reduce a una sola constante:

$$b_{ij} = \delta_{ij} b \tag{5}$$

Las tensiones se sustituyen por las deformaciones en la ecuación de equilibrio utilizando las ecuaciones constitutivas, y las deformaciones se sustituyen por los desplazamientos utilizando las ecuaciones cinemáticas. Además, se incluye la ecuación (5) en el equilibrio dinámico:

$$\begin{aligned}&\left(\lambda' + \mu\right) u_{j,ji} + B\upsilon_{j,ji} + \mu u_{i,jj} + f_i = b\left(\dot{u}_i - \dot{\upsilon}_i\right) + \rho_{11}\ddot{u}_i + \rho_{12}\ddot{\upsilon}_i \\ &B u_{j,ji} + A\upsilon_{j,ji} + \phi_i = b\left(\dot{\upsilon}_i - \dot{u}_i\right) + \rho_{12}\ddot{u}_i + \rho_{22}\ddot{\upsilon}_i\end{aligned} \tag{6}$$

s se puede expresar en función de la presión intersticial del fluido, p, que es la única variable de interés en el fluido del estado tensional, y la porosidad:

$$\begin{aligned}s &= \frac{s_{kk}}{3} = -\beta p \\ s_{ij} &= \delta_{ij} s\end{aligned} \tag{7}$$

4. Configuración para probar la capacidad de absorción de una espuma metálica en los depósitos de queroseno de las aeronaves.

Vamos a concentrarnos en una configuración en la que la disipación es insignificante, ver Figura 1. Este tipo de configuración será útil para poner a prueba la capacidad de disipación del medio poroelástico saturada por queroseno. La configuración está formado por queroseno, una capa de 5 mm de aluminio que representa la pared del depósito y un medio infinito de aire.

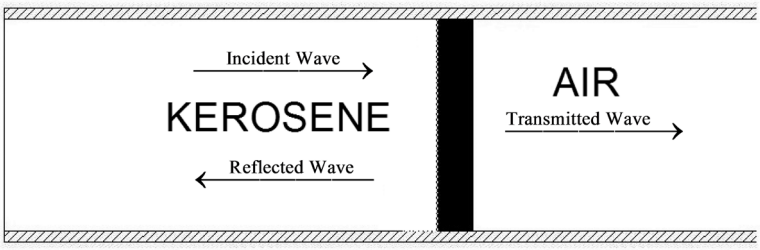


Figura 1. Configuración I para probar la capacidad de absorción de una espuma metálica saturada de queroseno.

Ahora, añadimos un metal poroso saturado por el queroseno sobre la capa de aluminio, véase la Figura 2. La configuración estará formada por queroseno, una capa de metal poroso de espesor l_p, una capa de 5 mm de aluminio y, finalmente, un medio infinito de aire. Los espesores del medio poroelástico en estudio se presentan en la Tabla 1.

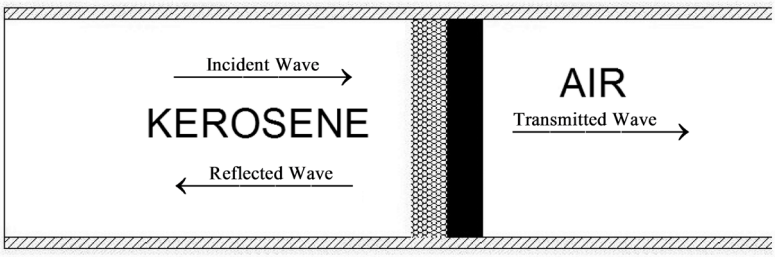


Figura 2. Configuración II para ensayar la capacidad de absorción de una espuma metálica saturada en queroseno.

Tabla 1. Espesor l_p de la espuma metálica.

$l_p\,[mm]$	50, 75, 100, 120, 140, 160

La reducción de energía en dB del medio poroelástico se mide como la relación del coeficiente de reflexión en ausencia del medio poroso, $r_{s\infty}$ en la configuración I, y el coeficiente de reflexión en la presencia del medio poroso, $r_{ps\infty}$ en la configuración II:

$$10\log_{10}\frac{r_{s\infty}}{r_{ps\infty}} \tag{8}$$

Dado que las frecuencias forzadas por las fuentes de la aeronave, las frecuencias naturales de la estructura de la aeronave y de sus componentes, y las frecuencias naturales de los depósitos de combustible podría variar en función del diseño de la aeronave, se prefiere concentrarse en la configuración definida en la figura 2, con el fin de caracterizar la capacidad de absorción de la capa porosa, evitando configuraciones que no caracterizan el material absorbente en sí, sino más bien las frecuencias de resonancia de una configuración particular.

Cualquier configuración con las frecuencias naturales en la gama de frecuencias en estudio (0-10kHz), proporcionaría coeficientes de absorción elevados no relacionadas con la capacidad de absorción material, sino a la presencia una resonancia asociada a la configuración. Por lo tanto, un análisis de una placa bajo flexión o el análisis de una geometría de depósito en particular se han evitado, ya que este tipo de configuraciones proporcionarían resultados no representativos de la absorción del material, sino característicos de las resonancias de la configuración particular.

De hecho, la configuración de la figura 2 es habitual en la caracterización de revestimientos de absorción en catálogos industriales. Una vez que el material absorbente se caracteriza, el espesor del recbrimiento puede ser elegido con el fin de obtener la disipación para una gama de frecuencia particular o un conjunto particular de frecuencias discretas relacionadas con las fuentes de sonido o relacionados con las resonancias de la estructura del avión.

5. Soluciones Analíticas.

En esta sección vamos a obtener las soluciones analíticas de las configuraciones I y II. Vamos a concentrarnos en las soluciones analíticas de la propagación del sonido sobre una capa de metal poroso de espesor l_p, ver Figura 3.

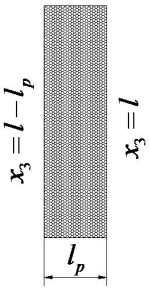


Figura 3. Muestra de material poroso.

Vamos a suponer un problema armónico unidimensional en la dirección longitudinal, libre de fuerzas externas por unidad de volumen y estacionaria, que representa las condiciones ideales del ensayo en tubo de impedancia. Las soluciones de los desplazamientos del fluido y del esqueleto sólido tienen la siguiente forma:

$$\begin{aligned} u_3(x_3,t,\omega) &= \tilde{u}_3\, e^{i\lambda x_3} e^{i\omega t} \\ \upsilon_3(x_3,t,\omega) &= \tilde{\upsilon}_3\, e^{i\lambda x_3} e^{i\omega t} \end{aligned} \tag{9}$$

En las ecuaciones anteriores $\tilde{u}_3$ y $\tilde{\upsilon}_3$ son números complejos constantes, x_3 es la variable espacial en la dirección longitudinal $\vec{e}_3$, ω es la frecuencia, t es el tiempo y λ es el número de onda complejo. Los desplazamientos deben cumplir con el equilibrio dinámico, la ecuación (6), que tiene la siguiente forma para este caso en particular:

$$\begin{aligned} &\left(\lambda^{'} + 2\mu\right) u_{3,33} + B\,\upsilon_{3,33} = b\left(\dot{u}_3 - \dot{\upsilon}_3\right) + \rho_{11}\,\ddot{u}_3 + \rho_{12}\,\ddot{\upsilon}_3 \\ &B\,u_{3,33} + A\,\upsilon_{3,33} = b\left(\dot{\upsilon}_3 - \dot{u}_3\right) + \rho_{12}\,\ddot{u}_3 + \rho_{22}\,\ddot{\upsilon}_3 \end{aligned} \tag{10}$$

Sustituyendo (9) en (10), y reordenando las ecuaciones, estas toman la siguiente forma:

$$\begin{aligned} &D\,\tilde{v} = \lambda^2 C\,\tilde{v} \\ &\tilde{v} = \begin{pmatrix} \tilde{v}_1 \\ \tilde{v}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{u}_3 \\ \tilde{\upsilon}_3 \end{pmatrix} \\ &C = \begin{pmatrix} \lambda^{'} + 2\mu & B \\ B & A \end{pmatrix} \\ &D = \begin{pmatrix} \omega^2\rho_{11} - i\omega b & \omega^2\rho_{12} + i\omega b \\ \omega^2\rho_{12} + i\omega b & \omega^2\rho_{22} - i\omega b \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{11}$$

La solución general de la ecuación (10) es la solución para el siguiente problema de valores propios λ^2 y los vectores propios $\tilde{v}$ de la matriz $C^{-1}D$:

$$\begin{aligned} &\left(C^{-1}D - \lambda^2 I\right)\tilde{v} = \vec{0} \\ &C^{-1}D = \begin{pmatrix} \dfrac{\omega^2\left(\mathrm{A}\rho_{11} - \mathrm{B}\rho_{12}\right) - i\omega b\left(\mathrm{A}+\mathrm{B}\right)}{A\left(\lambda^{'} + 2\mu\right) - B^2} & \dfrac{\omega^2\left(\mathrm{A}\rho_{12} - \mathrm{B}\rho_{22}\right) + \mathrm{i}\omega b\left(\mathrm{A}+\mathrm{B}\right)}{A\left(\lambda^{'} + 2\mu\right) - B^2} \\ \dfrac{\omega^2\left(\left(\lambda^{'}+2\mu\right)\rho_{12} - \mathrm{B}\rho_{11}\right) + \mathrm{i}\omega\mathrm{b}\left(\lambda^{'}+2\mu+\mathrm{B}\right)}{A\left(\lambda^{'} + 2\mu\right) - B^2} & \dfrac{\omega^2\left(\left(\lambda^{'}+2\mu\right)\rho_{22} - \mathrm{B}\rho_{12}\right) - \mathrm{i}\omega\mathrm{b}\left(\lambda^{'}+2\mu+\mathrm{B}\right)}{A\left(\lambda^{'} + 2\mu\right) - B^2} \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{12}$$

Las soluciones de los valores propios son:

$$\lambda_1 = -\lambda_2 = \left(\frac{a_{11} + ib_{11} + a_{22} + ib_{22} - \sqrt{(a_{11} + ib_{11} + a_{22} + ib_{22})^2 + 4\left((a_{12} + ib_{12})(a_{21} + ib_{21}) - (a_{11} + ib_{11})(a_{22} + ib_{22})\right)}}{2a_0} \right)^{0.5}$$

$$\lambda_3 = -\lambda_4 = \left(\frac{a_{11} + ib_{11} + a_{22} + ib_{22} + \sqrt{(a_{11} + ib_{11} + a_{22} + ib_{22})^2 + 4\left((a_{12} + ib_{12})(a_{21} + ib_{21}) - (a_{11} + ib_{11})(a_{22} + ib_{22})\right)}}{2a_0} \right)^{0.5} \quad (13)$$

$$a_{11} = \omega^2 (\mathrm{A}\rho_{11} - \mathrm{B}\rho_{12}) \qquad a_{12} = \omega^2 (\mathrm{A}\rho_{12} - \mathrm{B}\rho_{22})$$

$$a_{21} = \omega^2 \left((\lambda' + 2\mu)\rho_{12} - \mathrm{B}\rho_{11} \right) \qquad a_{22} = \omega^2 \left((\lambda' + 2\mu)\rho_{22} - \mathrm{B}\rho_{12} \right)$$

$$b_{11} = -\omega b (\mathrm{A} + \mathrm{B}) \qquad b_{12} = \omega b (\mathrm{A} + \mathrm{B})$$

$$b_{21} = \omega \mathrm{b} \left(\lambda' + 2\mu + \mathrm{B} \right) \qquad b_{22} = -\omega \mathrm{b} \left(\lambda' + 2\mu + \mathrm{B} \right)$$

$$a_0 = A\left(\lambda' + 2\mu\right) - B^2$$

Las soluciones de los vectores propios son:

$$\tilde{v}^I = \begin{pmatrix} \tilde{v}_1^I \\ \tilde{v}_2^I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} + ib_{11} - a_{22} - ib_{22} - \left((a_{11} + ib_{11})^2 - 2(a_{11} + ib_{11})(a_{22} + ib_{22}) + (a_{22} + ib_{22})^2 + 4(a_{12} + ib_{12})(a_{21} + ib_{21}) \right)^{0.5} \\ 2(a_{21} + ib_{21}) \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\tilde{v}^{II} = \begin{pmatrix} \tilde{v}_1^{II} \\ \tilde{v}_2^{II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} + ib_{11} - a_{22} - ib_{22} + \left((a_{11} + ib_{11})^2 - 2(a_{11} + ib_{11})(a_{22} + ib_{22}) + (a_{22} + ib_{22})^2 + 4(a_{12} + ib_{12})(a_{21} + ib_{21}) \right)^{0.5} \\ 2(a_{21} + ib_{21}) \end{pmatrix}$$

La solución general puede expresarse de la siguiente forma:

$$v(x_3, t, \omega) = \left(C_1 \tilde{v}^I e^{i\lambda_1 x_3} + C_2 \tilde{v}^I e^{-i\lambda_1 x_3} + C_3 \tilde{v}^{II} e^{i\lambda_3 x_3} + C_4 \tilde{v}^{II} e^{-i\lambda_3 x_3} \right) e^{i\omega t} \quad (15)$$

Vamos a suponer que la posición de la primera cara de la muestra poroelástica es $x_3 = l - l_p$ y la posición de la segunda pared es $x_3 = l$, ver la Figura 3.

5.1 Configuración I sin medio poroelástico: primer fluido, sólido y segundo fluido.

Sea Z_∞ la impedancia del fluido infinito, dónde λ_{f_2}, ρ_{f_2} y c_{f_2} son el módulo de compresibilidad, la densidad y la velocidad de propagación de la onda en el segundo fluido, respectivamente:

$$Z_\infty = c_{f_2} \rho_{f_2} \qquad c_{f_2} = \sqrt{\frac{\lambda_{f_2}}{\rho_{f_2}}} \quad (16)$$

Sea Z_s la impedancia de la capa sólida con unas condiciones de contorno infinitamente rígidas en su segunda cara, dónde λ_s, μ_s, ρ_s y c_s son las dos constantes de Lame del sólido, la densidad del sólido y la velocidad de propagación de la ondas en el sólido, respectivamente:

$$Z_s = \frac{\left(e^{i\frac{2\omega l_s}{c_s}} + 1 \right)}{\left(e^{i\frac{2\omega l_s}{c_s}} - 1 \right)} c_s \rho_s \qquad c_s = \sqrt{\frac{\lambda_s + 2\mu_s}{\rho_s}} \quad (17)$$

A partir de la solución en el segundo fluido, en el sólido y las condiciones de contorno, es posible deducir la impedancia $Z_{s\infty}$ del sistema formado por el sólido y el segundo fluido:

$$Z_{s\infty}(\omega) = \frac{(c_s \rho_s)^2 + Z_\infty Z_s}{Z_s + Z_\infty} \quad (18)$$

Sea $R_{s\infty}$ el coeficiente de reflexión, el cociente de las amplitudes de la onda reflejada y la onda incidente, expresado como desplazamientos o presiones en el primer fluido, en donde λ_{f_1}, ρ_{f_1} y c_{f_1} son el módulo

de compresibilidad, la densidad y la velocidad de propagación de onda del primer fluido, respectivamente:

$$R_{s\infty}(\omega)=\frac{(c_s\rho_s)^2-c_{f_1}\rho_{f_1}Z_s-c_{f_1}\rho_{f_1}c_{f_2}\rho_{f_2}+Z_sc_{f_2}\rho_{f_2}}{(c_s\rho_s)^2+c_{f_1}\rho_{f_1}Z_s+c_{f_1}\rho_{f_1}c_{f_2}\rho_{f_2}+Z_sc_{f_2}\rho_{f_2}} \tag{19}$$

Sean $r_{s\infty}$ and $\alpha_{s\infty}$ los coeficientes de reflexión y absorción expresados como ratios de energía:

$$\begin{aligned} r_{s\infty}(\omega)&=\left|R_{s\infty}(\omega)\right|^2\\ \alpha_{s\infty}(\omega)&=1-r_{s\infty}(\omega)\end{aligned} \tag{20}$$

5.2 Configuración II con medio poroelástico: primer fluido, medio poroso, sólido y segundo fluido.

Las soluciones de los desplazamientos y la tensión del sólido en el límite con el medio poroso, $x_3=l-l_s$, se expresan en la ecuación (21). Las soluciones dependen del espesor de la capa sólida, l_s , la amplitud de los desplazamientos en el segundo fluido, $\tilde{v}_3$, la frecuencia angular, ω , y las propiedades mecánicas del sólido y el segundo fluido.

$$\begin{aligned} w_3(x_3=l-l_s,t,\omega)&=\tilde{v}_3\,\mathrm{e}^{-i\omega l\sqrt{\frac{\rho_{f_2}}{\lambda_{f_2}}}}\frac{\left(\mathrm{e}^{i2\omega l_s\sqrt{\frac{\rho_s}{\lambda_s+2\mu_s}}}+1\right)\sqrt{(\lambda_s+2\mu_s)\rho_s}+\left(\mathrm{e}^{i2\omega l_s\sqrt{\frac{\rho_s}{\lambda_s+2\mu_s}}}-1\right)\sqrt{\lambda_{f_2}\rho_{f_2}}}{2\sqrt{(\lambda_s+2\mu_s)\rho_s}\,\mathrm{e}^{i\omega l_s\sqrt{\frac{\rho_s}{\lambda_s+2\mu_s}}}}\mathrm{e}^{i\omega t}\\ \tau_{33}(x_3=l-l_s,t,\omega)&=\frac{i\omega\tilde{v}_3}{2}\mathrm{e}^{-i\omega l\sqrt{\frac{\rho_{f_2}}{\lambda_{f_2}}}}\frac{-\left(\mathrm{e}^{i2\omega l_s\sqrt{\frac{\rho}{\lambda+2\mu}}}-1\right)\sqrt{(\lambda_s+2\mu_s)\rho_s}-\left(\mathrm{e}^{i2\omega l_s\sqrt{\frac{\rho}{\lambda+2\mu}}}+1\right)\sqrt{\lambda_{f_2}\rho_{f_2}}}{\mathrm{e}^{i\omega l_s\sqrt{\frac{\rho_s}{\lambda_s+2\mu_s}}}}\mathrm{e}^{i\omega t}\end{aligned} \tag{21}$$

Los desplazamientos macroscópicos del esqueleto sólido, u_3 , y el fluido, υ_3 , del medio poroso deben ser iguales al desplazamiento del sólido, w_3 , en $x_3=l-l_s$:

$$\begin{aligned} u_3(x_3=l-l_s,t,\omega)&=w_3(x_3=l-l_s,t,\omega)\\ \upsilon_3(x_3=l-l_s,t,\omega)&=w_3(x_3=l-l_s,t,\omega)\end{aligned} \tag{22}$$

La suma de la tensión del esqueleto y el fluido a la escala macroscópica debe ser igual a la tensión en el sólido:

$$\sigma_{33}(x_3=l-l_s,t,\omega)+s(x_3=l-l_s,t,\omega)=\tau_{33}(x_3=l-l_s,t,\omega) \tag{23}$$

Las tensiones del esqueleto sólido y del fluido en el medio poroelástico a escala macroscópica están relacionados con la presión del primer fluido y la porosidad en la frontera entre el medio poroso y el primer fluido:

$$\begin{aligned} s\left(x_3=l-\left(l_p+l_s\right),t,\omega\right)&=-\beta p\left(x_3=l-\left(l_p+l_s\right),t,\omega\right)\\ \sigma_{33}\left(x_3=l-\left(l_p+l_s\right),t,\omega\right)&=-(1-\beta)\,p\left(x_3=l-\left(l_p+l_s\right),t,\omega\right)\end{aligned} \tag{24}$$

Las dos ecuaciones en (24) producen la cuarta condición de contorno del medio poroelástico:

$$0=\sigma_{33}\left(x_3=l-\left(l_p+l_s\right),t,\omega\right)\beta-(1-\beta)s\left(x_3=l-\left(l_p+l_s\right),t,\omega\right) \tag{25}$$

Incluyendo las condiciones de contorno (22), (23) y (25) en la solución general (15), llegamos al siguiente sistema para calcular las cuatro constantes:

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{w}_3\left(x_3 = l - l_s, \omega\right) \\ \tilde{w}_3\left(x_3 = l - l_s, \omega\right) \\ \tilde{\tau}_{33}\left(x_3 = l - l_s, \omega\right) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{26}$$

En las que los valores de A_{ij} son:

$$\begin{aligned}
&A_{11} = \tilde{v}_1^I e^{i\lambda_1(l-l_s)} \quad A_{12} = \tilde{v}_1^I e^{-i\lambda_1(l-l_s)} \quad A_{13} = \tilde{v}_1^{II} e^{i\lambda_3(l-l_s)} \quad A_{14} = \tilde{v}_1^{II} e^{-i\lambda_3(l-l_s)} \\
&A_{21} = \tilde{v}_2^I e^{i\lambda_1(l-l_s)} \quad A_{22} = \tilde{v}_2^I e^{-i\lambda_1(l-l_s)} \quad A_{23} = \tilde{v}_2^{II} e^{i\lambda_3(l-l_s)} \quad A_{24} = \tilde{v}_2^{II} e^{-i\lambda_3(l-l_s)} \\
&A_{31} = i\lambda_1 e^{i\lambda_1(l-l_s)}\left(\left(C_{11}+C_{21}\right)\tilde{v}_1^I + \left(C_{12}+C_{22}\right)\tilde{v}_2^I\right) \\
&A_{32} = -i\lambda_1 e^{-i\lambda_1(l-l_s)}\left(\left(C_{11}+C_{21}\right)\tilde{v}_1^I + \left(C_{12}+C_{22}\right)\tilde{v}_2^I\right) \\
&A_{33} = i\lambda_3 e^{i\lambda_3(l-l_s)}\left(\left(C_{11}+C_{21}\right)\tilde{v}_1^{II} + \left(C_{12}+C_{22}\right)\tilde{v}_2^{II}\right) \\
&A_{34} = -i\lambda_3 e^{-i\lambda_3(l-l_s)}\left(\left(C_{11}+C_{21}\right)\tilde{v}_1^{II} + \left(C_{12}+C_{22}\right)\tilde{v}_2^{II}\right) \\
&A_{41} = i\lambda_1 e^{i\lambda_1(l-l_p-l_s)}\left(\left(\beta\left(C_{11}+C_{21}\right)-C_{21}\right)\tilde{v}_1^I + \left(\beta\left(C_{12}+C_{22}\right)-C_{22}\right)\tilde{v}_2^I\right) \\
&A_{42} = -i\lambda_1 e^{-i\lambda_1(l-l_p-l_s)}\left(\left(\beta\left(C_{11}+C_{21}\right)-C_{21}\right)\tilde{v}_1^I + \left(\beta\left(C_{12}+C_{22}\right)-C_{22}\right)\tilde{v}_2^I\right) \\
&A_{43} = i\lambda_3 e^{i\lambda_3(l-l_p-l_s)}\left(\left(\beta\left(C_{11}+C_{21}\right)-C_{21}\right)\tilde{v}_1^{II} + \left(\beta\left(C_{12}+C_{22}\right)-C_{22}\right)\tilde{v}_2^{II}\right) \\
&A_{44} = -i\lambda_3 e^{-i\lambda_3(l-l_p-l_s)}\left(\left(\beta\left(C_{11}+C_{21}\right)-C_{21}\right)\tilde{v}_1^{II} + \left(\beta\left(C_{12}+C_{22}\right)-C_{22}\right)\tilde{v}_2^{II}\right)
\end{aligned} \tag{27}$$

La solución analítica de las constantes C_1, C_2, C_3 y C_4 en la ecuación (26) se han obtenido, pero no se detallan en por ser extremadamente largas. Una vez que C_1, C_2, C_3 y C_4 son conocidas, los desplazamientos y las tensiones en el medio poroelástico están determinadas. En el límite con el primer fluido, $x_3 = l - l_p - l_s$, tenemos:

$$\begin{aligned}
&\tilde{u}_3 = C_1\tilde{v}_1^I e^{i\lambda_1(l-l_p-l_s)} + C_2\tilde{v}_1^I e^{-i\lambda_1(l-l_p-l_s)} + C_3\tilde{v}_1^{II} e^{i\lambda_3(l-l_p-l_s)} + C_4\tilde{v}_1^{II} e^{-i\lambda_3(l-l_p-l_s)} \\
&\tilde{\upsilon}_3 = C_1\tilde{v}_2^I e^{i\lambda_1(l-l_p-l_s)} + C_2\tilde{v}_2^I e^{-i\lambda_1(l-l_p-l_s)} + C_3\tilde{v}_2^{II} e^{i\lambda_3(l-l_p-l_s)} + C_4\tilde{v}_2^{II} e^{-i\lambda_3(l-l_p-l_s)} \\
&\tilde{\sigma}_{33} = i\lambda_1\left(C_1 e^{i\lambda_1(l-l_p-l_s)} - C_2 e^{-i\lambda_1(l-l_p-l_s)}\right)\left(C_{11}\tilde{v}_1^I + C_{12}\tilde{v}_2^I\right) + i\lambda_3\left(C_3 e^{i\lambda_3(l-l_p-l_s)} - C_4 e^{-i\lambda_3(l-l_p-l_s)}\right)\left(C_{11}\tilde{v}_1^{II} + C_{12}\tilde{v}_2^{II}\right) \\
&\tilde{s} = i\lambda_1\left(C_1 e^{i\lambda_1(l-l_p-l_s)} - C_2 e^{-i\lambda_1(l-l_p-l_s)}\right)\left(C_{21}\tilde{v}_1^I + C_{22}\tilde{v}_2^I\right) + i\lambda_3\left(C_3 e^{i\lambda_3(l-l_p-l_s)} - C_4 e^{-i\lambda_3(l-l_p-l_s)}\right)\left(C_{21}\tilde{v}_1^{II} + C_{22}\tilde{v}_2^{II}\right)
\end{aligned} \tag{28}$$

Por último, aplicamos la siguiente condición para calcular la amplitud del desplazamiento y la presión en el primer fluido en $x_3 = l - l_p - l_s$:

$$\begin{aligned}
&\tilde{p} = -\frac{\tilde{s}}{\beta} = -\frac{\tilde{\sigma}_{33}}{1-\beta} \\
&\tilde{v}_3 = \left(1-\beta\right)\tilde{u}_3 + \beta\tilde{\upsilon}_3
\end{aligned} \tag{29}$$

Introduciendo (28) en (29) obtenemos el desplazamiento en el primer fluido en $x_3 = l - l_p - l_s$:

$$\begin{aligned}
&\tilde{v}_3 = \left(C_1 e^{i\lambda_1(l-l_p-l_s)} + C_2 e^{-i\lambda_1(l-l_p-l_s)}\right)\left(\left(1-\beta\right)\tilde{v}_1^I + \beta\tilde{v}_2^I\right) + \left(C_3 e^{i\lambda_3(l-l_p-l_s)} + C_4 e^{-i\lambda_3(l-l_p-l_s)}\right)\left(\left(1-\beta\right)\tilde{v}_1^{II} + \beta\tilde{v}_2^{II}\right) \\
&\tilde{v}_{3,3} = i\lambda_1\left(C_1 e^{i\lambda_1(l-l_p-l_s)} - C_2 e^{-i\lambda_1(l-l_p-l_s)}\right)\left(\left(1-\beta\right)\tilde{v}_1^I + \beta\tilde{v}_2^I\right) + i\lambda_3\left(C_3 e^{i\lambda_3(l-l_p-l_s)} - C_4 e^{-i\lambda_3(l-l_p-l_s)}\right)\left(\left(1-\beta\right)\tilde{v}_1^{II} + \beta\tilde{v}_2^{II}\right)
\end{aligned} \tag{30}$$

La impedancia de la configuración de la sección 6.2 se puede expresar de la siguiente forma:

$$Z_{ps\infty} = \frac{-\lambda_{f1}\tilde{v}_{3,3}}{i\omega\tilde{v}_3} \tag{31}$$

Remplazando (30) en (31):

$$Z_{ps\infty} = \frac{-\lambda_{f1}\left(\lambda_1\left(C_1 e^{i\lambda_1(l-l_p-l_s)} - C_2 e^{-i\lambda_1(l-l_p-l_s)}\right)\left(\left(1-\beta\right)\tilde{v}_1^I + \beta\tilde{v}_2^I\right) + \lambda_3\left(C_3 e^{i\lambda_3(l-l_p-l_s)} - C_4 e^{-i\lambda_3(l-l_p-l_s)}\right)\left(\left(1-\beta\right)\tilde{v}_1^{II} + \beta\tilde{v}_2^{II}\right)\right)}{\omega\left(\left(C_1 e^{i\lambda_1(l-l_p-l_s)} + C_2 e^{-i\lambda_1(l-l_p-l_s)}\right)\left(\left(1-\beta\right)\tilde{v}_1^I + \beta\tilde{v}_2^I\right) + \left(C_3 e^{i\lambda_3(l-l_p-l_s)} + C_4 e^{-i\lambda_3(l-l_p-l_s)}\right)\left(\left(1-\beta\right)\tilde{v}_1^{II} + \beta\tilde{v}_2^{II}\right)\right)} \tag{32}$$

El coeficiente de reflexión $R_{ps\infty}$ se puede obtener de la impedancia:

$$R_{ps\infty} = \frac{Z_{ps\infty} - \sqrt{\lambda_{f1}\rho_{f1}}}{Z_{ps\infty} + \sqrt{\lambda_{f1}\rho_{f1}}} \tag{33}$$

Sea $r_{ps\infty}$ el coeficiente de reflexión de la configuración de la sección 6.2:

$$r_{ps\infty} = \left|R_{ps\infty}\right|^2 \tag{34}$$

Sea $\alpha_{ps\infty}$ el coeficiente de absorción de la configuración de la sección 6.2:

$$\alpha_{ps\infty} = 1 - r_{ps\infty} \tag{35}$$

Sea $\delta_{ps\infty}$ el coeficiente de disipación y $\tau_{ps\infty}$ el coeficiente de transmisión. Como la energía absorbida es disipada o transmitida:

$$\alpha_{ps\infty} = \delta_{ps\infty} + \tau_{ps\infty} \tag{36}$$

Entonces la energía transmitida será:

$$E_t = \left|p(x_3,t,\omega)\dot{v}_3(x_3,t,\omega)\right| = \left|\omega^2\sqrt{\lambda_{f_2}\rho_{f_2}}\tilde{v}_3^2\right| \tag{37}$$

La energía incidente se puede expresar como:

$$E_i = \left|p_i(x_3,t,\omega)\dot{v}_{i3}(x_3,t,\omega)\right| = \left|\frac{\left(\tilde{v}_{3,3}^o\lambda_{f1} - i\tilde{v}_3^o\omega\sqrt{\lambda_{f1}\rho_{f1}}\right)^2}{4\sqrt{\lambda_{f1}\rho_{f1}}}\right| \tag{38}$$

A partir de las ecuaciones (37) y (38) el coeficiente de trasmisión se puede obtener de forma directa:

$$\tau_{ps\infty} = \frac{E_t}{E_i} = \frac{4\omega^2\sqrt{\lambda_{f1}\rho_{f1}}\sqrt{\lambda_{f_2}\rho_{f_2}}\left|\tilde{v}_3^2\right|}{\left|\left(\tilde{v}_{3,3}^o\lambda_{f1} - i\tilde{v}_3^o\omega\sqrt{\lambda_{f1}\rho_{f1}}\right)^2\right|} \tag{39}$$

Una vez calculados $\tau_{ps\infty}$ y $\alpha_{ps\infty}$, el coeficiente de disipación también se puede determinar:

$$\delta_{ps\infty} = \alpha_{ps\infty} - \tau_{ps\infty} \tag{40}$$

Los coeficientes de reflexión determinado en las secciones 4.1 y 4.2 permiten la cuantificación de la reducción de energía en dB debidos a la presencia del medio de poroelástico, ver ecuación (8).

6. Diseño de espumas metálicas para depósitos de Aviones.

Con el fin de probar la capacidad de disipación de un metal poroso saturado de queroseno, vamos a ejecutar algunas aplicaciones. En primer lugar, vamos a considerar un metal poroso con buenas propiedades para absorber el ruido cuando se satura con aire [41], véase la Tabla 2 y la Tabla 3.

Tabla 2. Porosidad β, resistencia al flujo b ($\mathrm{Nsm^{-4}}$).

β	b
0.9094	18980

Tabla 3. Propiedades de los materiales de base.

aluminium	λ_s=52.036 GPa	$\mu_s = 25.862\,\mathrm{GPa}$	$\rho_s = 2700\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$
air	λ_f=1.0E+04 Pa	$\rho_f = 1.2\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$	$\mu_f = 1.8\text{E-}05\,\mathrm{Pa\cdot s}$
kerosene	λ_f=1.43 GPa	$\rho_f = 795\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$	$\mu_f = 0.00164\,\mathrm{Pa\cdot s}$

Vamos a comparar dos situaciones, una situación en la que el primer fluido es aire, Figuras 4 y 6, y una segunda situación en la que el primer fluido es queroseno, Figuras 5 y 7. En ambas situaciones, el segundo fluido será aire.

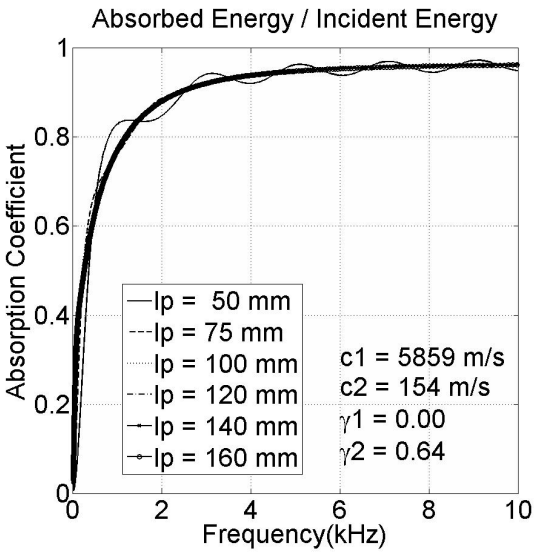


Figura 4. Coeficiente de absorción (primer fluido aire)

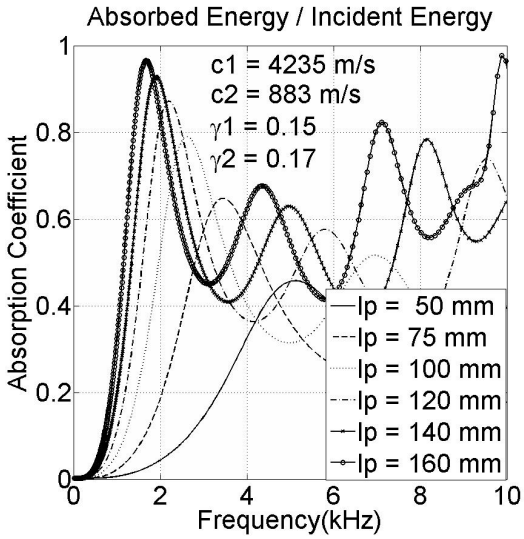


Figura 5. Coeficiente de absorción (primer fluido queroseno)

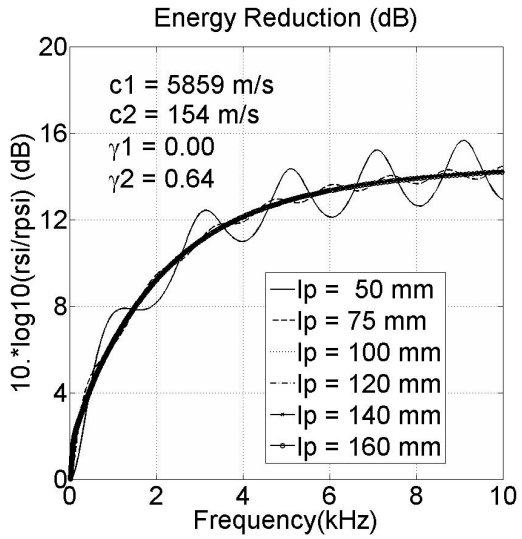


Figura 6. Reducción de la energía (primer fluido aire)

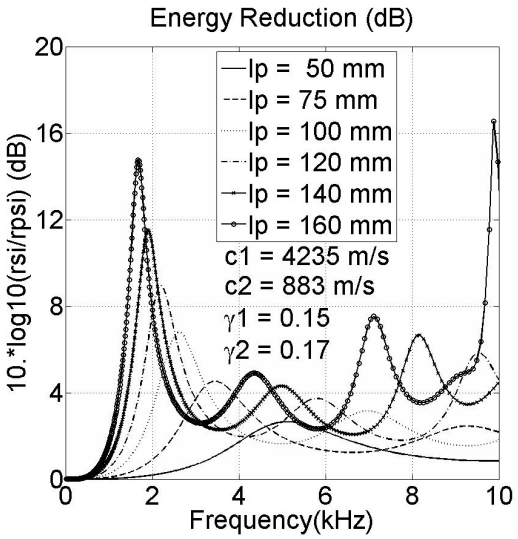


Figura 7. Reducción de la energía (primer fluido queroseno)

Dos velocidades de las ondas, c_1 y c_2, se han calculado y representado en las siguientes figuras para una frecuencia de referencia de 1 kHz. c_1 es la velocidad de la propagación de la onda en el esqueleto sólido en su interacción con el fluido. c_2 es la velocidad de la propagación de la onda en el fluido intersticial en su interacción con el esqueleto sólido. γ_1 y γ_2 son los factores de amortiguamiento de la propagación c_1 y c_2, respectivamente.

La comparación de las cifras es muy ilustrativa. Cuando el primer fluido es aire, el material poroelástico tiene un buen comportamiento de absorción, véase la figura 4, en la que el coeficiente de absorción es mayor de 0.9 en medias y altas frecuencias. Este no es el caso cuando el primer fluido es queroseno, véase la Figura 5.

En la Figura 4 la velocidad c_1 es 0.93 veces la velocidad del aluminio, lo que indica que el aire intersticial no afecta a la propagación de la onda en el esqueleto sólido. Por otro lado, la velocidad c_2 es aproximadamente la mitad de la velocidad del aire, mostrando que el esqueleto sólido afecta en gran medida la propagación de la onda en el aire. Esto podría también ser observado en los valores de los factores de amortiguamiento, con γ_1 de valor próximo a cero, demostrando que la propagación en el esqueleto no está amortiguada por el aire, y con γ_2 igual a 0.64, que muestra que la presencia del esqueleto sólido activa la disipación viscosa en el aire.

En la Figura 5, la velocidad c_1 es aproximadamente 0.67 veces la velocidad del aluminio y γ_1 es 0.15, que muestra que la presencia de queroseno influye claramente la propagación de la onda en el esqueleto sólido y activa la disipación viscosa. Este es un ejemplo ilustrativo que aclara por qué los modelos simplificados empleados para medios porosos saturados por aire, con sólo una propagación de la onda esférica, no son suficientes para modelar adecuadamente medios porosos saturados por líquidos. La velocidad c_2 es 0.66 veces la velocidad de propagación de onda de la queroseno, lo que indica que el esqueleto influye drásticamente la propagación en el fluido.

La Figura 6 muestra que la reducción de la energía generada por el material poroso saturado por el aire está cerca de 12 dB a frecuencias medias y altas. Se desprende, de la Figura 4, que un espesor superior a 75 mm no mejora el comportamiento de absorción, lo que demuestra que un pequeño espesor es suficiente para disipar la energía acústica.

Este no es el caso cuando el metal poroso está saturado por queroseno. Las Figura 5 y 7 muestran que la capacidad de disipación no es suficiente para absorber la energía incidente, y la capacidad de absorción depende en gran medida del espesor de la muestra.

A fin de mejorar la capacidad de disipación del material poroso saturado con queroseno, vamos a multiplicar el radio de las cavidades por el coeficiente c_r, con el fin de modificar el radio de las cavidades. El siguiente valor de c_r hace que la resistencia al flujo equivalente desde el punto de vista adimensional:

$$c_r = \left(\frac{\mu_v^{\ker osene} \rho_{f1}^{air}}{\mu_v^{air} \rho_{f1}^{\ker osene}} \right)^{0.5} = 0.371 \tag{41}$$

Vamos a realizar dos nuevas simulaciones para valores de c_r igual a igual a 0.4 y 0.3. Esto implica un incremento de la resistencia al flujo del medio poroso, y por lo tanto, un aumento en el acoplamiento viscoso entre el esqueleto sólido y el fluido. Los resultados se muestran en las figuras 8 a 11.

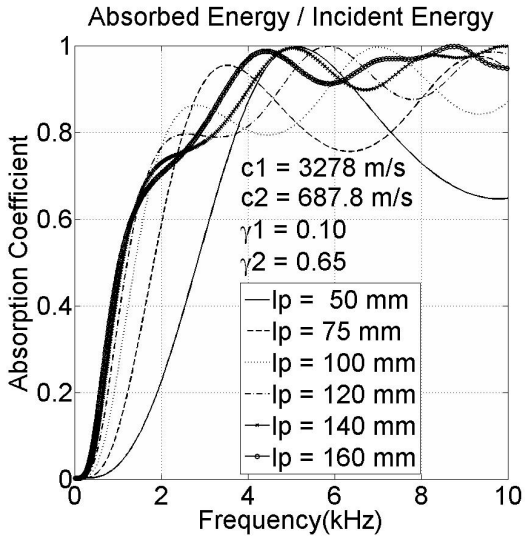


Figura 8. Coeficiente de absorción ($c_r = 0.4$)

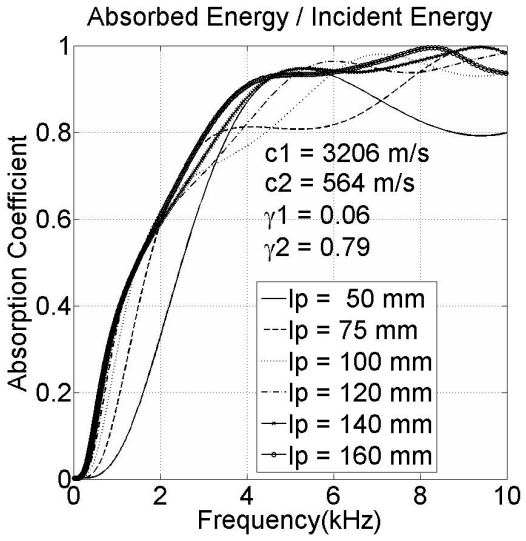


Figura 9. Coeficiente de absorción ($c_r = 0.3$)

Como era de esperar, el incremento de la resistencia al flujo aumenta los factores de amortiguamiento y reduce las velocidades de propagación de la onda. El valor de c_r 0.4 mejora el comportamiento de absorción ya que aumenta la capacidad de disipación del metal poroso. Sin embargo, si continuamos reduciendo el valor de c_r, aparecen efectos positivos y negativos en la capacidad de absorción. El amortiguamiento sigue aumentando, lo que aumenta la capacidad del medio poroso para disipar la onda.

Sin embargo, las diferencias en las velocidades de propagación de la onda entre el medio de queroseno libre, externo al esqueleto sólido, y el queroseno intersticial aumentan, y esto reduce la capacidad de refracción del medio poroso. Por lo tanto, un equilibrio entre la capacidad de refracción y la capacidad de disipación se debe encontrar para optimizar la capacidad absorbente de una sola capa de metal poroso. Se puede observar claramente en la comparación de la figura 8 y 9, que la mayor reducción de c_r ha sido útil en el incremento de la absorción a partir frecuencias medias y altas, pero ha tenido un efecto negativo en las frecuencias bajas.

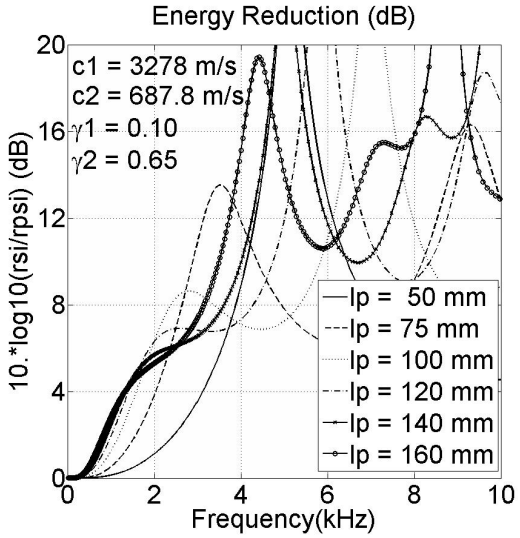


Figura 10. Reducción de la energía ($c_r = 0.4$)

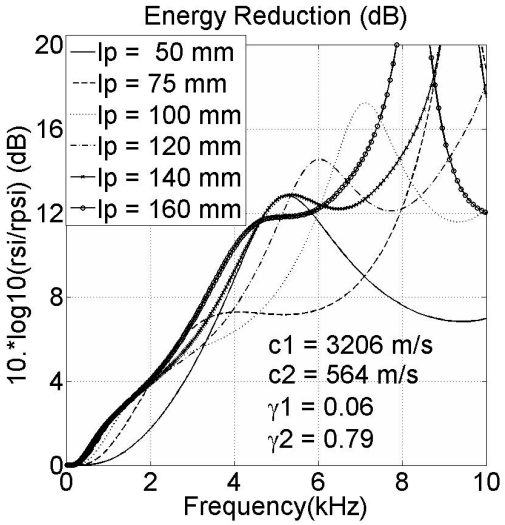


Figura 11. Reducción de la energía ($c_r = 0.3$)

7. Trabajos Futuros: Tubo de Impedancia para la Caracterización de Espumas Metálicas Saturadas por Queroseno.

Hasta la fecha, el mayor avance en el desarrollo de un tubo de impedancia para medios líquidos se ha logrado en el "*Physical Acoustics Laboratories"* de la Universidad de Boston, siendo un problema complejo, no resuelto hasta la fecha.

En el *Laboratorio de Diseño y Caracterización de Materiales en Acústica Submarina* de la Universidad Politécnica de Cartagena, se ha desarrollado un tubo de impedancia para caracterizar el comportamiento acústico de metales porosos saturados por queroseno. Soluciones analíticas y el análisis de errores aleatorios y sistemáticos se han desarrollado para el diseño del tubo de impedancia. También se ha desarrollado un método para la calibración total del tubo de impedancia. El diseño del tubo se puede ver Figura 12, donde es posible obtener experimentalmente la reflexión, absorción, transmisión y disipación de coeficientes de la configuración de la figura 2.

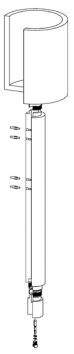


Figura 12. Tubo de impedancia desarrollado en el Laboratorio de Diseño y Caracterización de Materiales en Acústica Submarina de la Universidad Politécnica de Cartagena.

8. Conclusiones.

Se han desarrollado soluciones analíticas para estudiar la capacidad de disipación de ruido de metales porosos dentro de la Teoría General de Biot de Acústica a Frecuencias Altas [20]. Una configuración se ha definido para estudiar la capacidad de absorción de los metales porosos saturados por queroseno. Se han realizado aplicaciones analíticamente, y se muestra que una reducción de la permeabilidad del flujo podría proporcionar capacidad de disipación para el metal poroso saturado por queroseno.

Agradecimientos
Los autores agradecen el apoyo financiero a Navantia SA con el contrato 3173/11EC UPCT-NAVANTIA.

Referencias.

1. J.E. Cole III, A.W. Stokes, J.M. Garrelick and K.F. Martini (1988). NASA Contractor Report 4136. Analytical modelling of the structure-borne noise path on a small twin-engine aircraft.
2. J.F. Unruh (1989). NASA Contract Report 3144. Aircraft propeller induced structure-borne noise.
3. J.S. Mixson and J. F. Wilby (1991). Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practice. NASA Reference Publication 0147(1):160-244. Interior noise.
4. J.F. Wilby (1982). Propeller Performance and Noise (Volume 2). Von Kármán Institute for Fluid Dynamics, Propeller aircraft interior noise.
5. J.F.Wilby. An approach to the prediction of airplane interior noise. *AIAA*. Paper 76-548(1976).
6. J.F. Wilby and E.G. Wilby. Measurements of propeller noise in a light turboprop. *Journal of Aircraft*. 26:40-47(1989).
7. D.E. Bishop. Cruise flight noise levels in a turbojet transport airplane. *Noise Control*. 7:37-42 (1961).
8. W.V. Bhat. Use of correlation technique for estimating in-flight noise radiated by wing-mounted jet engines on a fuselage. *Journal of Sound and Vibration*. 23:467-486 (1971).
9. J.F. Wilby and F.L. Gloyna. Vibration measurements of an airplane fuselage structure, II: jet noise excitation. Journal of Sound and Vibration, 23:496-486 (1972).
10. J.S. Mixson and C.A. Powell. Review of recent research on interior noise of propeller driven aircraft. *Journal of Aircraft.* 11:820-838 (1985).
11. Lord Rayleigh, Theory of Sound (two volumes), Dover Publications, New York, 1877; 2nd edn. 1945 re-issue; see. Vol. II, pp. 319-333.
12. Lord Rayleigh, On porous bodies in relation to sound, Phil. Mag., 16, 181-186 (1883)
13. L. L. Beranek, Acoustical properties of homogeneous, isotropic rigid tiles and flexible blankets, J. Acoustic Soc. Am., 19(4), 556-568 (1947).
14. C. Zwikker and C. Kosten, Sound Absorbing Materials, Elsevier, Amsterdam, 1949.
15. M.A. Biot, General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys. 12 (1941) 155-164.
16. M.A. Biot, Theory of stress-strain relations in anisotropic viscoelasticity and relaxation phenomena, J. App. Phys. 25 (1954) 1385-1391.

17. M.A. Biot, Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid, J. App. Phys. 26 (1955) 182-185.
18. M.A. Biot, Theory of deformation of a porous viscoelastic anisotropic solid, J. App. Phys. 27 (1956) 459-467.
19. M.A. Biot, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range, J. Acoust. Soc. Am. 28 (1956) 168–178.
20. M.A. Biot, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range, J. Acoust. Soc. Am. 28 (1956) 179–191.
21. M.A. Biot, Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media, Journal of Applied Physics, vol.33, no.4, pp.1482-1498, Apr 1962
22. Kawasima Y. Sound propagation in a fiber block as a composite medium. Acta Acust 1960;10:208–17.
23. M.E. Delany, E.N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, Appl. Acoust. 3 (1970) 105–116.
24. Attenborough K, Walker LA. Scattering theory for sound absorption in fibrous media. J Acoust Soc Am 1971;49:1331–8.
25. P.M. Morse, K.U. Ingard, Theoretical Acoustics, McGraw-Hill, New York, 1978.
26. T. Levy, Propagation of waves in a fluid-saturated porous elastic solid, Int. J. Engrg. Sci. 17 (1979) 1005–1014.
27. J.L. Auriault, L. Borne, R. Chambon, Dynamics of porous saturated media, checking of the generalized law of Darcy, J. Acoust. Soc. Am. 77 (1985) 1641–1650.
28. Johnson DL, Koplik J, Dashen R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. J Fluid Mech 1987;176:379–402.
29. Y. Miki, Acoustical properties of porous materials – modifications of Delany– Bazley models, J. Acoust. Soc. Jpn. 11 (1990) 19–24.
30. Champoux Y, Stinson MR. Experimental investigation of models of sound wave propagation in air saturated porous media. J Acoust Soc Am 1990; 88(Suppl.):121.
31. Stinson MR. The propagation of plane sound waves in narrow and wide circular tubes, and generalisation to uniform tubes of arbitrary cross-section shape. J Acoust Soc Am 1991;89:550–8.
32. J.-F. Allard, Y. Champoux, New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials, J. Acoust. Soc. Am. 91 (6) (1992) 3346–3353.
33. Champoux Y, Stinson MR. On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors. J Acoust Soc Am 1992;92:1120–31.
34. Allard JF and Atalla. Propagation of sound in porous media, modelling sound absorbing materials. New York: Elsevier Applied Science; 1993.
35. D. Lafarge, P. Lemarinier, J.F. Allard, Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies, J. Acoust. Soc. Am. 102 (1997) 1995–2006.
36. Wilson DK. Simple, relaxational models for the acoustical properties of porous media. Appl Acoust 1997;50:171–88.
37. Tarnow V. Compressibility of air in fibrous materials. J Acoust Soc Am 1996;99:3010–7.
38. Tarnow V. Calculation of the dynamic airflow resistivity of fiber materials. J Acoust Soc Am 1997;102:1680–8.

39. L. Sanchez-Ricart, J. García-Peláez. Fluid-Solid Static Coupling for Saturated Porous Fiber Metals in the Biot's Acoustic Theory. Acta Acustica united with Acustica (S. Hirzel Verlag). 99(5):716-728 (2013).
40. L. Sanchez-Ricart, J. García-Peláez. Viscous Dissipative Power Density Function for Poroelastic Saturated Materials at High Frequencies. Mechanics of Materials (Elsevier). Accepted for publication 2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.07.001
41. Z. Bo, C. Tianning, Calculation of sound absorption characteristics of porous sintered fiber metal. Appl Acoust, 70 (2009), pp. 337–346

Seguridad Operacional en los UAS & RPAS

Esteban Viñado, Alvaro [1,2,*], Cuerno Rejado, Cristina [2]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA); E-mail: estebanva@inta.es (AEV)

[2] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio (Universidad Politécnica de Madrid); E-mail: cristina.cuerno@upm.es (CCR)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-mail: estebanva@inta.es (AEV)

Abstract: La regulación de los UAS y RPAS, avanza poco a poco con una hoja de ruta cada vez más definida tanto en el ámbito militar cómo en el civil, a nivel internacional, europeo y nacional. La seguridad de estos sistemas subyace en los diversos requisitos que van fijando los diferentes organismos y autoridades. En este artículo, se presenta una técnica de análisis y gestión de la seguridad y los riesgos de los sistemas no tripulados que trata de estandarizar esta actividad, con una metodología potente y flexible, aplicable a todo tipo de sistemas y misiones. Basado en los procesos aceptados y utilizados en aeronaves tripuladas, se pretende extender el uso de esta herramienta, novedosa en este campo, en todo el ciclo de vida del sistema. Debe apoyar tanto las decisiones de diseño tomadas, como adaptarse a la operación real del sistema una vez puesto en servicio, con los riesgos que conlleve pero que son conocidos y monitorizados con la ayuda de la herramienta *Bow-Tie* (núcleo de la metodología) presentado en este artículo.

Keywords: Aeronaves no tripuladas; UAS; RPAS; Seguridad Operacional; Riegos; *Safety; Hazard; Risk; Bow-Tie*

---

1. Introducción

Las aeronaves pilotadas de forma remota o *Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)* son un nuevo componente en el sistema de aviación que, tanto la Organización de Aviación Civil Internacional (*ICAO* en sus siglas en inglés) [1], como los Estados y la industria están intentando comprender, definir y por último integrar. Esta integración segura de los RPAS en el espacio aéreo no segregado es un objetivo a largo plazo debido a su gran complejidad.

El mayor problema que conllevan los RPAS es que el piloto a los mandos de la aeronave se elimina del interior de ésta. Esto conlleva la pérdida de la conciencia situacional que es el concepto utilizado para definir la regla más básica del aire [2]: el piloto siempre es el último responsable del control y las actuaciones de la aeronave. Por ello se hace indispensable adaptar los requisitos de seguridad de los RPAS. Las referencias [1], [3] y [4] detallan la historia del concepto y marco legal de las aeronaves no tripuladas. A este respecto, es importante reseñar el paulatino cambio de siglas que ha tenido lugar para referirse a los RPAS. En un inicio y con los primeros programas de desarrollo militares se contemplaban aviones no tripulados (UAVs). Se clasificaron en función del tamaño y el tipo de misión: UCAV, MALE, HALE, etc. Posteriormente con la definición de aeronaves tripuladas remotamente (un tipo de UAS), se recupera la figura del piloto a los mandos mencionada al inicio del párrafo y que conlleva excluir del concepto RPAS a las aeronaves completamente autónomas. La **Figura 1** representa el progresivo cambio de nomenclatura:

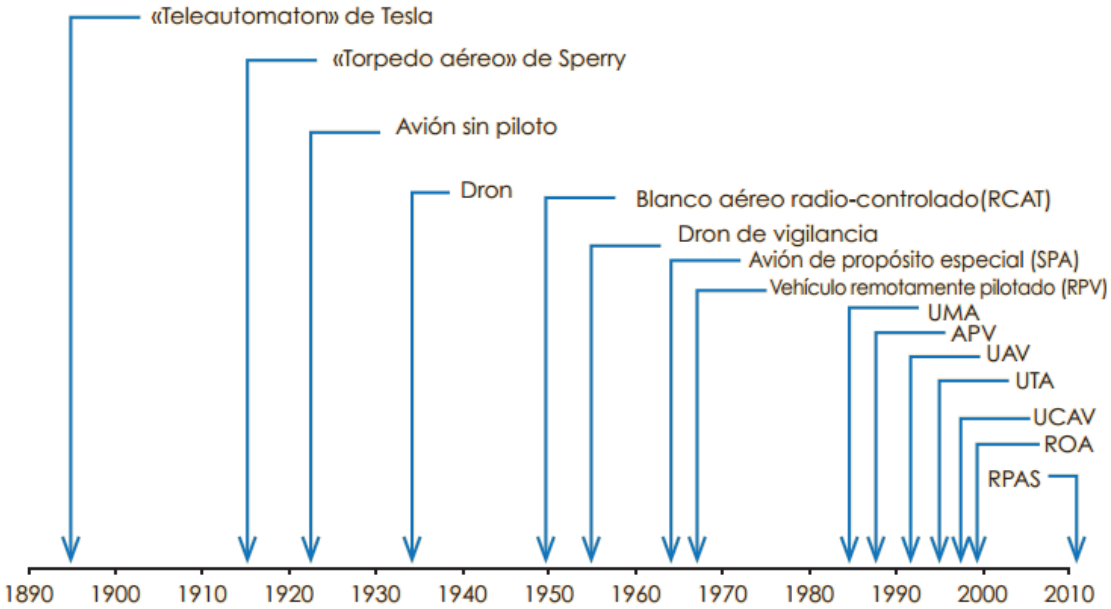


Figura 1. Cronología de los nombres aplicados a las aeronaves robóticas [5]

Las aplicaciones de estos sistemas en el sector de Defensa/Seguridad y en el sector Civil/Comercial han experimentado un gran crecimiento. Sus principales ventajas frente a las aeronaves tripuladas se encuentran sobre todo a la hora de realizar las llamadas misiones D^3 (*Dirty, Dull and Dangerous*).

Cualquier uso de estos sistemas en el espacio aéreo nacional requiere una autorización. Esa autorización siempre pasará por demostrar la segura operación del sistema en las condiciones declaradas por el solicitante.

En todos los ámbitos de la regulación, se ha remarcado la importancia de definir los niveles de seguridad equivalentes a los de las aeronaves tripuladas. Ningún organismo ha facilitado una metodología aceptable y estandarizada para evaluar la Seguridad Operacional (*Safety*) al nivel técnico que trata de exponer este documento.

2. Seguridad Operacional (*Safety*) en los UAS & RPAS

El punto de partida, más universal posible, es la premisa que la Organización de Aviación Civil Internacional recoge en [2]: "*A remotely piloted aircraft shall be operated in such a manner as to minimize hazards to persons, property or other aircraft*". Es decir, el peligro debe minimizarse y esto se consigue asociándolo a los *Safety levels* adecuados.

A continuación, se detalla el estado actual y la aproximación seguida por la regulación actual en materia de niveles de seguridad requerido a los UAS.

2.1. Introducción al System Safety en aviación civil

System Safety es, en términos generales, una disciplina de ingeniería aplicada durante el desarrollo de sistemas para identificar y mitigar riesgos [6].

A medida que las aeronaves fueron aumentando el nivel de complejidad de sus sistemas, se vio necesario definir un principio general, tal y como se detalla en [11], que relacionara de manera inversa, la probabilidad de que un sistema fallara con los efectos de ese fallo en la aeronave y/o sus tripulantes. Evidencias históricas [7] indicaban que la probabilidad de que se diera un accidente serio era aproximadamente uno por cada millón de horas de vuelo. El 10 por ciento de esos accidentes se atribuían a fallos de los sistemas de la aeronave. En un principio se asumió que, en una aeronave, había 100 potenciales condiciones de fallo que podrían ser catastróficas. El objetivo de esas condiciones de fallo se definió como 1x10 -9 por cada hora de vuelo para que los nuevos diseños de aeronaves mantuvieran la probabilidad de que un sistema generara un accidente catastrófico.

Tal y como se realizó con la aviación civil, se deben definir unos niveles de seguridad objetivo a la hora de diseñar los sistemas integrados en nuevos RPAS. Conceptos como "*Equivalent Level of Safety (ELOS), Systems, Hazards, Risks, Catastrophic Failures, Extremely Improbable*", están estrechamente ligados a la integración de los RPAS en el espacio aéreo [3].

2.2. Niveles de seguridad en UAS & RPAS

No se pueden aplicar directamente los niveles de seguridad, requeridos en las aeronaves tripuladas, a los sistemas integrados en los RPAS, ya que están basadas en que la probabilidad de fallo de un sistema debe ser inversamente proporcional a la criticidad de ese fallo, relacionado directamente con el número de víctimas mortales que dicho fallo implique [8].

Las guías básicas utilizadas para cumplir con los requisitos de seguridad son, en el ámbito militar la MIL-STD-882 [9] y en el civil [10] y [11]. Desde 2009, la OTAN ha definido objetivos de seguridad para los UAS [12] (y desde 2014 para UAS de ala rotatoria [13]) a través del requisito USAR(-RW).1309. Ambas normas de la OTAN referencian como medios aceptables de cumplimiento las guías anteriormente citadas.

La **Figura 2** es la matriz que relaciona la probabilidad con la severidad de los efectos de la condición de fallo. Esta relación es exactamente igual en aeronaves tripuladas, diferenciándose exclusivamente los valores objetivo de probabilidad numéricos:

		Catastrophic	Hazardous	Major	Minor	No Safety Effect
Frequent	$P > 10^{-3}/h$	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable	acceptable
Probable	$10^{-3}/h \geq P > 10^{-4}/h$	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable	acceptable	acceptable
Remote	$10^{-4}/h \geq P > 10^{-5}/h$	Unacceptable	Unacceptable	acceptable	acceptable	acceptable
Extremely Remote	$10^{-5}/h \geq P > 10^{-6}/h$	Unacceptable	acceptable	acceptable	acceptable	acceptable
Extremely Improbable	$10^{-6}/h \geq P$	acceptable	acceptable	acceptable	acceptable	acceptable

Figura 2. Requisitos de seguridad para el diseño y análisis de sistemas [13] (AMC.1309 (b) - System Design and Analysis)

2.3. Clasificación de UAS & RPAS

En el ámbito militar, la OTAN ha hecho grandes avances en la regulación de los UAS, tanto definiendo requisitos de aeronavegabilidad [12][13][14], como de entrenamiento [15] o interoperabilidad [16]. La clasificación OTAN actual es la que se indica en la **Figura 3**:

NATO UAS CLASSIFICATION						
Class	Category	Normal Employment	Normal Operating Altitude	Normal Mission Radius	Primary Supported Commander	Example Platform
Class III (> 600 kg)	Strike/ Combat*	Strategic/National	Up to 65,000 ft	Unlimited (BLOS)	Theatre	Reaper
	HALE	Strategic/National	Up to 65,000 ft	Unlimited (BLOS)	Theatre	Global Hawk
	MALE	Operational/Theatre	Up to 45,000 ft MSL	Unlimited (BLOS)	JTF	Heron
Class II (150 kg - 600 kg)	Tactical	Tactical Formation	Up to 18,000 ft AGL	200 km (LOS)	Brigade	Hermes 450
Class I (< 150 kg)	Small (>15 kg)	Tactical Unit	Up to 5,000 ft AGL	50 km (LOS)	Battalion, Regiment	Scan Eagle
	Mini (<15 kg)	Tactical Subunit (manual or hand launch)	Up to 3,000 ft AGL	Up to 25 km (LOS)	Company, Platoon, Squad	Skylark
	Micro ** (<66 J)	Tactical Subunit (manual or hand launch)	Up to 200 ft AGL	Up to 5 km (LOS)	Platoon, Squad	Black Widow

Figura 3. Clasificación de UAS de la OTAN [15]

2.3.1. Clasificación según el nivel de energía cinética

El nivel de energía se ha usado desde el inicio por los grupos de trabajo dedicados a redactar la regulación. El punto de partida fue la iniciativa JAA/EUROCONTROL [17], posteriormente EASA [18] y FAA[1] lo han adoptado, apoyado en diversos estudios de carácter científico [4], [19], [20], [21]. Un caso de estudio basado en la norma de EASA [18], se desarrolla en [22], cuyas conclusiones indican que es una aproximación restrictiva a las especificaciones de certificación que deben aplicar al producto. La ecuación para el cálculo de la energía cinética E_C, es la siguiente [17]:

$$E_C = \frac{1}{2} Masa \times (Velocidad)^2 \qquad (1)$$

En un futuro próximo es posible que el ámbito de la certificación militar adopte estos criterios. Por ello, se deberá evaluar si esta metodología requiere una revisión con el objetivo de no quedar obsoleto frente a los rápidos cambios de normativa que se producen en torno a los sistemas no tripulados. La **Figura 4** determina el $T_{GI(min)}$ (tiempo mínimo entre impactos contra el suelo) partiendo de la E_C:

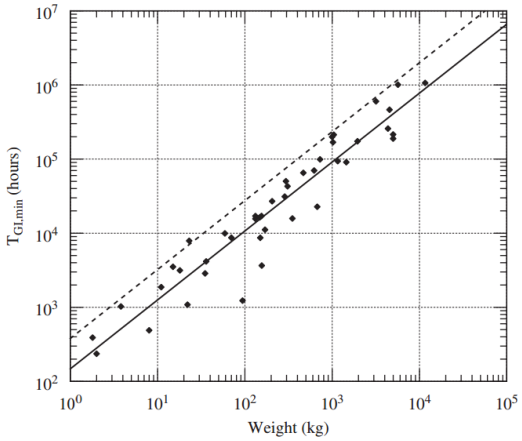


Figura 4. Requisito de $T_{GI(min)}$ en función del peso (*Weight*) [3]

[1] La *Federal Aviation Administration* (*U.S. Department. of Transport*) está trabajando en el borrador de una *Advisory Circular*. La energía cinética es usada para la clasificación de riesgo y probabilidad de fallo catastrófico.

Tal y como se ha expuesto, el nivel de energía es crítico para identificar los futuros requisitos de seguridad del sistema. Sin embargo, si en un determinado momento del desarrollo del programa el sistema tiene un exceso de peso, que obliga a cambiar de categoría al UAS, las herramientas de mitigación del árbol de eventos pueden ayudar a que la autoridad acepte las desviaciones respecto de los nuevos requisitos de seguridad impuestos al aplicar la **ecuación (1)**.

2.4. Objetivos Previstos

De manera no tan global como el Proyecto INOUI pretendía [23], se propone una metodología común para definir y cumplir los objetivos de seguridad requeridos, y que pueda ser aplicada a todo el ciclo de vida del sistema. Dicho ciclo contempla:

- Las etapas iniciales de definición de requisitos en función de las misiones a realizar por un RPAS.
- Las posteriores etapas de asignación de requisitos a los diversos subsistemas, incluidos[2]:
  - los equipos que soporten la capacidad de "*detect and avoid*" (ver [24]),
  - los equipos encargados de "*command and control* (C2) *link*",
  - los equipos encargados de "ATC *communication*" (C3, al considerarlo junto con C2),
  - la estación de tierra o "*remote pilot station* (RPS)".
- La operación de los RPAS con las particularidades del área de operación, la misión, las condiciones ambientales y las reglas del aire aplicadas.
  - Se hace especial énfasis en la gestión de la seguridad (*Safety Management*) como herramienta para realimentar los análisis teóricos iniciales que puedan incluir desviaciones frente a la realidad (ver [25]).
  - Las licencias de los operadores, DUOs en el ámbito militar (ver [15]) y RPL en el ámbito civil (ver [1] y [26]) se consideran fundamentales para operar de forma segura los sistemas. Sin embargo, la metodología es una entrada para la obtención de licencias debido a la definición de procedimientos de emergencias durante la fase de desarrollo del producto. Estos procedimientos deberán formar parte del entrenamiento del operador.

No forma parte de esta metodología, en esta etapa inicial de la metodología propuesta, la integración segura y el uso de aeródromos (y los problemas de integración que suponen).

Con todo ello, y durante las fases de implementación, integración y evolución de la regulación aplicable a los RPAS, se podrá llevar a cabo una realimentación de los análisis de seguridad (realizados durante el desarrollo de un programa concreto) con los datos obtenidos durante la operación (de los RPAS asociados al programa concreto, explotando bases de datos compuestas por los datos de operación de RPAS de un determinado tipo o que operen bajo unas características comunes). El objetivo final es conseguir que los RPAS tengan el nivel equivalente de seguridad (ELOS) [3], de los aviones tripulados que ha sido ampliamente aceptado desde el desarrollo e implementación de la industria de la aviación civil.

2.5. Metodología propuesta

La herramienta soporte de esta metodología es el diagrama *Bow-Tie*, que consiste en la suma de árboles de fallo (FTAs) y árboles de eventos (ETAs).

Los FTAs son ampliamente usados en el desarrollo y diseño de aeronaves para demostrar el cumplimiento de los objetivos de seguridad marcados por las bases de cualquier certificación de tipo

[2] Cada uno de los siguientes punto se corresponde con un capítulo del nuevo manual de RPAS publicado por la OACI [1] en marzo de este año y que debe ser usado como referencia a nivel internacional para desarrollar la futura normativa.

llevadas a cabo por una Autoridad de aeronavegabilidad. Varias guías se encargan de describir el proceso completo a seguir para evaluar la seguridad de los sistemas de aeronaves tripuladas durante su desarrollo (ver [10] y [11]). Estos estándares son reconocidos como medios aceptables de cumplimiento por las Autoridades americana y europea (FAA y EASA). En la actualidad, tanto en Europa como en Estados Unidos se trabaja en la actualización de estas guías, ampliamente extendidas, con el objetivo de cubrir las particularidades de los RPAS. En Europa concretamente, la tarea recae sobre el grupo de trabajo de EUROCAE WG73 [10].

La metodología basada en los diagramas *Bow-Tie* pretende cubrir la brecha entre operación y diseño: no sólo analizando los requisitos de los sistemas en la fase de diseño, como en las aeronaves convencionales, sino considerando la casuística operacional que tiene en cuenta el tipo de misión y el resto de condicionantes del espacio aéreo. Como se ha mencionado anteriormente, la herramienta consiste en la utilización conjunta de análisis de árboles de fallo junto con árboles de evento[3]. Esta herramienta se ha utilizado para evaluar el trabajo realizado en la Autoridades militares de aviación [27] y permitir su comparación.

La **Figura 5** esquematiza el modelo y sus diferentes componentes. En Europa, tanto JARUS como EUROCAE han dado pequeñas indicaciones sobre el uso de este modelo. EUROCONTROL promociona su uso en el sector ATM desde hace años. En [28], se puede encontrar un capítulo dedicado al modelo.

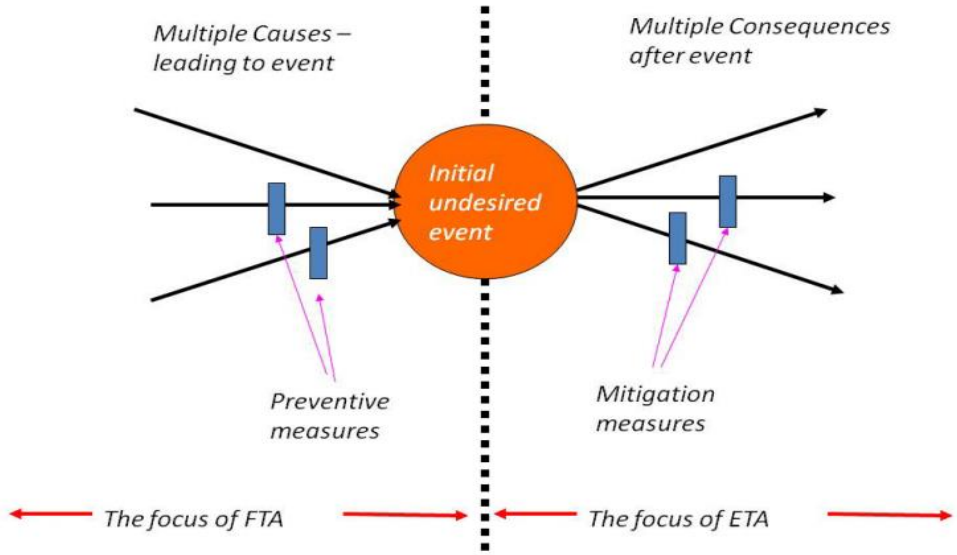


Figura 5. Esquema simplificado de un diagrama *Bow-Tie*

3. Conclusiones

El potencial de la herramienta está claramente justificado en este sector de los RPAS; el carácter innovador proviene de aplicar la metodología de análisis de riesgos con diferente filosofía en estos nuevos sistemas. El proceso estándar seguido en aviación civil y militar es completamente aplicable para analizar y justificar la seguridad de los sistemas embarcados en aeronaves tripuladas convencionales. El añadido de evaluar los árboles de eventos, potencia el uso de los análisis de seguridad durante la fase de operación de los UAS.

[3] Para más información de ambas técnicas de análisis de riesgos, ver [6]. Ericson [6], detalla por separado los FTAs y los ETAs, sin identificar el posible uso complementario. EUROCONTROL sí cubre este punto en [28].

3.1. Trabajos futuros

Esta técnica de análisis debe ser desarrollada en mayor profundidad para abarcar todas las particularidades de la operación de los UAS en espacio aéreo no segregado. Actualmente se está trabajando en aplicar esta metodología a los programas del INTA. Se espera en un futuro poder presentar durante el Congreso, los avances en alguna de las plataformas que el INTA desarrolla, produce, opera y mantiene. Este control del ciclo completo de vida, proporciona una gran oportunidad de utilizar la técnica detallada de análisis y gestión de la seguridad y los riesgos en un producto real y actualmente en funcionamiento.

Agradecimientos

A la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio por aceptar la solicitud del Proyecto de Tesis Doctoral en la que se enmarca este artículo. A mi tutora Cristina Cuerno por todo el apoyo y tiempo prestado desde el inicio antes incluso del inicio del proyecto.

Al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, en especial a los compañeros de *Safety* del Área de Aeronavegabilidad y al resto de personas de la Subdirección de Experimentación y Certificación que tan buenos consejos me han dado desde que este proyecto arrancó.

Referencias

[1] ICAO, *Doc 10019, Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)*, 1st ed., 2015.
[2] ICAO, "Amendment 43 to the international standards, rules of the air (Annex 2 to the convention)," 2012.
[3] K. Dalamagkidis, K. Valavanis, and L. Piegl, "On unmanned aircraft systems issues, challenges and operational restrictions preventing integration into the National Airspace System," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 44, pp. 503–519, 2008.
[4] K. Dalamagkidis, K. Valavanis, and L. Piegl, *On integrating unmanned aircraft systems into the national airspace system*, 2nd ed., vol. 36. 2012.
[5] C. Cuerno-Rejado, "Origen y desarrollo de los sistemas de aeronaves pilotadas por control remoto," in *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*, Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, Ed. Madrid, pp. 15–32, 2015.
[6] C. A. Ericson, *Hazard Analysis Techniques for System Safety*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
[7] EASA, "CS-25, AMC 25.1309 System Design and Analysis," 2015.
[8] R. Clothier, J. L. Palmer, R. Walker, and N. Fulton, "Definition of an airworthiness certification framework for civil unmanned aircraft systems," *Safety Science*, vol. 49, no. 6, pp. 871–885, Jul. 2011.
[9] U.S. Department of Defense, "MIL-STD-882E, Standard Practice, System Safety," 2012.
[10] EUROCAE and SAE, "EUROCAE ED-79A / SAE ARP 4754A, Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems," 2010.
[11] SAE, "SAE ARP 4761, Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment," 1996.
[12] NATO, "STANAG 4671, Unmanned Aerial Vehicles Systems Airworthiness Requirements (USAR)," 2009.
[13] NATO, "STANAG 4702, AEP-80 Rotatory Wing Unmanned Aerial Vehicles Systems Airworthiness Requirements," 2014.
[14] NATO, "STANAG 4703, AEP-83 Light Unmanned Aircraft Systems Airworthiness Requirements," 2014.
[15] NATO, "STANAG 4670, ATP-3.3.7 Guidance for the Training of Unmanned aircraft Systems (UAS) Operators," 2014.
[16] NATO, "STANAG 4586, Standard interfaces of UAV Control System (UCS) for NATO UAV Interoperability," 2012.
[17] JAA and EUROCONTROL, "UAV TASK-FORCE Final Report," 2004.
[18] EASA, "E.Y013-01, Airworthiness Certification of Unmanned Aircraft Systems (UAS)," 2009.

[19] K. Dalamagkidis, K. Valavanis, and L. Piegl, "Evaluating the risk of unmanned aircraft ground impacts," *2008 Mediterranean Conference on Control and Automation - Conference Proceedings, MED'08*, pp. 709–716, 2008.

[20] R. Clothier, J. L. Palmer, R. Walker, and N. Fulton, "Definition of Airworthiness Categories for Civil Unmanned Aircraft Systems (UAS)," in *Proceedings of The 27th International Congress of the Aeronautical Sciences*, pp. 1–12, 2010.

[21] R. Melnyk, D. Schrage, V. Volovoi, and H. Jimenez, "A third-party casualty risk model for unmanned aircraft system operations," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 124, pp. 105–116, 2014.

[22] C. Cuerno-Rejado and R. Martínez-Val, "Unmanned Aircraft Systems in the Civil Airworthiness Regulatory System: A Case Study," *Journal of Aircraft*, vol. 48, no. 4, pp. 1351–1359, Jul. 2011.

[23] INOUI, "Executive Summary of Work Package 5, SAFETY ANALYSIS FOR CIVIL UAS APPLICATIONS," 2010.

[24] X. Yu and Y. Zhang, "Sense and avoid technologies with applications to unmanned aircraft systems: Review and prospects," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 74, pp. 152–166, Apr. 2015.

[25] R. Clothier and R. Walker, "Safety Risk Management of Unmanned Aircraft Systems," *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 2229–2275, 2015.

[26] CAA (UK), "CAP 722, Unmanned Aircraft System Operations in UK Airspace - Guidance," 2015.

[27] L. Purton, R. Clothier, and K. Kourousis, "Assessment of Technical Airworthiness in Military Aviation: Implementation and Further Advancement of the Bow-tie Model," *Procedia Engineering*, vol. 80, pp. 529–544, 2014.

[28] EUROCONTROL, "EEC Note No. 01/04 - Volume I, Review of techniques to support the EATMP Safety Assesssment Methodology," Bruxelles, 2004.

D.M.S. "Device Management System" - Sistema para el control de maquinaria, costes y recursos.

Díaz Bande, Raúl [1,*], Porta Rodriguez, Manuel [2]

[1] Arquitecto Técnico E.U.A.T. Coruña; Piloto RPA. Email: rdbande@gmail.com (RDB)

[2] Profesor Departamento de Construcciónes Arquitectónicas – Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica Coruña; Email: m.porta@udc.es (MPR),

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: rdbande@gmail.com (RDB);

Abstract:

El presente proyecto presenta un sistema que posibilita la gestión de los recursos de obra en tiempo real, mediante la utilización de dispositivos móviles, obteniendo un control de costes ágil, sencillo y eficiente. El coste de alquiler de medios auxiliares, materiales y equipos es una parte muy significativa del presupuesto de las obras, ya sean civiles o militares, e influye notablemente en los resultados económicos de las mismas.

El sistema se basa en la identificación de cada útil con un código QR o una etiqueta NFC, fácilmente legible utilizando un Smartphone o tablet. La aplicación permite la creación y consulta de bases de datos que posibilita la comunicación de doble sentido, en donde los registros pueden ser enviados o modificados desde la obra o la oficina. Los archivos con los datos se actualizan y son accesibles en tiempo real, optimizando de esta manera la gestión de dichos útiles. El sistema permite el geoposicionamiento desde medios aéreos, a través del montaje del dispositivo en un Drone o RPA que lee los códigos QR y envía las coordenadas de la posición de la maquinaria.



Keywords: RPA; UAV; Drone; QR; NFC

1. Introducción

De sobra es conocida la importancia del coste de alquiler de medios auxiliares y maquinaria en la construcción, es una parte muy significativa del presupuesto e influye notablemente en los resultados económicos de la obra, tanto en las de gran entidad como en las de pequeño tamaño.

Este tipo de gestión se lleva a cabo actualmente por parte de los Directores de ejecución, jefes de obra y administrativos de la empresa, mediante un método tradicional y manual que muchas veces no es efectivo, suponiendo un trabajo farragoso y duro.

Debido a la importancia del control de dichos recursos, en este proyecto se ha desarrollado una sencilla herramienta que facilita la labor de gestión de los mismos y de los medios auxiliares, para de este modo poder optimizar su uso y mejorar los resultados económicos finales de las obras de construcción.

En la construcción existe, independientemente del tamaño de la obra, un cierto descontrol en torno a los medios auxiliares, la pequeña maquinaria y los alquileres de útiles. Es muy frecuente que existan, inmovilizados y sin uso, herramientas alquiladas, andamios, puntales, maquinaria de uso puntual… Estos útiles están generando costes de alquiler y no están siendo rentabilizados.

El responsable de la obra, en ocasiones, no tiene constancia de quién realizó el alquiler de un determinado material y a qué empresa, su coste por día, fecha de devolución, contrata a la que se le imputa su uso, etc.

El sistema y la aplicación D.M.S. (Device Management System) facilita notablemente esta tarea, permitiendo consultar, de manera sencilla, los datos del alquiler de cada útil, su coste, su propietario, su capítulo o partida de imputación, la fecha asignada de devolución de dicho material, su responsable, etc.

2. Funcionamiento y forma de trabajo de la aplicación.

Este sistema se basa en una organización y catalogación simple y ordenada de los medios que debemos gestionar.

Permite el control de la maquinaria de obra en tiempo real, mediante la integración y uso conjunto de diversas aplicaciones tecnológicas obteniendo, según estimaciones, un ahorro de en torno al 15% en los gastos de alquiler y uso de estos medios auxiliares.

El sistema se basa en la identificación de cada útil con un código QR o una etiqueta NFC, fácilmente legibles con cualquier smartphone, tablet u ordenador portátil. Una vez leído este código, la aplicación interpreta los registros y permite la creación y consulta de una base de datos, en la que se almacena toda la información relativa a alquiler, coste, imputación, etc. y a la que se accede mediante una página asignada a cada útil en la aplicación web.

Los identificadores pueden estar ya impresos y programados con un código asignado. De este modo, cuando sea necesario registrar con un código un determinado elemento, sólo es necesario asignar esta numeración a la herramienta en concreto. Así, al escanear el código en obra o leer la etiqueta, automáticamente se accede la página de datos correspondiente a ese útil.

En esta página de introducción de datos, el responsable de obra o del material podrá introducir o consultar los parámetros de control de cada útil, referentes a sus condiciones de alquiler, tiempos, asignación, costes, responsables, mantenimiento, controles frecuentes, etc.

Los datos recopilados por el programa son almacenados en bases de datos, que se podrán convertir y leer utilizando los programas convencionales de gestión de presupuestos. La comunicación con estas bases de datos es de doble sentido. Es decir, los datos pueden ser consultados, pero también pueden ser enviados o modificados desde obra, llegando en tiempo real a la oficina y creando así un sistema de control y gestión óptimo de los recursos.

El sistema de control puede usarse de forma presencial, mediante la lectura con un smartphone o tablet por parte del responsable de material de los códigos QR o las etiquetas NFC, o de manera remota, instalando el sistema en medios aéreos, Drones o RPAs, y la identificación automática de los códigos QR con estos aparatos.

Con esta implementación obtenemos una ventaja importante en el control de obras lineales u obras de gran envergadura, facilitándonos la posición GPS en tiempo real de la maquinaria en uso.

3. Aplicación móvil de toma de datos y sistema de control.

Una vez leído el código QR o la etiqueta NFC con el dispositivo móvil, automáticamente se abre la aplicación móvil, que consta de diversas funciones y apartados que nos permiten tanto recoger como leer información sobre el útil o maquinaria a controlar.

Esta aplicación funciona en cualquier tipo de dispositivo, smartphone, tablet, pda, notebook, PC, etc.

3.1 Esquemas organizativos de la aplicación.

Presentamos a continuación los diagramas explicativos del proceso de toma de datos y control, el esquema organizativo de la aplicación móvil para toma y lectura de datos, el diseño de desarrollo y relaciones entre apartados y fases del proceso de control.

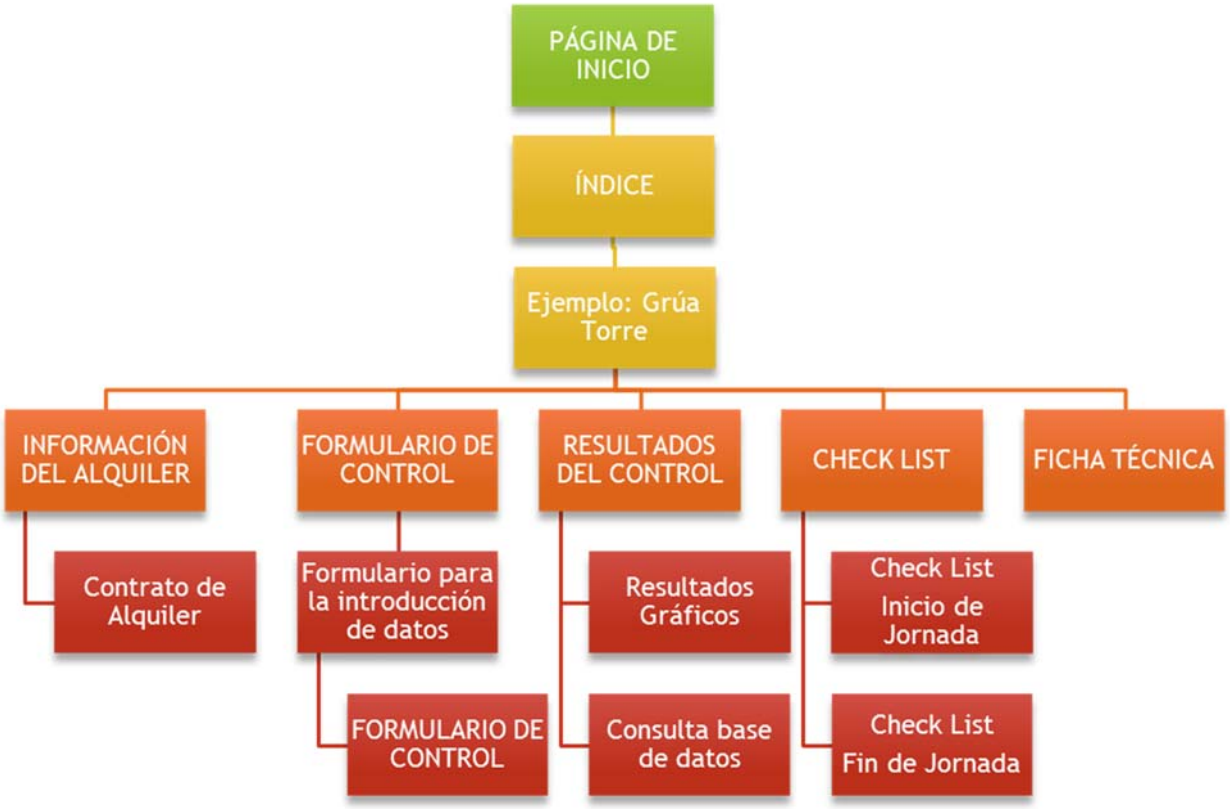




Figura 1. Esquema de desarrollo de la aplicación móvil y apartados del formulario de control.

3.2 Descripción de la aplicación y apartados.

3.2.1. Página de Inicio

En esta primera pantalla, la aplicación nos muestra una página en donde se explican paso a paso los apartados del programa y las instrucciones e indicaciones de uso de cada apartado.

Es una vista general de la aplicación y sus funciones principales:

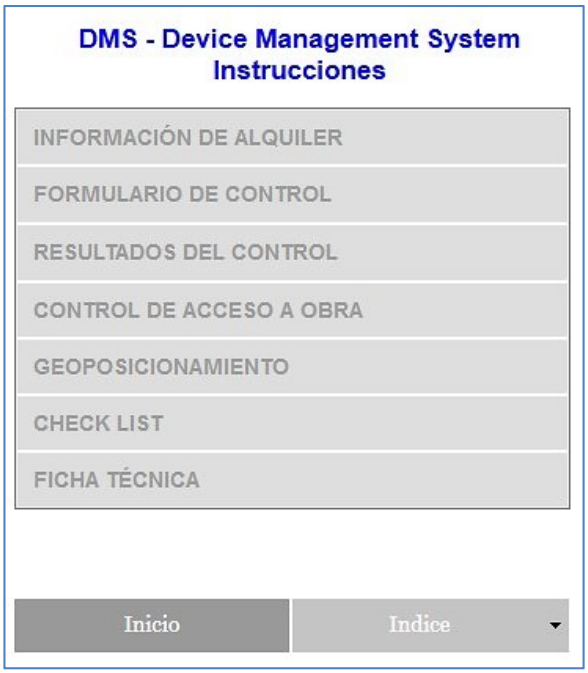


Figura 2. Página inicial de la aplicación.

3.2.2. Información de alquiler

En el apartado de información de alquiler se mostrará toda la información relativa al contrato de alquiler del útil seleccionado, coste del alquiler, empresa arrendataria, etc. También se podrá visualizar,

clicando en el botón final, un archivo PDF del contrato de alquiler, para consultar toda la información referida a este contrato y sus condiciones, fechas, costes, etc.

3.2.3. Formulario de control.

En este apartado, uno de los más importantes de la aplicación, se encuentra un enlace que nos redirige a un formulario de control, el cual nos permite asignar los datos y variables desde obra, a cada útil.

Podremos asignar número de obra, contratas, partidas, inicio y fin de la asignación, responsable del útil, notas, etc.

De este modo, se recopilan los datos en obra, que son automáticamente registrados en la base de datos para el cálculo de costes, asignación de contratas, capítulos y partidas.

3.2.3.1. Descripción del Formulario de control.

Permite recopilar datos en obra, que son automáticamente enviados a la base de datos en la que se basa el funcionamiento de todo el sistema.

Este formulario es totalmente personalizable para adecuarlo a las características de cada útil o a los datos que deseemos recopilar en obra de cada herramienta o máquina.

En él es posible añadir campos, listas desplegables, casillas de verificación muy útiles para crear listados o protocolos de comprobación o mantenimiento de cualquier maquinaria, haciendo de este modo una check list, de todos los puntos o apartados que necesitan ser comprobados.

Por ejemplo, facilitaría la ejecución de todas las comprobaciones necesarias que debe llevar a cabo el operador de grúa torre antes de empezar la jornada de trabajo, quedando así registrados los puntos que han sido revisados y el responsable de dicha revisión.

Apartados:

El formulario básico consta de varios apartados de toma de datos, los cuales serán comunes y genéricos para todos los útiles a controlar.

En él indicaremos:

- El número de OBRA o la obra a la que está asignado el útil.
- La CONTRATA a la que se asigna el útil, a la que se imputarán los costes del uso de esta maquinaria
- El CAPÍTULO de asignación del útil.
- La FECHA y HORA de INICIO de asignación a dicha contrata.
- La fecha y HORA de FINALIZACIÓN de los trabajos para esa contrata.
- El responsable del útil o de la maquinaria asignada.
- Un apartado de notas, en las que se puede registrar cualquier anotación pertinente.

Algunos de estos campos son obligatorios para cumplimentar y enviar los datos del formulario, el número de obra, la contrata, el capítulo y las fechas de inicio y finalización.

El responsable del útil o el apartado de notas son opcionales y los datos pueden ser enviados sin cumplimentar estos apartados.

Al final del formulario de control y antes de enviar los registros a la base de datos, el formulario nos da una última opción, la orden de devolución o baja del material o útil alquilado, mediante una casilla de verificación.

Una vez cumplimentados todos los apartados, enviamos el formulario para que los datos queden registrados.

Cuando los datos han sido enviados, la aplicación nos confirma el envío y la recepción, y nos da la opción de modificar las respuestas enviadas.

3.2.4. Resultados del control.

En este apartado podremos consultar los resultados del control de maquinaria efectuado, pudiendo acceder desde obra a la base de datos con todos los registros de actividad que han sido almacenados en ella.

Esta base de datos se almacena en formato Excel, pudiendo así utilizar filtros que facilitan la agrupación por campos y la consulta o agrupación de datos por obra, fecha, contrata, etc.

Otra forma rápida de consultar los resultados del control y la toma de datos llevada a cabo en obra es examinando las hojas de resultados que genera el propio formulario.

Dichas hojas muestran, mediante gráficos, los resultados de la toma de datos.

3.2.5. Control de acceso a obra.

En este apartado de la aplicación se implementa el sistema de control de acceso a obra, también mediante códigos QR o tarjetas NFC.

Se adjudica a cada operario o persona que acceda a la obra un código QR o tarjeta NFC con sus datos personales. Este código QR puede ir tanto en el uniforme, mono de trabajo, en los EPIs (por ejemplo en el casco), o también en forma de tarjeta de acceso o carnet personal identificativo.

De este modo, colocando una cámara o lector NFC en la entrada o el acceso a obra, ésta registraría, todos los “códigos” que acceden a la obra, quedando reflejado el día y la hora de entrada y salida.

3.2.6. Listas de comprobación frecuente o check list.

En la normativa de uso de cierta maquinaria es habitual que se obligue a realizar tareas de revisión frecuentes y periódicas, que deben quedar registradas. En este registro han de aparecer todas las tareas o comprobaciones efectuadas, así como el responsable de éstas y la fecha y hora en la que se han llevado a cabo.

3.2.7. Ficha técnica, manual de instrucciones o manual de mantenimiento.

Apartado de la aplicación que nos da información sobre la ficha técnica, el manual de instrucciones o el manual de mantenimiento de la maquinaria o útil.

En esta pestaña se encuentran unos botones con enlaces que nos redirigen a archivos en PDF, los cuales nos muestran la ficha técnica del útil de trabajo o su manual de instrucciones.

Pinchando en el botón correspondiente, aparecerán en pantalla dicho documento.

3.2.8. Seguridad y permisos para el acceso a la aplicación.

La aplicación cuenta con un sistema de seguridad que impide que cualquier persona acceda a los datos restringidos.

Para poder acceder a los documentos de la aplicación es necesario tener una cuenta y estar autorizado. De este modo, se restringe el acceso, dando permisos a los diferentes apartados del programa, así como a las bases de datos y documentos asociados.

Esta opción es muy útil para poder, desde la oficina, dar permisos de acceso a las diferentes personas según su cargo o función en la obra.

También quedará constancia y registro de quién es la persona que introduce los datos, para poder asignar responsabilidades sobre los elementos del control.

4. Geoposicionamiento de maquinaria y útiles. Drones, Rpas.

Gracias a la versatilidad del sistema, existe la posibilidad de su montaje y varias funciones de la aplicación en un medio aéreo, "Drone" o RPA que, contando con un sistema de navegación GPS, puede registrar y enviar en tiempo real la posición de maquinaria.

4.1 Funcionamiento del sistema en medios aéreos.

El sistema y la aplicación permiten su montaje y uso desde un RPA (siglas en inglés de Remotely Piloted Aircraft) o UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Este uso permite la geolocalización o geoposicionamiento de maquinaria en tiempo real, de una manera total o parcialmente autónoma.

La metodología a usar es la siguiente, basada en una serie de principios básicos:

- En un lugar visible desde la altura a la que se planifique el vuelo, se coloca sobre la maquinaria un código QR, que contiene su número de identificación.
- El RPA, dotado con un sistema de navegación y estabilización con GPS, sobrevuela la zona acotada o indicada previamente.
- Como sistema identificativo, carga o Payload, se coloca en el aparato una cámara de grabación HD, autoestabilizada, que graba todo el recorrido del aparato o el área de vuelo planificada.
- En cuanto la cámara capta un código QR, fija la posición de este código, recopilando los datos del GPS, así como la fecha y hora en la que ha leído el código QR.

5. Informes generados.

Aparte del propio control organizativo de materiales, en la construcción es de vital importancia la imputación de costes en el presupuesto de obra, refiriéndonos tanto a la adjudicación de los útiles a su correspondiente obra y capítulo del presupuesto, como a la imputación de estos costes de medios auxiliares y maquinaria a las diversas subcontratas.

La ventaja de este sistema es que permite adjudicar, rápidamente y desde obra, cada uno de los útiles o máquinas, tanto a una obra, a una contrata o a un capítulo determinado. Estos datos quedan registrados en la base de datos creada con la que es posible trabajar fácilmente y crear todo tipo de informes según las necesidades concretas de cada obra o momento.

Como ejemplo, se han generado varios modelos de informe de uso. En ellos, están ordenados los datos mostrando todos los registros generales y un apartado diferente para cada campo de ordenación.

- Informe de uso y asignación por OBRA
- Informe de uso y asignación por CONTRATA
- Informe de uso y asignación por CAPÍTULO del presupuesto

Estos informes pueden modificarse según las necesidades requeridas para cada uso o situación.

6. Conclusiones

Con el uso del sistema D.M.S. es posible cubrir varios aspectos necesarios en la construcción:

- La creación de una base de datos que recoja todos los útiles, maquinaria y medios auxiliares de la obra y que permita su fácil identificación, seguimiento, control y mantenimiento.
- La optimización de costes y rendimiento de dicha maquinaria, evitando que los recursos estén inmovilizados.
- La imputación en tiempo real de costes y recursos a obras, contratas y capítulos del presupuesto, mediante la elaboración de informes que podrán ser exportados a formato BDC.
- El geoposicionamiento en tiempo real de maquinaria en obras de gran envergadura y obras lineales.
- El control de acceso a obra, que facilita las funciones del Coordinador de seguridad y salud.

Bibliografía

1. Barber Lloret, Pedro. *Maquinaria de obras públicas I.* 2ª Edición. Alicante: Editorial Club Universitario, 2003. ISBN: 84-8454-195-9

2. Brynjolfsson, Erik and Mcafee, Andrew. *The second machine age – Work, progress and prosperity in a time of brilliant thecnologies.* 1ª edición. New York, London, 2014. W. W. Norton & Company. ISBN 978-0-393-24125-9 (e-book)

3. Díaz Martín, Ángel. *El arte de dirigir proyectos.* 3ª edición. Madrid: Ediciones RA-MA, 2010. ISBN: 978-84-9964-016-7

4. Wilson, Richard. *Manual del control de costes.* 1ª edición. Bilbao: Ediciones Deusto S.A., 1992. ISBN: 84-234-0700-4

L.V.D. – Light Versatile Drone. SISTEMA DE RECONOCIMIENTO AÉREO PORTÁTIL MEDIANTE UAVs

Díaz Bande, Raúl 1,*, Porta Rodriguez, Manuel 2

[1] Arquitecto Técnico E.U.A.T. Coruña; Piloto RPA. Email: rdbande@gmail.com (RDB)
[2] Profesor Departamento de Construccións Arquitectónicas – Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica Coruña; Emails: m.porta@udc.es (MPR),

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: rdbande@gmail.com (RDB);

Abstract:

El sistema L.V.D. (Light Versatile Drone) pretende dotar a cualquier equipo humano, sin necesidad de preparación previa, de un punto de vista aéreo de la zona en la que deben actuar, evitando poner en situaciones de riesgo a las personas y facilitando una rápida inspección del terreno; todo ello con un muy bajo coste, lo que lo hace prácticamente desechable. Se basa en la creación de una plataforma aérea UAV (Drone), que sirve de soporte a varios sistemas de toma de datos. El diseño del UAV se adapta a cualquier tipo de uso y aparato de medición. La idea principal del proyecto es el bajo coste, la portabilidad, la versatilidad y la adaptabilidad a cualquier tipo de requerimiento. Gracias a sus dimensiones, se puede transportar todo el equipo en un maletín portátil. Durante el vuelo, el Drone envía la señal de vídeo a nuestro monitor, en el que se puede visualizar o grabar. Su uso está destinado a cualquier servicio de emergencias, de rescate, extinción o control de incendios, cuerpo de seguridad o unidad militar. Proporciona un reconocimiento aéreo de grandes áreas y permite la inspección de zonas inaccesibles o peligrosas, ruinas, acantilados, grandes pendientes en zonas de montaña, áreas de costa…



Keywords: RPA; UAV; FPV; Drone.

1. Introducción

En el presente proyecto se pretende crear un sistema de toma de datos y reconocimiento aéreo, basado en la creación de una plataforma aérea versátil, multifunción, desechable y de fácil manejo, que sirva de soporte a varios sistemas de medición y de toma de datos.

Este proyecto nace a raíz del desarrollo del sistema D.M.S. - Sistema para el control de maquinaria costes y recursos de obra, en el que una parte del control se realiza mediante UAV (trabajo de Fin de Grado Arquitectura Técnica presentado por Raúl Díaz Bande) [1]

La idea principal del proyecto es el bajo coste, la versatilidad y adaptabilidad del sistema a cualquier tipo de requerimiento. Para ello se crea un RPA (Remotely Piloted Aircraft) o Drone que sirve de soporte a los sistemas de medición. Esta plataforma aérea nos proporciona un punto de vista privilegiado sobre cualquier terreno, objeto o estructura. Nos permite situar nuestros ojos o aparatos de medición a un máximo de 120 metros de altura (altura limitada por la legislación vigente), pudiendo realizar inspecciones o tomar imágenes con nuestros sensores, de cualquier tipo de estructura o entorno, sin poner en riesgo vidas humanas y permitiéndonos así llegar “con nuestros ojos” a zonas inaccesibles o remotas.

El diseño de este RPA o UAV se adapta a cualquier tipo de uso y aparato de medición, dándonos gran flexibilidad en su uso y proporcionándonos una plataforma autoestable para la sustentación de equipos de recopilación de datos o toma de imágenes.

2. Objetivos

El objetivo del sistema es dotar a los equipos de emergencias de una herramienta útil y versátil, que permita tomar datos sobre el terreno y evaluar situaciones, sin poner en riesgo vidas humanas, y partiendo de cuatro premisas básicas: el bajo coste, la facilidad en el manejo, la adaptabilidad y la portabilidad.

Actualmente se están empezando a utilizar, por parte de algunos servicios de emergencia, la administración y fuerzas del estado, este tipo de aparatos para el control y la asistencia en todo tipo de situaciones de riesgo y emergencias, como pueden ser la alerta temprana, detección y control de incendios, vigilancia en grandes áreas, etc. Sin embargo, estos equipos son costosos, muy delicados y difíciles de manejar, lo que limita mucho su uso y disponibilidad. Recientemente la Xunta de Galicia ha adquirido dos RPA para control de incendios por un valor de 60.000€.

La miniaturización de los sensores nos permite obtener prácticamente las mismas prestaciones con equipos de pequeño tamaño y bajo coste, que pueden ser adquiridos en gran número y dotar así a varias unidades de actuación de una herramienta útil que permita una rápida respuesta en caso de necesidad, sin que sea preciso esperar a que el equipo llegue a la zona de emergencia desde otro punto del territorio. Asimismo, la sencillez de su utilización permitirá que se realice una instrucción breve para formar a los operadores.

3. Funcionamiento y usos

El uso principal del sistema es la toma y transmisión de imágenes en tiempo real a la estación de tierra. Esta señal de vídeo o imágenes puede usarse para la localización de objetivos, inspección de grandes áreas o zonas de difícil acceso, evaluación rápida de zonas de actuación, etc.

La legislación vigente en España, considera estos aparatos como aeronaves "cualquier máquina pilotada por control remoto que pueda sustentarse en la atmósfera por reacciones del aire que no sean las reacciones del mismo contra la superficie de la tierra" [2] exige estar dado de alta como operador y limita las zonas de actuación y uso de estas aeronaves, pero existe una excepción "situaciones de grave riesgo, catástrofe o calamidad pública, así como para la protección y socorro de personas y bienes en los casos en que dichas situaciones se produzcan, cuando les sea requerido por las autoridades responsables de la gestión de dichas situaciones" [3].

El funcionamiento del sistema es sencillo. Cualquier usuario, al que previamente se le han dado unas instrucciones básicas, estará preparado para el pilotaje del UAV como operador. Únicamente debe encender la emisora, la estación de tierra y conectar el Drone para iniciar el vuelo.

La estación de tierra o GSC (Ground Station Control) está formada por un receptor de vídeo y datos en 5.8ghz, que se puede conectar a un monitor o a un ordenador portátil. En esta estación tendremos accesibles tanto los datos de vuelo proporcionados por el sistema OSD (On Screen Display), como son distancia, altitud, coordenadas GPS, estado de la batería, consumos, modo de vuelo, horizonte artificial, calidad de la señal,… como los datos de los sensores y la imagen de vídeo que capta la aeronave y son transmitidos en tiempo real a la emisora, en la que se puede visualizar o grabar.

El recorrido o ruta del aparato puede estar preprogramado en tierra, marcando puntos GPS o waypoints; o bien el operador puede dirigirlo a su gusto, pilotando mediante la emisora.

Después de realizar la inspección o trabajo, el operador puede dirigir el Drone al punto donde despegó u, opcionalmente, puede programarse la función "return home" (vuelta a casa automática) con la que la aeronave volverá y aterrizará automáticamente en el punto exacto de despegue, sin necesidad de pilotaje por parte del operador de vuelo.

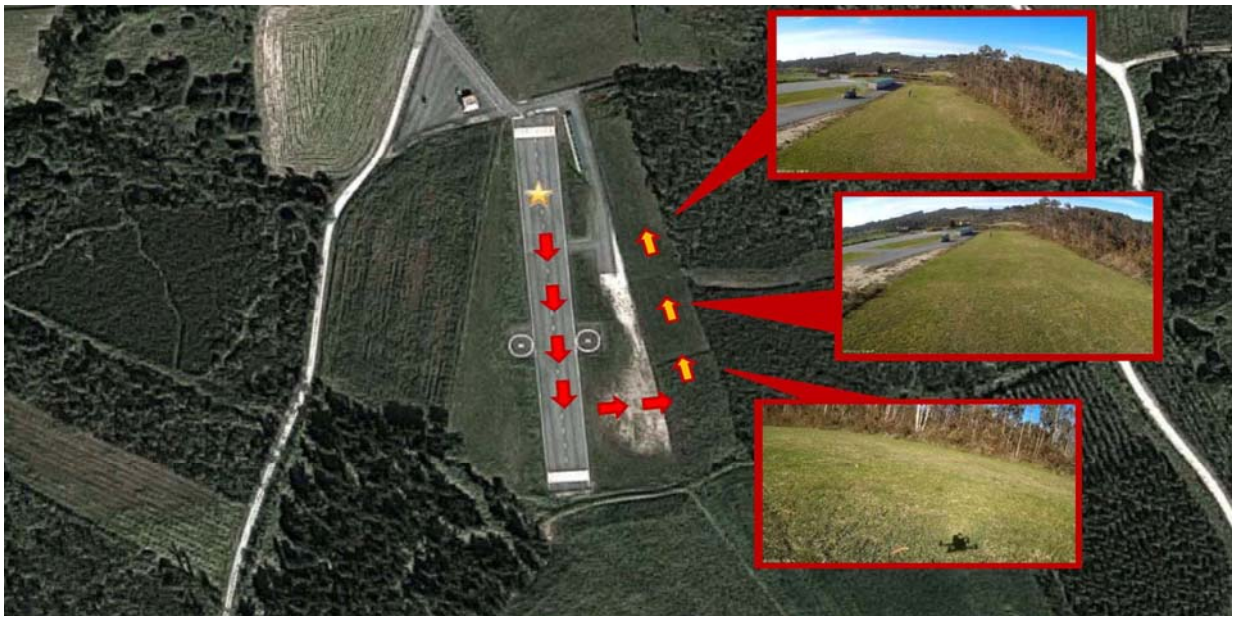


Figura 2. Imágenes captadas en vuelo programado

4. Características y descripción del equipo

4.1. Aeronave:

El equipo básico está formado por un chasis o “frame” impreso en PLA, con brazos plegables, sobre el que se monta toda la electrónica de la aeronave. Está dotado de un sistema de aislamiento anti vibraciones. La “zona sucia”, en la que se sitúan los motores y los variadores, está aislada mediante “silent blocks” o bloques aislantes, de la zona limpia, en la que se ubican la controladora, cámaras, sensores y aparatos de medición.

La estructura del multirrotor conforma un cuadricóptero de 250 milímetros de tamaño entre ejes, que consta de cuatro motores, los cuales proporcionan la sustentación del equipo, una controladora, que regula las funciones y estabiliza el multirrotor, un receptor PPM en 2.4ghz de ocho canales, un sistema de transmisión de vídeo en 5.8ghz, una microcámara de 700tvl y una batería de polímero de litio de tres celdas de 1500mah y mínimo 30c de descarga, que le proporciona una autonomía de vuelo de 12 minutos.

4.2. Estación de tierra GSC (Ground Station Control):

La estación de tierra se compone de dos elementos básicos: un equipo emisor RC y un equipo receptor de vídeo.

Para poder operar la aeronave es necesario un transmisor o emisora RC programable de, al menos, seis canales que emita en la frecuencia de 2.4ghz, que puede alcanzar en terreno abierto entre uno y dos kilómetros de distancia de emisión. Esta emisora, en caso de pérdida del aparato, es reutilizable y se puede programar para controlar otra unidad.

El receptor de vídeo a utilizar trabaja en la frecuencia de 5.8ghz y se conecta a un monitor portátil para visualizar la imagen transmitida por la aeronave.

El pequeño tamaño y bajo peso del aparato es una ventaja a la hora de su uso y transporte. En orden de vuelo, el RPA tiene un peso aproximado de 450 gramos y tiene una capacidad de carga (Payload) de 300 gramos.

El software del equipo básico, que gestiona tanto la aeronave como la estación de tierra, es de Código Abierto.



Figura 1. Ejemplo de frame impreso con PLA

4.3. Opciones de configuración.

Las posibilidades de los UAV son prácticamente ilimitadas. Partimos de un modelo básico, antes descrito, pero existe la posibilidad de ajustar la configuración con todo tipo de mejoras y accesorios, adaptándolo a las necesidades concretas de cada aparato para las distintas situaciones específicas. Dichas posibilidades se detallan a continuación.

Inutilización remota del aparato (Autodestrucción): si el aparato se pierde o no es necesario su vuelta al punto de despegue, existe la posibilidad de ordenar remotamente, desde la emisora, la inutilización de todo el equipo electrónico.

Autopiloto GPS: Con un pequeño incremento de coste se puede dotar al aparato de un sistema de Autopiloto GPS, que permite la programación de rutas, la "vuelta a casa" automática y el posicionamiento continuo en vuelo.

Cámara infrarroja o Full HD: Cualquier tipo de micro-cámara u óptica se puede montar en esta plataforma, que nos enviará las imágenes captadas a la estación de tierra, mediante un sistema de transmisión de vídeo en 5.8ghz.

OSD (On Screen Display): Sistema que nos muestra información en pantalla sobre la posición del aparato, distancia, altura, carga de batería, velocidad, dirección, horizonte artificial, etc.

Sensores: Cualquier tipo de sensor puede ser integrado en el multirrotor. Éstos, mediante telemetría, pueden enviarnos diversos tipos de información a nuestra estación base, por ejemplo, micrófono, sensores de CO2, sensores de temperatura, etc.

Módulo Bluetooth: Módulo de comunicación y programación de la placa controladora, permite la comunicación inalámbrica entre el aparato y la estación de control o con cualquier dispositivo móvil (PC, Tablet, Smartphone).

FPV (First Person View): estas gafas de realidad virtual nos permiten obtener la sensación de pilotaje desde el aparato. A través de la imagen proporcionada por una videocámara situada en el Drone, de muy reducidas dimensiones y peso pero con la potencia suficiente para alcanzar distancias importantes, se consigue que el punto de vista del operador de vuelo sea el mismo que si estuviese pilotándolo físicamente. Además, el FPV permite al usuario volar fuera de su alcance visual.

Head tracker: Sistema que, conectado a las gafas de realidad virtual, permite modificar la orientación de la cámara con el movimiento de la cabeza. Mediante el uso de sensores internos, la cámara enfoca en la dirección hacia la que orienta la cabeza el operador.

Ground Station Control (Estación de control en tierra): dependiendo del tipo de controladora instalada en el aparato se podrá operar y recopilar datos desde una aplicación GSC, con la que monitorizaremos

todos los parámetros del vuelo (coordenadas GPS del aparato, altitud, dirección, distancia al punto de despegue, horizonte artificial, consumo de los motores, estado de la batería, calidad de la señal del emisor, lecturas de los sensores, etc.)



Figura 3. Ejemplos de sensores y componentes.

5. Ventajas del sistema

Adaptabilidad - Es un diseño configurable para cualquier necesidad, y puede soportar como Payload o "carga de pago" multitud de sensores, dependiendo de las necesidades requeridas. La estructura base del aparato o "frame" puede ser impreso con impresora 3D en PLA, un tipo de material plástico biodegradable, derivado del maíz y por tanto ecológico; con partes fácilmente reemplazables e imprimibles independientemente.

Portabilidad. Todo el equipo cabe en un maletín de pequeñas dimensiones y escaso peso que facilita su transporte, lo que posibilita que se pueda llevar en el coche, en una moto, etc.

Sencillez en el manejo. Programación del aparato para que pueda ser operado por cualquier persona prácticamente sin conocimientos previos, solo con unas instrucciones básicas sobre el manejo.

Servicio de ajuste y configuración remoto. Conectando el equipo a cualquier ordenador con conexión a internet, se puede realizar la configuración y calibración del aparato de forma remota.

Su bajo coste, que lo convierte en prácticamente desechable nos permite tener muchas unidades distribuidas en distintos puntos geográficos o distribuidas entre varias unidades de actuación. El multirrotor básico no supera los 250€, lo que facilita la accesibilidad de cualquier equipo de rescate o de emergencias a este sistema y aumenta la efectividad y rapidez de actuación en caso de emergencia.

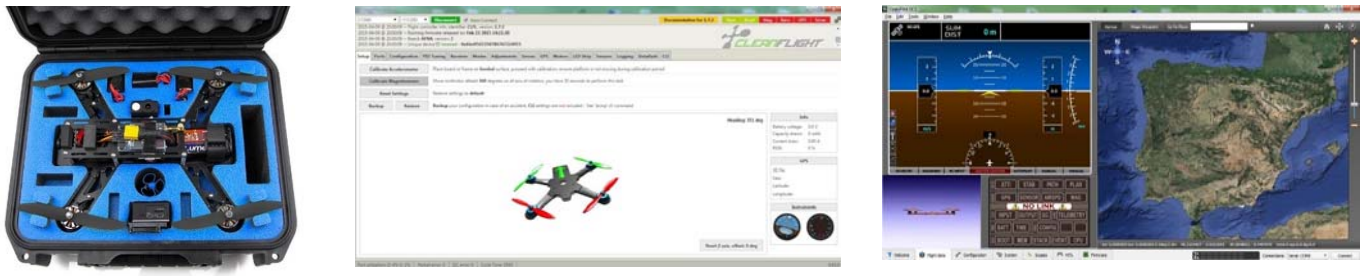


Figura 4. Ventajas del sistema.

6. Usos del sistema

Las posibles aplicaciones de este sistema son prácticamente ilimitadas, con la ventaja de su gran flexibilidad a la hora de adaptarse a nuevas utilidades y requerimientos, partiendo siempre de la premisa del ahorro económico y de la reducción del riesgo para los equipos humanos implicados.

Partimos del uso básico del equipo, que consiste en el reconocimiento de grandes áreas, mediante imagen convencional o infrarroja, con todas las utilidades que esto pueda aportarnos en las labores de ayuda en servicios de emergencia, extinción de incendios, catástrofes naturales, búsqueda de personas desaparecidas, rescate, etc. Permite la inspección de áreas inaccesibles o peligrosas, ruinas, acantilados, grandes pendientes en zonas de montaña, áreas de costa…

También es su posible su utilización para el control de equipos materiales, grandes estructuras, grupos de personas, control de accesos, control de tráfico, etc.



Figura 5. Usos del sistema.

7. Conclusiones

El sistema L.V.D. pretende dotar a cualquier equipo humano, sin necesidad de preparación previa, de un punto de vista aéreo de la zona en la que deben actuar, evitando poner en situaciones de riesgo a las personas y facilitando una rápida inspección del terreno, todo ello con un muy bajo coste.

El uso de este sistema facilita el trabajo de cualquier servicio de emergencias, de rescate, cuerpo de seguridad o unidad militar, ya que un solo operador de vuelo puede revisar y controlar grandes áreas de terreno o zonas inaccesibles sin poner en riesgo la seguridad de las personas y sin movilizar equipos grandes o costosos.

Referencias

1. Díaz Bande, Raúl. Proyecto Fin de Grado Arquitectura Técnica. *D.M.S. sistema para el control de maquinaria, constes y recursos*. Febrero 2015 E.U.A.T. Coruña.
2. BOE nº 252, Sección 7. Otras reformas en materia de navegación y seguridad aérea Artículo 51. Modificación de la Ley 48/1960, de 21 de julio, sobre Navegación Aérea. . En *Ley 18/2014, de 15 de octubre*. 17 de octubre de 2014.
3. BOE nº 252, Sección 6. Aeronaves civiles pilotadas por control remoto Artículo 50. Operación de aeronaves civiles pilotadas por control remoto. En *Ley 18/2014, de 15 de octubre*. 17 de octubre de 2014.

Sesión II-E

Sociedad, Economía y Humanidades

Técnicas de Ingeniería Sostenible para la gestión responsable de la cadena de suministro de los Centros de la Defensa.

Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier [1]*; Carreño Morales, Rafael María [2]; Fernández Martín, Álvaro [3]; Bellas Rivera, Roberto [4] y Barragáns Martínez, Belén [5]

[1] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. fjavierrodriguez@cud.uvigo.es
[2] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. rafael.carrenno@cud.uvigo.es
[3] Oficial de Puente y Meteorología, BAA "Castilla" L-52. aferm29@fn.mde.es
[4] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. rbellas@cud.uvigo.es
[5] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. belen@cud.uvigo.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo.

Abstract: La introducción de la variable sostenible en la línea de actuación de una organización se ha convertido en una estrategia necesaria. Así, la Sostenibilidad corporativa es una fuente clara de competitividad y progreso, aumenta el valor de marca y la diferenciación, facilita la fidelización de los empleados, puede garantizar un proyecto estable y, de cara a la sociedad, afianza la legitimidad para operar en su ámbito de actuación. De este modo, las políticas de transparencia de las organizaciones están moviéndose desde el Informe tradicional de Responsabilidad Corporativa hacia un modelo de Sostenibilidad bajo la dimensión económica, social y ambiental. Actualmente, la conducta anterior no puede limitarse exclusivamente a las operaciones propias si no que ha extenderse además a la cadena de suministro, pues la organización debe evaluar las acciones de sus proveedores. El Ministerio de Defensa no puede ser ajeno a este modo de actuación ejemplar; además, la cada vez más demandada transparencia de las Administraciones Públicas imprime un valor añadido de compromiso. La presente comunicación aborda, de modo introductorio, la temática de la gestión responsable de la cadena de suministro de los Centros de la Defensa, teniendo en cuenta sus factores peculiares condicionantes, y pretende aportar directrices de actuación que le permitan comunicar un comportamiento responsable y sostenible.

Keywords: Responsabilidad Social Corporativa, desarrollo sostenible, cadena de suministro, sostenibilidad, Ministerio de Defensa.

---

1. Antecedentes

Desde un punto de vista de decisión global se exige de las organizaciones la adopción de medidas encaminadas a la búsqueda de un equilibrio social, económico y ambiental que neutralice desequilibrios existentes y reduzca riesgos de inviabilidades futuras no reversibles y desigualdades actuales. Traducido a modelos de actuación empresarial, se demanda de éstas esfuerzos para introducir la variable sostenibilidad en su modelo de negocio para generar un valor social, económico y ambiental. Esta estrategia corporativa de gestión empresarial, ha de estar orientada evidentemente a la consecución de objetivos empresariales (valor económico) y ventajas competitivas. No obstante, la integración de la protección medioambiental y la equidad social se convierten también en necesidad para la supervivencia de la empresa en el tiempo, mayor cuanto más global sea la entidad, pues ésta continuará con las actuaciones logísticas en la medida en que los recursos no desaparezcan. Este modo de actuación conseguirá beneficios para sus grupos de interés, propiciará una buena imagen corporativa e inducirá una comunicación creíble, responsable y transparente del comportamiento sostenible.

Así, la gran dimensión y la potente dinámica de crecimiento de las principales organizaciones han inducido que éstas focalicen esfuerzos en integrar la sostenibilidad en todo su modelo de negocio y con esta estrategia han conseguido conocer, medir y reducir los impactos ambientales vinculados a *sus operaciones logísticas (aprovisionamiento, producción y distribución física).* En relación con la *cadena de suministro,* se tiende a la inclusión de criterios de evaluación y control medioambiental de proveedores. A modo de ejemplo, este comportamiento permite a una organización como Inditex ser miembro del *FTSE4Good.* Este índice bursátil de sostenibilidad incluye a las compañías mundiales con un mayor compromiso en el ámbito *de la responsabilidad corporativa.*

Además la inclusión de criterios sostenibles para participar en concursos europeos, reflejan la necesidad de aportar conocimientos técnicos a los futuros gestores para su adaptación a un entorno actual cambiante en esta dirección.

El **Ministerio de Defensa**, con unos intereses evidentemente distintos a los de una empresa convencional, comparte, sin embargo, la misma necesidad de introducir la variable sostenible en el modelo de actuación, pues posee el imperativo de presentarse como un ejemplo de responsabilidad dada su naturaleza de organización pública, conformando un sector con un elevado aporte a la sociedad. El Ministerio de Defensa ha sido el primer ministerio del Gobierno de España en publicar una Memoria de Responsabilidad Social (año 2009) y son notables sus actuaciones a nivel social y medioambiental. Sus misiones constitucionales son un notable exponente de una actuación ética en lo social. La *cadena de suministro* es un subsistema dentro del sistema organizativo del Ministerio que abarca la planificación de las actividades involucradas en la búsqueda, obtención y transformación de los productos. Esto incluye tanto una parte interna de la gestión de nuestros suministros como una parte externa de la obtención y distribución de éstos.

2. algunas estrategias sostenibles de los Ministerios de Defensa de nuestro entorno

2.1. OTAN

Existen no pocos aspectos en la política común OTAN relacionados con la sostenibilidad. En 1969 se crea el CCMS *(Comité on the Challenges to Modern Society),* un comité de la OTAN que defiende la

importancia vital de la misión medioambiental de las Fuerzas Armadas de la Organización y que se encarga de dar respuesta a las preocupaciones que éstas y otras cuestiones generan en la sociedad. Con relación a la Responsabilidad Social Corporativa, cabe destacar el esfuerzo que realiza la alianza en comunicar a la sociedad sus actuaciones por medio de la creación de cuentas corporativas en las principales redes sociales, con el fin de dar a conocer su actividad diaria sobre todo en un sector, el juvenil, más crítico a la hora de justificar la legitimidad de la OTAN en sus misiones a nivel global.

2.2. Estados Unidos

Resulta pues interesante citar la nueva Estrategia de Seguridad Nacional (NNS), comunicada por la Casa Blanca en febrero de 2015. El Departamento de Defensa emite anualmente el informe *"DoD Strategic Sustainability Performance Plan"* (SSPP), un plan estratégico, estipulado hasta 2020, para el desarrollo de conceptos sostenibles y políticas a alto nivel estratégico a través de todos los departamentos militares. Son buena muestra de ello el propio SSPP y la página web del Departamento de Defensa dedicada a la sostenibilidad, donde en lugar destacado se puede leer "*Investing in Energy Conservation Expected to Save Millions"*.

2.3. Reino Unido

Focaliza la atención en la cadena de suministro dentro de su estrategia sostenible. Con el fin de consolidar una férrea industria armamentística y de seguridad británica y de apoyar el progreso de las empresas que apuestan por la innovación, así como la posibilidad de lograr creación de empleos en estos sectores, se considera decisivo otorgar importancia apropiada a los impactos que las decisiones del Ministerio de Defensa pueden tener en la economía del Reino Unido en general y en la de estos sectores en particular. Se puede considerar las políticas de sostenibilidad del Ministerio de Defensa británico dentro de las más avanzadas de nuestro entorno.

2.4. Francia

Francia, con una de las Fuerzas Armadas más potentes de nuestro entorno y uno de los mayores presupuestos de Defensa, también cuenta con una desarrollada estrategia sostenible, recogida en la "***Strategie de Developpement Durable de la Defense***", conocida como **S3D**. Tras un arduo proceso de elaboración, en el que participan agentes externos e internos, en 2012 se formalizó la S3D existente, nacida para el período 2010-2013, mientras que la que corresponde al período actual es la S3D 2014-2017.

2.5. Medidas de actuación en la cadena de suministro de los centros de la defensa en España

- Plan de Contratación Pública Verde
- Ley de Contratos del Sector Público
- Códigos de conducta
- Normas PECAL

3. Recomendaciones de actuación: propuesta de posibles medidas a tener en cuenta para la gestión sostenible de la cadena de suministro de los centros de la defensa

Se indican a continuación una serie de actuaciones que en un futuro serían de interés analizar para determinar su posible viabilidad en la cadena de suministro de los Centros de la Defensa, desde el nivel más local (buques o acuartelamientos) hasta al estratégico, teniendo en cuenta que algunas de ellas ya se llevan a cabo en algunos casos puntuales, surgiendo la necesidad entonces de extenderlas a todo el ámbito de aplicación del Ministerio y sus proveedores.

3.1. Metodología de trabajo Red Española del Pacto Mundial de Naciones Unidas

La Red Española del Pacto Mundial de Naciones Unidas propone una guía responsable en la que desarrolla una metodología de trabajo, estructurada en cuatro fases con un total de diez medidas, a llevar a cabo sobre los proveedores según su factor potencial de riesgo.

3.1.1. Primera Fase: Diagnóstico

Con el objeto de mejorar el conocimiento de los miembros de la cadena de suministro, se definen unos requisitos mínimos que muestren el nivel de consonancia con los valores corporativos de la organización, mediante las siguientes herramientas:

a) **Cuestionario**: con preguntas de diversa naturaleza, que varían según el perfil de riesgo del proveedor, el sector al que pertenezca o su nivel de importancia sobre la cadena de suministro.

b) **Sistema externo de clasificación**: se plantea como una herramienta de gestión con el fin de facilitar la subcontratación de suministros sin poner en riesgo el valor corporativo de la organización, útil cuando se opera en varios países o en sectores de muy diversa naturaleza.

c) **Código de conducta**: con el objetivo de plantear de forma clara unos requisitos mínimos en la cadena de suministro, la organización debe elaborar un código de conducta interno basado en normas, certificaciones y legislaciones comúnmente aceptadas a nivel nacional e internacional, exigiendo no solo el conocimiento de este código por parte de sus proveedores sino también que sean parte activa de él.

3.1.2. Segunda Fase: Planificación conjunta e implantación de una estrategia

En base a los resultados obtenidos en la primera fase, todos aquellos aspectos negativos o susceptibles de mejorar han de ser tenidos en cuenta en una planificación conjunta de la organización y el proveedor, según las siguientes medidas:

a) **Comunicación fluida**: facilitar el seguimiento de los pedidos o hacer más ágil la relación organización-proveedor es fundamental a la hora de mejorar la gestión de la cadena de suministro. Formas de mejorar esta comunicación son el establecimiento de reuniones periódicas o la creación de un **portal del proveedor** en el que aunar todas las comunicaciones con los proveedores de una manera práctica, sencilla y rápida.

b) **Apoyo financiero al proveedor**: con el objeto de mejorar la marca corporativa dentro de la cadena de suministro, es interesante la posibilidad de apoyar económicamente a los proveedores que operan en países en vías de desarrollo para aumentar los sueldos mínimos de sus trabajadores, financiar programas

de mejora para asegurar un suministro a largo plazo o asegurar la producción de materias primas de calidad mediante la inyección de ayudas económicas.

c) **Formación por parte de la organización**: aprovechando los propios cursos de formación enfocados dentro de la propia organización, extenderlos a los proveedores es una manera de mejorar la relación con éstos y conseguir un incremento de su eficiencia económica y calidad en la producción.

3.1.3 Tercera Fase: Supervisión de la cadena de suministro

Para asegurar el éxito de la segunda fase es importante no limitar la mejora de los aspectos negativos detectados en la gestión responsable de nuestros proveedores a la planificación, sino mantener una supervisión constante para asegurar la implantación de las medidas acordadas de manera conjunta; si bien, es recomendable incluir esta supervisión en el contrato, de manera que se eviten posibles malentendidos entre ambas partes.

a) **Visitas a las plantas**: correlacionadas con un informe de evaluación, hay que tener en consideración que una mínima programación de estas visitas es suficiente para que el proveedor pueda subsanar de manera momentánea, previa a la visita, posibles irregularidades.

b) **Auditorías externas**: con la ventaja de que las principales empresas auditoras internacionales cuentan con personal local en las áreas donde principalmente residen los proveedores (como Asia) y, por lo tanto, pueden realizar visitas al proveedor auditado en cualquier momento, este sistema de control se constituye como una forma de mostrar la información de los resultados de manera estandarizada y concisa.

3.1.4 Cuarta Fase: Toma de decisiones en el desarrollo de las relaciones

Para finalizar, toda vez que la organización dispone de los criterios suficientes para determinar el grado de responsabilidad social alcanzado por sus proveedores, posee dos vías para desarrollar su relación futura con éstos:

a) **Incentivos**: caso de que el proveedor satisfaga los requerimientos de calidad de su producto y las exigencias de RSC estipuladas en el contrato, la organización puede incentivarlo de tres maneras distintas:

- **Apoyo económico** para favorecer la compra de maquinaria y aumentar las retribuciones de sus empleados, repercutiendo en la mejorar de la calidad de la producción.
- **Contrato a largo plazo** que le permita llevar una planificación prolongada en el tiempo con el fin de mejorar su proceso productivo.
- **Accesibilidad** a otros potenciales clientes, fruto de la mejora de su reputación al recibir buenas críticas por parte de la organización.

b) **Ruptura del contrato**: un proveedor que incumpla alguna de las clausulas sostenibles del contrato puede perjudicar a la imagen corporativa de la organización. Por lo tanto, ante este incumplimiento la organización tiene la posibilidad de aplicar una penalización, conceder un período de gracia o, como último recurso, rescindir el contrato con el proveedor.

3.2. Herramientas para promover la RSC en las Administraciones Públicas

Como parte de las AA.PP., el Ministerio de Defensa debe tener en cuenta los siguientes puntos que podrían formar parte de un futuro programa RSC del Gobierno de España, complementando la actual Estrategia Española de Responsabilidad Social Corporativa:

i. Obligación de realizar un informe anual de responsabilidad social para las AA.PP. más relevantes, siguiendo las pautas, convenientemente adaptadas, de los informes del GRI para las empresas.
ii. Incentivar la generalización de clasificaciones de ciudades, países, regiones, etc., en relación con los distintos temas de la RSC, como transparencia y buen gobierno. Todo ello con la finalidad de propiciar un proceso continuo de mejora en las prácticas de la responsabilidad social de las AA.PP.
iii. Recopilar y divulgar guías de buenas prácticas en responsabilidad social de las AA.PP. en Europa.
iv. Establecer un programa de la Unión Europea cuyo foco sea la innovación y el fomento de la responsabilidad social de las AA.PP. Con parecida ambición a lo que ha significado el Programa *Life* para los temas ambientales.
v. Crear una certificación de buena gobernanza pública que los dirigentes públicos tengan que poseer para acceder a puestos de responsabilidad del sector público.
vi. Sería conveniente estudiar la posibilidad de organizar una conferencia con carácter internacional que reúna a gobiernos, organizaciones, grupos de interés y expertos en RSC con el fin de plantear y analizar la necesidad de reflejar en la legislación el carácter obligatorio de todas aquellas políticas de sostenibilidad en lo social, ambiental y económico que sean de urgencia implementar por el actual estado de deterioro medioambiental, la situación financiera o la desigualdad.
vii. Establecer un sistema de asistencia en la incorporación de consideraciones ambientales en los pliegos de cláusulas administrativas particulares y de prescripciones técnicas, de manera destacada en los grupos de mantenimiento y obras, limpieza, mensajería e impresión de publicaciones.
viii. Elaboración y difusión de directrices en ámbitos como la organización de eventos sostenibles.
ix. Realización de actuaciones de concienciación y sensibilización del personal en materias relacionadas con el ahorro energético y de agua, gestión de residuos, etc. adicionales a los cursos de formación que se organizan periódicamente.
x. Mantener una ronda de contactos con los responsables de los distintos Departamentos con la finalidad de conocer las dificultades que hayan podido encontrar en la implantación de medidas sostenibles y el motivo por el que algunas de ellas no se han implantado todavía.
xi. Incorporar en la página web de la Plataforma de Contratación del Sector Público referencias a la Responsabilidad Social Corporativa, tal y como existe ya en las páginas web de muchas AA.PP., que informan del compromiso de éstas en materia ambiental, igualdad o I+D. En esta línea resaltar también de manera singular la legislación que fomenta la contratación pública sostenible, de forma que produzca un efecto de sensibilización sobre el contratante.
xii. Integrar en un solo órgano central todas las organizaciones públicas que actualmente velan por el desarrollo de actuaciones y políticas socialmente responsables (CERSE, Consejo de

Transparencia y Buen Gobierno, Consejos de RSE autonómicos, etc.), de manera que se lleve a cabo una labor lo más homogénea posible, ganando fluidez y consenso con otras organizaciones internacionales.

3.3. Otras medidas de interés

Como extracto de lo que se ha analizado en el presente trabajo relativo a actuaciones sostenibles en organizaciones y empresas de muy diversa índole, se proponen a continuación las siguientes posibles medidas. Hay que tener en cuenta, además, que la mejora en la sostenibilidad de la cadena de suministros de los Centros de la Defensa pasa por ser el propio Ministerio el que se constituya como un referente nacional en la implementación de la RSC a todos sus niveles, para, de esta manera, poder ser ejemplar a la hora de actuar de cara a la sociedad y poder exigir a sus proveedores.

i. Creación de unos **premios** con carácter anual que valoren el esfuerzo de los contratistas y proveedores de Defensa en materia RSC, revirtiendo en potenciación de marca para los galardonados y sirviendo de estímulo para el resto de empresas de cara a conseguirlo en siguientes ediciones. Los premios podrían estar dotados de cantidades económicas o de mejoras en los contratos (por ejemplo, prolongándolos).
ii. Otorgar **estatus especiales** a los proveedores que verifiquen actuaciones acordes a la Responsabilidad Social, en semejanza con la política llevada a cabo actualmente por *Starbucks Coffee Company* en su cadena de suministro.
iii. Aplicar de manera decidida las medidas propuestas en la Estrategia Española de Responsabilidad Social Corporativa, en especial las siguientes: **35, 36, 37, 38, 45, 46, 47, 48 y 49**. Además, se deberían de proponer posibles mejoras a las medidas en las que el Ministerio cuente con mayor implicación por su naturaleza, en base a la experiencia o contactos con Ministerios de Defensa de países de nuestro entorno.
iv. Potenciar las relaciones con administraciones locales y autonómicas en el intercambio bidireccional de las experiencias con pymes que destaquen por su RSC, de manera que tengan un acceso preferente, en la medida de lo posible, a los contratos locales de Defensa.
v. Divulgar el compromiso en materia RSC del Ministerio a todas las grandes empresas y pymes españolas, por medio de campañas publicitarias en estos ámbitos, conferencias, uso de internet (correos electrónicos), etc., para que el tejido empresarial adquiera conciencia de la importancia que tienen las políticas socialmente responsables en el Ministerio de Defensa.
vi. Valorar la implantación de las normas **ISO 14.000, ISO 9.000** e **ISO 26.000** por parte de los proveedores, así como otros sistemas de certificación y estandarización de reconocido prestigio.
vii. Realizar un informe que analice la gestión sostenible de la cadena de suministro de los Ministerios de Defensa de los países de nuestro entorno, proponiendo las medidas más adecuadas para la implantación en la cadena de suministro de los Centros de la Defensa.

Por tanto, el desarrollo del presente trabajo deja patente la importancia de las actuaciones responsables en el triple ámbito social, económico y medioambiental. En este sentido, la Responsabilidad Social Corporativa se erige como la herramienta que las organizaciones han de usar

para plasmar una estrategia en la que las políticas de sostenibilidad ocupen un puesto destacado. Las Administraciones Públicas han de tomar conciencia de la doble responsabilidad que tienen como órganos encargados de incentivar en las empresas el uso de las buenas prácticas, a la vez que la aplican a todos los niveles del estamento público. Respecto a la cadena de suministro, una sólida política de RSC revierte en una serie de beneficios cualitativos y cuantitativos aplicables también al Ministerio de Defensa, su cadena de suministro y su relación con las empresas con las que mantiene contratos:

- Mejora de la gestión interna, respondiendo a las exigencias de la sociedad en hitos como la transparencia;
- producción sostenible y rentable, proporcionando estabilidad financiera y un aumento de la productividad;
- cuidado de la imagen corporativa y la reputación, disminuyendo riesgos como las denuncias por malas prácticas;
- ventajas competitivas a los proveedores y contratistas más comprometidos, lo que incentiva la mejora de la motivación de los empleados y de sus condiciones de trabajo;
- además de la captación de inversores comprometidos con la sostenibilidad (Inversión Socialmente Responsable), decididos a realizar desembolsos económicos en I+D y en las organizaciones que destaquen por su gestión responsable.

Algunas Referencias

1. Álvaro Fernández Martín. *"Técnicas de Ingeniería Sostenible para la gestión responsable de la cadena de suministro de los Centros de la Defensa: Estrategias para la comunicación de una actuación responsable social-económica y ambiental"*. Trabajo Fin de Grado, Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar.
2. P. Puterman, «Foro Iberoamericano de la Responsabilidad Social.,» [En línea]. Available: http://blogforoiberoamericanors.blogspot.com.es/2010/03/la-responsabilidad-social-vs-el.html. [Último acceso: 13 Enero 2015].
3. Club de Excelencia en Sostenibilidad, "Una aproximación al estado de la RSE en la enseñanza en España.," 2010.
4. CaixaBank, «Caixabank. El aula del accionista.,» [En línea]. Available: http://www.caixabank.com/deployedfiles/caixabank/Estaticos/PDFs/AprendaConCaixaBank/aula774.pdf. [Último acceso: 19 Febrero 2015].
5. Stockholm International Peace Research Institute, 15 Abril 2013. [Online]. Available: www.sipri.org/media/pressreleasses/2013/pr_translations_13/milex-press-release-spanish. [Accessed 12 Febrero 2015].
6. NATO Parliamentary Assembly, [Online]. Available: www.nato-pa.int/Default.asp?SHORTCUT=2074. [Accessed 12 Febrero 2015].
7. United Nations, "United Nations. Framework Convention on Climate Change.," [Online]. Available: newsroom.unfccc.int/es/bienvenida/por-primera-vez-estados-unidos-califica-cambio-climatico-como-amenaza-mayor/. [Accessed 12 Febrero 2015].

Impacto económico y social del Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza

Callado-Muñoz, Francisco José[1,*] y Utrero-González, Natalia[1]

[1]Centro Universitario de la Defensa Zaragoza; fcallado@unizar.es, n.utrero@unizar.es

***** Autor de contacto del trabajo; E-Mail: fcallado@unizar.es;

Abstract: El objetivo de este trabajo es disponer de una valoración objetiva de la dimensión económica y social de las actuaciones del Centro Universitario de la Defensa en Zaragoza, de los resultados de éstas y de sus efectos sobre el entorno, tanto en la economía aragonesa como española e internacional. Se pretende encontrar medidas objetivas de la contribución social del CUD, para valorar la eficacia y eficiencia de su funcionamiento, y evaluar su rentabilidad social y su capacidad de contribuir al desarrollo de la sociedad española.

Keywords: Impacto; económico; social; investigación

1. Introducción

El escenario estratégico mundial ha visto desaparecer la política de bloques que protagonizó la guerra fría y emerger la globalización y un nuevo marco en las relaciones internacionales. Al mismo tiempo, junto a los riesgos y amenazas tradicionales para la paz, la estabilidad y la seguridad, han aparecido otros como el terrorismo transnacional con disposición y capacidad de infligir daño indiscriminadamente. Las guerras de tipo convencional, han disminuido a la vez que han proliferado conflictos armados que, tanto por sus causas como por sus efectos, han tenido implicaciones notables más allá del lugar en donde se han producido.

Asimismo la revolución tecnológica de las últimas décadas, algunas originadas al amparo del propio entorno de la Defensa o bien las aplicaciones realizadas, han producido cambios operativos y de gestión. Todos estos cambios han provocado evidentes consecuencias en la estructura, organización y funciones de los Ejércitos. España no ha sido ajena a esta situación y para ello se modificaron la ley de Defensa Nacional[1] y la ley de la carrera militar[2] por la necesidad de transformación de las Fuerzas Armadas. Para ello, se presta atención a los recursos humanos que las sustentan y se desarrolla un nuevo modelo realista de profesionalización, basado en la calidad y en la capacidad de atraer a los ciudadanos al ejercicio profesional en las Fuerzas Armadas: se trata de asegurar la calidad del personal en unas Fuerzas Armadas modernas y altamente tecnificadas, donde los recursos humanos constituyen un factor esencial y determinante.

El objetivo último en esta nueva etapa sería alcanzar la excelencia, tanto en la etapa formativa como en la selección de los más cualificados para el ascenso y de los más idóneos para el desempeño de los distintos destinos. Así, la enseñanza militar ha experimentado una importante reforma. Este nuevo sistema de enseñanza debe mantener la exigencia de una excelente formación militar, pero junto a esa formación militar, será requisito para acceder a las escalas de oficiales obtener un título de grado universitario y para las escalas de suboficiales, una titulación de formación profesional de grado superior.

Es aquí donde reside la relevancia de la creación del Centro Universitario de la Defensa (CUD) de Zaragoza. Esta formación militar y universitaria se realizará en academias militares. La formación militar encuadrará a los alumnos y dirigirá y gestionará su régimen de vida. Las enseñanzas conducentes a la obtención de títulos de grado universitario del sistema educativo general se impartirán a través de un sistema de centros universitarios de la defensa adscritos a universidades públicas, ubicados en las citadas academias militares y del cual el CUD de Zaragoza es su principal exponente por número de alumnos.

El CUD ubicado en la Academia General Militar de Zaragoza fue creado por Real Decreto (RD)[3]. La titularidad, de carácter público, corresponde al Ministerio de Defensa. Este CUD se adscribió a la universidad de Zaragoza mediante convenio en 2009. Esta adscripción autoriza al CUD a impartir estudios conducentes a la obtención de títulos de carácter oficial y validez en todo el

[1] Ley Orgánica 5/2005, de 17 de noviembre, de la Defensa Nacional. Las Fuerzas Armadas quedan definidas como una entidad única e integradora de las distintas formas de acción de sus componentes y que posibilita el empleo óptimo de sus capacidades, sin que aquéllos vean mermada su especificidad.
[2] Ley 39/2007, de 19 de noviembre, de la carrera militar.
[3] Real decreto 1723/2008 de 24 de octubre

territorio nacional. En principio se impartieron los estudios conducentes a la obtención del título de grado en Ingeniería de Organización Industrial. En el curso 2013/2014, sin embargo, el CUD comenzó su participación en la impartición de postgrados especializados en Recursos Humanos y Logística destinados a oficiales del ejército de tierra. Todos los estudios impartidos por el CUD conducentes a la obtención de los títulos mencionados tendrán los mismos efectos académicos y profesionales que los cursados en los centros propios de la Universidad de Zaragoza y por tanto será la Universidad quién expida en nombre de S.M. el Rey, los títulos oficiales. Por otra parte, en el CUD se han desarrollado labores de investigación por parte de su profesorado en muchas ocasiones en colaboración con otras entidades y organismos públicos de enseñanza e investigación. Siguiendo lo establecido en el RD de creación se ha potenciado el desarrollo de líneas de investigación que se consideren de interés para las Fuerzas Armadas y para la paz, la seguridad y la defensa, colaborando, si procede, con otras entidades y organismos públicos de enseñanza e investigación.

Por tanto, el CUD viene a integrarse en el sistema universitario español a través de la Universidad de Zaragoza y como el resto de sistema universitario está adaptando sus estudios a las necesidades de la comunidad a la que sirve y a los cambios del entorno. Esta evolución y adaptación por parte de los centros universitarios, supone en muchos casos necesidad de inversiones y el aumento del esfuerzo financiero realizado por la administración. Este proceso de cambios ha coincidido en los últimos tiempos con la crisis económica y los recortes. Precisamente, al hilo de estos recortes, ha aparecido un debate sobre la educación universitaria y su financiación. Diversos estudios llevados a cabo desde el Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas (IVIE) han demostrado la contribución al desarrollo socioeconómico de la universidad de Cantabria, Valencia y Zaragoza entre otras. Poniendo de manifiesto los efectos positivos de la inversión en educación universitaria sobre la productividad económica. Habitualmente este tipo de estudios se realizan en un momento en el tiempo sin tener en cuenta la evolución a lo largo de los años.

El estudio de la universidad de Zaragoza realizado en 2009 no incluye al CUD. Sin embargo, el CUD supone un esfuerzo inversor importante en una coyuntura económica desfavorable. Por tanto, estudiar el impacto económico que haya podido tener durante su existencia parece interesante por tres razones principalmente. En primer lugar, para analizar los efectos adicionales en la economía de Aragón, si bien reconociendo que su impacto puede ser modesto por el tamaño del centro. En segundo lugar, analizar ese impacto desde sus inicios y ver la evolución a lo largo de su puesta en marcha y consolidación en el espacio económico de Aragón. En tercer lugar, porque la especial naturaleza del centro vincula dos sectores de la economía como son Defensa y

Educación, que se han demostrado muy activos e importantes para el crecimiento en otras economías como la americana.

2. Metodología

El trabajo se centra en los efectos a corto plazo del CUD como institución en la economía de Aragón. Se trata de analizar los efectos directos e indirectos del gasto, la inversión y el empleo del centro en la región mediante la metodología de modelos regionales de Input-Output. El área geográfica sobre la que se medirán los impactos es Aragón y la tabla utilizada como base para estos cálculos será la tabla regional del año 2005 (Pérez y Parra, 2009).

En esta primera etapa se considerarán solo los efectos atribuibles al CUD sin tener en cuenta la actividad de los agentes asociados al mismo como podrían ser estudiantes visitantes y congresistas. El caso de los estudiantes sería difícil de justificar teniendo en cuenta que los alumnos del CUD ya lo eran antes en el anterior sistema en la AGM. Por tanto no serían directamente atribuibles a la implantación del nuevo sistema educativo. En cuanto a los visitantes, una parte de ellos estaría relacionado con los estudiantes y se les podría aplicar el razonamiento anterior. Faltaría por tener en cuenta los visitantes directamente relacionados con la nueva estructura de centro universitario y los posibles congresos o jornadas desarrolladas en el mismo. Se prevé incluir esta información en futuras versiones de este trabajo.

2.1 Gasto total atribuible al CUD

Para estimar el impacto económico de los gastos del CUD en el resto de sectores de la economía se va a distribuir dicho gasto en cinco ramas de actividad. Para ello se ha generado la tabla Input Output de estos cinco sectores a partir de los 68 existentes en la tabla original. Cada una de las partidas contables de la liquidación presupuestaria del centro se ha asignado en función de su destino a la rama de actividad más cercana. Además se han incluido partidas externas al presupuesto del CUD que están directamente relacionadas con la puesta en funcionamiento del mismo. La tabla 1 presenta los vectores de demanda para estos cinco sectores y para los años 2010-2013 actualmente disponibles y su distribución porcentual.

La demanda proveniente del CUD no afecta a todos los sectores por igual. La agricultura no recibe ningún impulso en ninguno de los años de existencia del centro. La construcción tampoco presenta gasto en todos los años, limitándose a la construcción de las instalaciones en el primer y tercer año de funcionamiento. En concreto se acometieron las obras de acondicionamiento y puesta en marcha de los laboratorios y la construcción de los dos edificios administrativos, el primero en el

año 2010 y el segundo en el 2012. La partida de economías domésticas ha ido ganando protagonismo a medida que el centro ha ido creciendo y representa en el año 2013 más de un 85% del total. El sector servicios ocupa el segundo lugar de manera destacada frente a industria y energía. No se prevén cambios significativos en la distribución del gasto aunque el volumen del mismo podría aumentar en los próximos años. Este aumento estará en función de los cometidos que tenga asignados el centro.

Sectores de Actividad	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**
Agricultura	-	-	-	-
Energía	25,274	45,076	60,490	69,537
Industria	610,980	272,825	472,279	132,977
Construcción	1,312,057	-	656,995	-
Servicios	84,128	259,163	458,504	614,276
Economías Domésticas[1]	878,083	2,646,038	3,792,032	4,695,122
Total	2,910,522	3,223,101	5,440,300	5,511,912

Panel A. Vector de demanda del CUD 2010-2013

[1] Recoge principalmente sueldos y salarios de la plantilla del CUD

Sectores de Actividad	2010	2011	2012	2013
Agricultura	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Energía	0.87%	1.40%	1.11%	1.26%
Industria	20.99%	8.46%	8.68%	2.41%
Construcción	45.08%	0.00%	12.08%	0.00%
Servicios	2.89%	8.04%	8.43%	11.14%
Economías Domésticas	30.17%	82.10%	69.70%	85.18%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Panel B. Distribución Porcentual de la demanda

Tabla 1. Vector de demanda y distribución porcentual de la misma
Fuente: Elaboración propia.

3. Resultados

3.1 Actividad productiva del CUD

A partir de los vectores de demanda se puede estimar cual seria la actividad productiva del CUD. En concreto cual es la contribución al output, a la renta y al empleo de cada uno de los años (tabla 2). Se estima que el output generado por el CUD ha ido creciendo desde cerca de tres millones de euros hasta una cifra superior a los cinco millones y medio. Tanto la renta como el empleo directo han tenido un crecimiento más pronunciado acorde con la dotación gradual de profesorado en el centro llegando a más de cuatro millones y medio de euros y ciento diecinueve empleos directos

respectivamente. El cambio en el output en el último año ha sido pequeño y no se esperan grandes evoluciones en los próximos ejercicios. En el caso de la renta y el empleo ha sido un poco más pronunciado debido a las últimas incorporaciones de personal realizadas en el 2013.

	2010	**2011**	**2012**	**2013**
Output	2,910,522	3,223,101	5,440,300	5,511,912
Renta	878,083	2,646,038	3,792,032	4,695,122
Empleo	54	87	103	119

Tabla 2 Actividad productiva del CUD
Fuente: Elaboración propia.

3.2 Impacto de la Actividad Asociada al CUD

En este apartado se van a estimar los efectos adicionales de los agentes asociados al CUD en la economía de Aragón. En la tabla 3 se recogen los resultados para los años analizados. El impacto presenta fluctuaciones relevantes en los años 2010 y 2012 que no se corresponden con una evolución gradual de la actividad productiva del CUD. Los efectos de estos dos años tienen que ver con la construcción de los dos edificios administrativos del centro, así como la puesta en marcha de los laboratorios. Así, se puede observar como el impacto directo en los tres indicadores de estos dos años es superior al que presentan los años 2011 y 2013 donde la actividad del centro es la habitual de docencia e investigación. La diferencia también se hace visible en el impacto indirecto e inducido en el resto de sectores de la economía de Aragón.

Las cifras del último año indican un efecto total sobre el output de cerca de un millón y medio de euros repartidos casi al 50% entre el efecto directo y el indirecto e inducido. El mismo reparto presenta la renta generada que se sitúa en más de setecientos cincuenta mil euros. En cuanto al empleo, el centro es capaz de generar 17 puestos adicionales al personal que compone su plantilla, nueve de forma directa y 8 de manera indirecta. Es de esperar que estas cifras se mantengan o aumenten ligeramente en los próximos ejercicios.

	2010	**2011**	**2012**	**2013**
Output	**3,653,346**	**941,532**	**2,931,973**	**1,472,520**
Directo	560,741	465,276	813,514	697,861
Indirecto e inducido	3,092,604	476,256	2,118,459	774,659
Renta	**1,565,737**	**437,525**	**1,332,873**	**753,710**
Directo	728,240	217,491	644,157	387,039
Indirecto e inducido	837,497	220,035	688,716	366,671
Empleo	**35**	**10**	**30**	**17**
Directo	16	5	14	9
Indirecto e inducido	19	5	16	8

Tabla 3. Impacto Económico Actividad Asociada al CUD en el resto de sectores
Fuente: Elaboración propia.

3.3 Impacto Económico Total del CUD

El impacto económico total del CUD en la economía de Aragón se compone de los efectos tanto de su actividad productiva como de los de la actividad asociada. La tabla 4 recoge las estimaciones de este impacto total.

	2010	**2011**	**2012**	**2013**
Output	6,563,867	4,164,633	8,372,273	6,984,432
Actividad productiva CUD	2,910,522	3,223,101	5,440,300	5,511,912
Actividad asociada	3,653,346	941,532	2,931,973	1,472,520
Renta	2,443,820	3,083,563	5,124,905	5,448,832
Actividad productiva CUD	878,083	2,646,038	3,792,032	4,695,122
Actividad asociada	1,565,737	437,525	1,332,873	753,710
Empleo	89	97	133	136
Actividad productiva CUD	54	87	103	119
Actividad asociada	35	10	30	17

Tabla 4. Impacto Económico total del CUD en el resto de sectores
Fuente: Elaboración propia.

Los efectos sobre el output se acercan a los 7 millones de euros en el 2013. El máximo se alcanzó el año anterior debido a la construcción del segundo edificio administrativo y al aumento de la plantilla de profesorado acometida en dicho ejercicio. La renta total generada se acerca a los cinco millones y medio de euros y el impacto sobre el empleo llega a los 136 puestos de trabajo. De ellos, 119 se corresponden con los trabajadores del centro y 17 con la actividad asociada.

4. Conclusiones

Este trabajo realiza una estimación del impacto económico del CUD en la economía de Aragón desde sus inicios hasta el último año con datos disponibles. Aunque modesta, la aportación del centro en términos económicos resulta relevante. Es capaz de generar más de 135 puestos de trabajo a tiempo completo, un producto de cerca de siete millones de euros y un valor añadido bruto que casi alcanza los cinco millones y medio de euros. Las perspectivas son de un ligero crecimiento promovido por la consolidación del sistema de formación y de la plantilla del centro en los próximos ejercicios.

La valoración del impacto económico del centro se pretende extender al ámbito de la investigación y su impacto en la creación de conocimiento. A partir de indicadores objetivos de producción científica se prevé obtener una valoración de la labor investigadora tanto presente como futura del

centro. Las relaciones internacionales que se han establecido y la proyección del centro como una de las entidades relevantes en el futuro de la investigación y la formación en el área de la defensa.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia a través de los proyectos, ECO2013-45395-R, ECO2013-48496-C4-4-R, el Gobierno Regional de Aragón y el Fondo Social Europeo (proyecto S125: Compete) y el Centro Universitario de la Defensa a través del proyecto 2013-08.

Referencias

1. Pérez, L.; Parra, J. Estructura Productiva y Actualización del Marco Input-Output. Año 2005. En Consejo Económico y Social de Aragón, Zaragoza, España, 2009. http://www.aragon.es/estaticos/ImportFiles/02/docs/Areas/Convocatorias/PremiosProyectos/2007/LIBRO_INPUT_OUTPUT_2007.pdf

2. Ley Orgánica 5/2005, de 17 de noviembre, de la Defensa Nacional. http://www.boe.es/buscar/pdf/2005/BOE-A-2005-18933-consolidado.pdf

3. Ley 39/2007, de 19 de noviembre, de la Carrera Militar. http://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-19880

4. Real decreto 1723/2008 de 24 de octubre. http://www.boe.es/boe/dias/2008/11/17/pdfs/A45582-45583.pdf

Gasto en Defensa y Crecimiento Económico: Nueva Evidencia

Hromcova, Jana[1]; Callado-Muñoz, Francisco José[2,*] y Utrero-González, Natalia[2]

[1]Universitat Autònoma de Barcelona; jana.hromcova@uab.cat

[2]Centro Universitario de la Defensa Zaragoza; fcallado@unizar.es, n.utrero@unizar.es

***** Autor de contacto del trabajo; E-Mail: fcallado@unizar.es;

Abstract

Este trabajo analiza el impacto de la incorporación a una alianza militar en la relación entre el sector Defensa y el crecimiento económico. La adhesión a una alianza militar supone la adopción de regulaciones, sistemas y tecnologías propios de la alianza y sus miembros. En particular, se analiza cómo el proceso de entrar en la Organización del Atlántico Norte (OTAN) podría influir en el gasto en defensa de los países de reciente adhesión y su repercusión sobre el crecimiento económico. Los resultados muestran que si bien el gasto en defensa afecta negativamente al crecimiento económico, este efecto es menor cuando los países pertenecen a una alianza militar.

Keywords: Gasto en Defensa; Gasto Público; Crecimiento

---

1. Introducción

La relación entre el gasto en defensa y el crecimiento económico ha sido ampliamente estudiada en la literatura, tanto desde un punto de vista teórico como empírico (Dunne et al., 2005). Los resultados no son concluyentes y muchos de los estudios empíricos tradicionales encuentran que el gasto militar no es un factor significativo a la hora de explicar el crecimiento económico (Dunne et al., 2005). La explicación habitual es que el gasto en defensa no es un gasto productivo como

pueda ser la inversión en infraestructuras, investigación y desarrollo o educación, que son consideradas como positivas en términos de efectos para la economía (Korkmaz, 2015). Sin embargo, el gasto en defensa proporciona seguridad contra amenazas internas y externas. Esta seguridad de las personas y la propiedad privada son esenciales para el funcionamiento de los mercados y favorece los incentivos para invertir e innovar. Así en países en vías de desarrollo, los conflictos y la ausencia de seguridad son considerados obstáculos para el desarrollo económico (Töngür y Elveren, 2012). Aizenman y Glick (2003) reformulan el modelo tradicional de Barro (1990) para incluir este efecto "reducción de amenazas/mayor seguridad" del gasto de defensa. De forma similar, Pieroni (2009) profundiza en el estudio de los efectos indirectos del gasto de defensa a través de las sinergias entre gasto militar y resto de gasto público y cómo cambios en el primero influyen en el segundo pudiendo ayudar al crecimiento.

Por otra parte, en un mundo cada vez más globalizado, las tasas de crecimiento de los países no sólo dependen de sus propias características, como pueda ser el gasto en defensa o infraestructuras, sino que parecen depender críticamente de los niveles de crecimiento y de ingresos de otros países. Klenow y Rodríguez-Clare (2005) señalan la importancia de la interdependencia global para explicar el desarrollo y el crecimiento de los países. En este sentido, se ha demostrado que la participación en acuerdos de libre comercio pueden acelerar y mejorar el desarrollo tecnológico afectando al funcionamiento del sistema financiero y por extensión a la economía (Callado et.al. 2013). Paralelamente, La Porta et. al. (1997) muestran el relevante papel del entorno institucional y reglamentos nacionales en el comportamiento de los agentes económicos. De manera que, la existencia de un entorno institucional sólido y confiable puede ayudar e impulsar el crecimiento de un determinado país. Disposiciones supranacionales pueden ofrecer incentivos adicionales a los agentes y por lo tanto acelerar los procesos de inversión y desarrollo tecnológico. En esta línea, Callado et. al. (2015) muestran como la participación en una unión económica y monetaria supone un acicate institucional y un desarrollo tecnológico adicional para los países que pasan a formar parte de la misma. En relación con la defensa, existen organizaciones supranacionales, como la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) que promueven tanto la defensa común como el desarrollo de nuevas tecnologías y capacidades para adaptarse al nuevo entorno estratégico (Ruiz, 2014). Sin embargo, el posible efecto positivo sobre la economía del entorno institucional no ha sido incluido en el estudio de la relación defensa-crecimiento económico.

Este artículo intenta realizar una contribución en este sentido. En particular, este trabajo analiza cómo el proceso de incorporación a una organización militar y la influencia de las nuevas

instituciones puede afectar a la relación entre gasto en defensa y crecimiento económico. Se analiza tanto el efecto directo de pertenencia como el efecto indirecto de ser parte de una alianza militar al tener acceso a mejores tecnologías, poder participar en programas conjuntos etc. Para ello, se estudia el caso particular de la OTAN durante el período 1990-2011.

Los resultados confirman la relación negativa entre el gasto en defensa y actividad económica evidenciada en trabajos anteriores. Sin embargo, la introducción de la alianza militar enriquece el análisis y matiza estas conclusiones al aparecer un efecto positivo no lineal tanto del gasto de defensa (nacional como de la alianza) sobre el crecimiento económico.

2. Marco Teórico

Nuestro marco teórico parte del trabajo de Aizenman y Glick (2006) que utilizan un modelo tipo Barro (1990) con gasto público productivo donde se incluye el gasto militar, las amenazas y la corrupción (a través del sistema impositivo). Se asume que la economía se enfrenta a una amenaza externa. Esta amenaza fuerza al país a dedicar recursos al gasto militar, ya que el gasto militar reduce la importancia de esa amenaza. Este gasto militar tiene efectos sobre el conjunto del gasto público. Por tanto, el crecimiento depende de las amenazas externas, la tecnología y el gasto militar y su relación con el resto del gasto público.

En nuestro caso, estamos interesados en el efecto adicional que puede tener pertenecer a una alianza militar al proporcionar seguridad común a todos sus miembros. El país puede ser un miembro de una alianza militar o no. Si no es miembro, la cantidad total de gasto militar viene determinada por la que realiza el propio país. Si un país es miembro de una alianza, como por ejemplo la de la OTAN, su gasto militar se verá afectado por la normativa, procedimientos y estructura de la alianza que unirá sus recursos y el know-how militar a los recursos que destina el propio país.[1]

Por tanto, la tasa de crecimiento de la economía dependerá de la tecnología, del gasto militar y su relación con el resto del gasto público, así como del hecho de pertenecer o no a una alianza militar y los efectos que ésta pueda tener sobre la tecnología y el sector defensa.

[1]Se tiene en cuenta que formar parte de una alianza puede suponer una estandarización del gasto militar para cumplir con la regulación establecida en la misma (por ejemplo, necesidad de adquirir una chaleco antibalas aprobado por la alianza, etc.).

3. Datos y Metodología

Los datos analizados corresponden a los países miembros de la OTAN. El período analizado es 1990-2011. Durante este período se produce la incorporación a la alianza de países tradicionalmente en la órbita de la Unión Soviética. Así en 1999 se incorporan Hungría, Polonia y República Checa. En 2004, Bulgaria, Eslovaquia, Eslovenia, Estonia, Letonia, Lituania y Rumanía. Albania y Croacia son los últimos países en incorporarse en 2009. La elección de este periodo permite analizar el efecto de la incorporación de estos países a la OTAN sobre el crecimiento. Los datos militares proceden del Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI). Los datos económicos proceden de la Penn WorldTable (PWT) versión 8.0. Todas las variables están calculadas en dólares y escaladas por la población para corregir el efecto tamaño.

La ecuación a estimar es:

$$gy_{it}=\alpha_0+\alpha_1 mil_{it}+\alpha_2 alianza_{it}+\alpha_3 mil_{it}*alianza_{it}+\beta X_{it-1}+\varepsilon_{it} \quad (1)$$

donde *i* es el país y *t* es el año. El término de error ε_{it} se asume normalmente distribuido con media cero y varianza σ^2, $\varepsilon_{it}\sim N(0,\sigma^2)$. Se utiliza el Método Generalizado de Momentos (GMM) que permite tratar la posible simultaneidad de los regresores a la vez que elimina la heterogeneidad inobservable. En particular, utilizamos la transformación "desviaciones ortogonales" propuesta por Arellano y Bover (1995) que al no incluir los retardos en la fórmula, éstos pueden ser utilizados como instrumentos válidos.

La variable independiente gy_{it} es la tasa de crecimiento del producto interior bruto (PIB) per cápita. La relación entre el gasto en defensa y el gasto público productivo, *mil*, recoge el peso del sector defensa en la economía como en Pieroni (2009) y otros. La variable *alianza* viene definida por el ratio gasto en defensa de la alianza sobre el PIB. Si un país no pertenece a la alianza, el valor de esta variable es cero. Mayores diferencias entre *alianza* y *mil* implican mayores beneficios de estar en la alianza. El término *mil∗alianza* recoge los efectos no lineales. Su signo esperado sería positivo y reduciría los posibles efectos adversos del gasto de defensa. El vector X incluye distintas variables nacionales tradicionalmente incluidas en esta literatura: PIB inicial (logaritmo), porcentaje del gasto público, desarrollo de capital humano, crecimiento de la población (Dunne et al., 2005).

4. Resultados

La tabla 1 presenta los resultados del análisis. En primer lugar, los tests de diagnóstico, los tests de Hansen's para todas las especificaciones indican la validez del conjunto de instrumentos elegido así como la exogeneidad de los mismos. Respecto a los tests de autocorrelación AR(1) y AR(2) se acepta la hipótesis nula de no existencia de autocorrelación de segundo orden al 5%.[2]

	(1)	(2)	(3)	(4)
PIBt-1	-0.1001**	-0.1039**	-0.0711*	-0.0748
	(0.0414)	(0.0474)	(0.0389)	(0.0508)
%Gpub/PIB	-0.0030**	-0.0088***	-0.0029***	-0.0073***
	(0.0014)	(0.0031)	(0.0011)	(0.0028)
CapHum	0.1633*	0.2187**	0.0587	0.1858*
	(0.0950)	(0.0964)	(0.0451)	(0.1037)
CrecPobla	2.2665	2.2325	2.8002	0.4135
	(2.7966)	(3.2095)	(2.0519)	(3.2191)
Mil	-1.8056	-8.3792**	0.2559	-7.7485**
	(1.1179)	(3.7051)	(0.4331)	(3.3115)
Alianza	-3.1726***	-3.9026***	-0.0711	-0.6296***
	(1.1609)	(1.2768)	(0.1284)	(2.8855)
Mil x Alianza	94.6975**	116.6740**		117.0278***
	(41.0853)	(46.4149)		(41.8115)
% Gpub x Mil		15.0401*		14.1470*
		(8.3623)		(7.6232)
%Gpub x Alianza				-0.0822
				(0.0559)
Constante	0.7229**	0.8460**	0.6791**	0.5882*
	0.3578	0.3953	0.2942	0.3451
Obs	536	536	536	536
***, **, * significativo at .01, .05 y .1 respectivamente				
Test de diagnóstico				
AR(1)	-1.25	-1.26	-1.39	-1.5
AR(2)	-1.66	-1.64	-2.2^	-1.65
Hansen tests				
Sobreidentificación	25.42	24.43	25.53	24.16
Exogeneidad	0.15	-0.87	0	-0.48
^significativo al 0.05				

Tabla 1. Resultados GMM

El PIB inicial presenta un coeficiente negativo y significativo en todas las especificaciones, excepto en la columna 4 por lo que países de mayor desarrollo inicial crecen menos. Este resultado es coherente con los estudios sobre crecimiento económico. El coeficiente del porcentaje del gasto público es negativo y significativo. Este resultado sugiere que sectores públicos más

[2] La única excepción sería la columna 3, por lo que en este caso los resultados deberían ser tomados con cautela.

grandes tienen efectos negativos sobre el crecimiento, por el aumento de los gastos improductivos. La variable que mide el desarrollo del capital humano tiene un coeficiente positivo y significativo, por tanto, mayores niveles de desarrollo humano están asociados a mayores niveles de crecimiento. Resultados similares, aunque más débiles son obtenidos por Aizenman y Glick (2006) y Pieroni (2009). El crecimiento de la población presenta un coeficiente insignificante en todas las especificaciones.

En relación a los gastos de defensa, en la columna (1) la variable que representa los gastos nacionales (Mil) tiene un coeficiente negativo pero no significativo. El coeficiente de la variable que hace referencia al gasto conjunto de la alianza es negativo y significativo, indicando un efecto depresor del crecimiento. El término de interacción, que recogería el efecto no lineal es positivo y significativo. Por tanto, el gasto de defensa afectará más al crecimiento de aquellos países que pertenecen a una alianza militar. El hecho de pertenecer a una alianza hace que el gasto en defensa sea más eficiente y por tanto reduce su efecto negativo sobre el crecimiento. En la columna 2, se incluye la interacción entre el gasto público y el gasto de defensa (tal como aparecía en Pieroni, 2009). Los resultados para las variables de control no varían. En cuanto a los gastos de defensa, los gastos de la alianza mantienen los signos de la especificación de base. Los gastos de defensa nacionales son ahora significativos y presentan un signo negativo. La interacción entre los gastos militares y gasto público presenta un coeficiente positivo y significativo. Por tanto el gasto en defensa bien nacional o internacional tiene efectos negativos sobre el crecimiento pero estos efectos son menores para aquellos países que pertenecen a una alianza militar y tienen mayores niveles de gasto público. Este resultado extiende lo obtenido por Pieroni (2009) mediante el análisis de la participación en una alianza militar. Es interesante destacar que si de la especificación inicial, sustraemos la interacción entre el gasto militar y el gasto de la alianza (columna 3), el efecto directo de pertenecer a la alianza desaparece. Estos resultados confirman la importancia de los efectos no lineales en el análisis de los gastos de defensa.

En la columna 4 se introduce un nuevo término de interacción entre el gasto público y el gasto de la alianza. Los resultados sobre los gastos de defensa nacionales y de la alianza se mantienen, pero la nueva interacción no es significativa. De manera que las sinergias entre el gasto público y el gasto de defensa se circunscriben al ámbito nacional de los mismos.

4. Conclusiones

Este trabajo contribuye a analizar la relevancia del proceso de incorporación a una alianza militar y la influencia de las nuevas instituciones militares en la relación entre gasto en defensa y

crecimiento económico. Partiendo de los presupuestos teóricos de Aizenman y Glick (2006), el estudio incorpora el análisis de las alianzas militares y los efectos no lineales de las mismas. Se utiliza el caso particular de la OTAN durante el período 1990-2011. Los resultados confirman los efectos negativos del gasto en defensa, así como los efectos beneficiosos de la pertenencia a la alianza, a través de la reducción del efecto negativo directo del gasto de defensa sobre el crecimiento. El gasto en defensa, bien nacional o internacional, reduce el crecimiento, pero esta relación negativa es menor para aquellos países que pertenecen a una alianza militar y presentan mayores niveles de gasto público. Por tanto, se evidencia la importancia de los efectos no lineales sobre el crecimiento económico. Las futuras investigaciones sobre el gasto público en general y de defensa en particular deben tener en cuenta estos efectos. Además, en el caso concreto del análisis de las alianzas internacionales, las sinergias entre el desarrollo tecnológico del país y el aprovechamiento de la tecnología militar se puede explorar a través de este tipo de efectos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia a través de los proyectos ECO2012-37572, ECO2013-45395-R, ECO2013-48496-C4-4-R, el Gobierno Regional de Aragón y el Fondo Social Europeo (proyecto S125: Compete) y el Centro Universitario de la Defensa a través del proyecto 2013-08.

Referencias

1. Aizenman, J.; Glick, R. Military expenditure, Threats and Growth. *Journal of International Trade and Economic Development* **2006**, 15, 129-155.
2. Barro, J. R. Government Spending in a Simple Model of Endogenous Growth. *Journal of Political Economy* **1990**, 98, 103-125.
3. Callado-Muñoz, F.J.; Hromcova, J.; Utrero-González N. Openness and Technology Diffusion in Payment Systems: The Case of NAFTA. *Computational Economics* **2013**, 43, 497-519.
4. Callado-Muñoz, F.J.; Hromcova, J.; Utrero-González N. Effects of Institutional Environment and Technology Development on Payment Choice, *Technological and Economic Development of Economy* **2015**, (aceptado).
5. Dunne, J. P.; Smith, R.P.; Willenbockel, D. Models of military expenditure and growth: a critical review. *Defence and Peace Economics* **2005**, 16(6), 449-461.
6. Klenow, P. J.; Rodriguez-Clare, A. Externalities and Growth. In: *Handbook of Economic Growth*, 1st ed.; Aghion, P., Durlauf, S. Eds.; Elsevier, 2005; volume 1, capítulo 11, pp. 817-861 Elsevier.

7. Korkmaz, S. The Effect of Military Spending on Economic Growth and Unemployment in Mediterranean Countries, *International Journal of Economics and Financial Issues* **2015**, 5(1), 273-280.
8. La Porta, R.; Lopez-de-Silanes, F.; Shleifer, A.; Vishny, R. W. Legal Determinants of External Finance. *Journal of Finance* 1997, 52, 1131-1150.
9. Pieroni, L. Military Expenditure and Economic Growth, *Defence and Peace Economics* **2009**, 20(4), 327-339.
10. Ruíz, R. La OTAN se reafirma. *Revista Española de Defensa* **2014**, Septiembre, 7-11.
11. Töngür, Ü.; Elveren AY. Military Expenditures, Inequality, and Welfare and Political Regimes: A Dynamic Panel Data Analysis, *ERC Working Papers in Economics* **2012**, 12/10.

Nuevos métodos de enseñanza aplicados a Ingeniería Térmica I

Ulloa Sande, Carlos [1,*], Rey González, Guillermo David [1], Lareo Calviño, Guillermo [1], y Suárez García, Andrés [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa (CUD), Escuela Naval Militar (ENM), Plaza de España 2, 36920, Marín. Emails: carlos.ulloa@cud.uvigo.es (C.U.S.), guillermo.rey@cud.uvigo.es (G.D.R.G.), glareo@cud.uvigo.es (G.L.C.), asuarez@cud.uvigo.es (A.S.G.)

* Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: carlos.ulloa@cud.uvigo.es (C.U.S.);

Abstract: En la Escuela Naval Militar (ENM) conviven enseñanzas civiles y militares en un único plan de estudios. El Centro Universitario de la Defensa (CUD), adscrito a la Universidad de Vigo, es el encargado de la impartición de parte de este plan de estudios, los créditos correspondientes a las materias de Grado de Ingeniería Mecánica. El hecho de que los futuros oficiales de la Armada española sean estudiantes de Grado de Ingeniería Mecánica supone una idiosincrasia especial para el CUD por estar sus alumnos sometidos a un régimen de vida militar. Por otro lado, el Centro Universitario, como cualquier otro centro universitario perteneciente al Espacio Europeo de Educación Superior, tiene como prioridad adaptar sus métodos de enseñanza a una evaluación continua.

La definición del método docente en las enseñanzas técnicas es aún más importante que en otras disciplinas. Los conceptos y técnicas explicadas en una clase de ingeniería requieren de una comprensión profunda para que el alumno sea capaz de resolver diversos problemas utilizando los conceptos y las técnicas adecuadas. Por lo tanto la metodología docente propuesta en carreras técnicas debe estar orientada a la comprensión.

Existen diversos métodos de aprendizaje cooperativo que facilitan esta misión. En este trabajo se explican los diferentes métodos docentes empleados en la materia de Ingeniería Térmica I que se imparte en el tercer curso del grado en Ingeniería Mecánica del Centro Universitario de la Defensa. Debido al tipo de contenidos de esta materia, la tendencia es ir hacia un modelo de aprendizaje basado en problemas.

Keywords: diseño de asignatura, evaluación continua, ingeniería térmica.

---

1. Introducción

La docencia de carreras técnicas ha sido siempre un proceso complejo. La complejidad se incrementa si esta docencia se imparte de forma simultánea con otra titulación con la que tiene en común parte de los créditos. Si a esto le añadimos que se imparte en una escuela militar a alumnos con un régimen de vida muy estricto y con el calendario académico extremadamente apretado el problema empieza a ser preocupante.

En la enseñanza de ingeniería, tradicionalmente, se ha dado importancia a la transmisión de una serie de conocimientos. Desde la implantación del Espacio Europeo de Educación Superior, se empieza a dar más importancia a la comprensión de los conocimientos por parte del alumno que a la mera transmisión de un temario. El sentimiento generalizado es que la educación de Ingenieros está cambiando rápidamente del modelo tradicional de tiza y charla (chalk-and-talk) a un modelo donde se le da tanta importancia a la adquisición de conocimientos como a la comprensión de los conceptos [1].

El objetivo principal del proceso de Bolonia es la creación de un Espacio Europeo de Educación Superior, la normalización de Títulos Académicos y Normas para la Garantía de la Calidad en los países europeos desde el año 2010. Desde la Declaración de Bolonia, los países europeos han ido adaptando sus estrategias de aprendizaje y enseñanza a algunos parámetros. Los estudiantes dedican más tiempo a estudiar y las horas de clase han disminuido. Se deben diseñar nuevos sistemas, basados en el nuevo modelo, que mejoren el aprendizaje de los estudiantes [2,3].

El método de evaluación utilizado debe acompañar al método docente. Un método docente innovador con un sistema de evaluación clásico no tendrá los mismos efectos. En los nuevos sistemas implementados se presta especial interés al método de evaluación [4]. Es importante darle a los estudiantes un ambiente de aprendizaje que les haga sentir cómodos. Para ello se deben diseñar sistemas de evaluación bien dimensionados, que tengan en cuenta la carga de trabajo del alumno [5,6].

El marco en el que se desarrolla este trabajo es especialmente sensible a los procesos de evaluación. En el Centro Universitario de la Defensa (CUD) de la Escuela Naval Militar (ENM) se imparte grado de ingeniero mecánico desde el curso 2010-2011. A las limitaciones existentes con los alumnos universitarios comunes hay que sumarle las propias de un aspirante a oficial de la Marina. Los estudiantes del Centro Universitario de la Defensa tienen la agenda muy apretada, escasas horas de estudio y un régimen de vida agotador. Se sospecha que los métodos docentes tradicionales suponen una pérdida de tiempo en este entorno, ya que muchos alumnos necesitan una motivación extra para poder afrontar su agenda diaria.

Para que el proceso de enseñanza-aprendizaje sea satisfactorio es imprescindible el aprovechamiento de las clases, tanto de teoría como prácticas. Para un correcto aprovechamiento de las horas en contacto con el alumno, el profesor debe diseñar un sistema de evaluación que le permita en todo momento saber si el alumno ha comprendido los conceptos explicados hasta ese instante y tener la realimentación del proceso de enseñanza-aprendizaje. Esta realimentación permitirá al docente realizar un ajuste en el rumbo de la materia, incidiendo en los puntos donde los estudiantes encuentran más dificultades.

Las competencias transversales, tales como el trabajo en grupo o la capacidad para hablar en público, también deben ser tenidas en cuenta a la hora de diseñar un sistema de evaluación para una asignatura del Grado en Ingeniería Mecánica [6].

2. La enseñanza tradicional en las escuelas de ingeniería

Tradicionalmente, la herramienta más utilizada en la docencia universitaria es la lección magistral. Si bien es cierto que las Escuelas de Ingeniería siempre han tenido la particularidad de incluir en sus programas prácticas de laboratorio, es también cierto que las prácticas en muchos casos estaban desligadas del contenido teórico y generalmente suponían un número de horas muy pequeño comparado con las horas presenciales totales de la materia.

La comunicación con el alumno en este escenario es prácticamente unidireccional, siendo complicado recibir retroalimentación de lo que está sucediendo. Por estas causas, y muchas veces por la obsesión del profesor de "dar el temario completo", se pasa por alto la comprensión que pueda tener el alumno de los conceptos tratados, entendiendo que éste es únicamente "problema del alumno".

Estos sistemas "tradicionales" siguen en uso en muchos casos y basan su eficacia en la responsabilidad del alumno que debe debatir con sus compañeros los conceptos "vistos" en clase, consultar bibliografía, asistir a tutorías, etc., para alcanzar el éxito y aprobar la asignatura (y lo que es más importante: ¡aprender!)

A estos sistemas les suelen acompañar sistemas de evaluación paralelos, es decir, coherentes con la metodología docente. Es habitual la realización de algún examen parcial para controlar la evolución del alumnado y se le da un (generalmente bajo) peso en la nota final a las memorias de prácticas de laboratorio. Por lo demás el peso del examen final suele ser alto, superior al 50% en la mayoría de los casos.

3. Ingeniería Térmica en el Centro Universitario de la Defensa

La implantación del Grado de Ingeniería Mecánica en el CUD culmina este curso académico 2014-2015 con la primera promoción de graduados. Estos Alféreces de Navío serán los primeros en obtener una titulación civil con sus estudios en la ENM. En los últimos cinco años, desde el comienzo del plan de estudios, los profesores han adaptado sus metodologías docentes para adaptarse en la medida de lo posible a la idiosincrasia de este centro tan especial.

En este trabajo se expone la evolución en la metodología docente de la materia de Ingeniería Térmica I. Este curso 2014-2015 es la tercera vez que se imparte esta materia en el CUD y todos los años ha sufrido alguna evolución intentando acercarse a los postulados de la evaluación continua y el trabajo autónomo propuestos en Bolonia.

Metodología	Cantidad	% Nota evaluación continua
Prueba Final (PF)	1	50%
Controles Teóricos (CT)	2	40%
Memorias de Prácticas (MP)	5	10%

Tabla 1. Metodología de evaluación inicial

Ingeniería Térmica I es una materia del segundo cuatrimestre del tercer curso del Grado de Ingeniería Mecánica en el CUD. El curso 2012-2013 fue el primer año de implantación de la materia y la metodología docente y el sistema de evaluación propuesto siguieron un patrón "clásico". Se

realizaron dos pruebas parciales de evaluación que junto con las prácticas de laboratorio supusieron el 50% de la evaluación continua. El 50% restante se evalúa en una prueba individual al final del curso. En la tabla 1 se puede ver la distribución de los distintos ítems de la evaluación.

Para mejorar la comprensión del alumno de los conceptos impartidos se aplican nuevos métodos de enseñanza a esta materia. El sistema se diseña para el curso 2013-2014 y se revisa en el curso 2014-2015 utilizando la experiencia obtenida el primer año de implantación.

4. Implementación de nuevos métodos docentes y de evaluación

4.1. Análisis de la situación

La metodología docente y el sistema de evaluación utilizado el primer año revelaron algunos problemas. En primer lugar, debido a la distribución de las pruebas parciales, los contenidos solamente se evalúan tres veces a lo largo del curso. El primer examen tuvo lugar en la sexta semana de clases, así que, si existe algún problema en la comprensión de los conceptos, tal vez sea demasiado tarde.

Otra gran carencia del sistema es la escasa verificación de algunas competencias requeridas en la materia, como por ejemplo: la resolución de problemas, habilidades de relaciones interpersonales, toma de decisiones, o trabajo en equipo. Estas competencias no se adquieren totalmente en las prácticas de laboratorio que se desarrollan en parejas.

Los exámenes, tanto los parciales como el final, se componían de cuestiones teóricas y ejercicios prácticos. En términos de estructura, el examen final era una mera repetición de los exámenes parciales.

Las prácticas de laboratorio eran auto-contenidas, evitando en lo posible realizar tareas fuera de las horas presenciales programadas. Este modelo de prácticas es consistente con el estilo de vida que se desarrolla en la Escuela Naval Militar.

En general, el sistema de evaluación usado está lejos de las metodologías de evaluación continua propuestas por Bolonia. Los estudiantes tienden “a estudiar para aprobar el examen”, lo cual reduce significativamente el desempeño alcanzado a largo plazo. Estas deficiencias en la retención y comprensión de los conceptos revela deficiencias en los cursos superiores, donde se supone que los alumnos tienen interiorizados algunos conceptos básicos.

4.2. Nuevo modelo propuesto

Ingeniería Térmica I tienen 80 alumnos en el curso 2013-2014. Las clases se desarrollan en grupos de 40 alumnos y las prácticas de laboratorio en grupos de 20. Una actividad adicional, los seminarios, se desarrolla cada dos semanas y consiste en una hora de clase en grupos de 10 alumnos.

El sistema de evaluación propuesto se redefine para incrementar la calidad del aprendizaje del alumno. Los diferentes criterios utilizados se muestran en la Tabla 2.

Metodología	Cantidad	% Nota evaluación continua
Prueba Final (PF)	1	50%

Controles Teóricos (CT)	2	20%
Memorias de Prácticas (MP)	5	10%
Evaluación en Seminarios	5	20%

Tabla 2. Nueva metodología propuesta

Aunque la distribución de la evaluación se sigue pareciendo a la utilizada el curso anterior, hay sustanciales cambios en la metodología docente. En primer lugar veamos las similitudes. Se mantiene la prueba final con un peso del 50% en la nota final de evaluación continua. Este es un examen similar al realizado en curso anterior con contenidos teóricos y prácticos. La evaluación por parciales realizada el curso anterior se divide en dos partes. La mitad de esa evaluación se dedica a controles teóricos de elección múltiple, y la otra mitad se dedica a la resolución de problemas en grupo durante las clases de seminarios.

A continuación se explica cada una de las técnicas empleadas, explicando las ventajas y los inconvenientes encontrados durante su implementación.

4.3. Controles teóricos de elección múltiple

Para evaluar los conocimientos teóricos de la materia se realizan 5 controles de elección múltiple. Cada examen tiene 5 preguntas con 4 opciones de respuesta donde solo una de ellas es correcta. Cada fallo implica una disminución en la puntuación de 1/3 de la puntuación de una respuesta correcta. Cada uno de los controles tiene un peso del 4% en la nota final de evaluación continua.

Teniendo en cuenta que el curso dura 14 semanas, se realiza un control cada 3 semanas de media, aproximadamente. Debido a la frecuencia de los controles, el interés y la participación de los estudiantes en las clases aumenta. La principal contrapartida de esta medida está en la percepción del estudiante, que siente que está siendo evaluado continuamente y difícilmente regula sus niveles de estrés (aunque el peso de cada control sea muy bajo en la evaluación final).

4.4. Memorias de Prácticas

Las prácticas de laboratorio se adaptan a los contenidos y están bien diseñadas. No se introducen cambios en esta actividad.

4.5. Evaluación en seminarios

Adicionalmente a los controles teóricos se aplican técnicas de aprendizaje basado en problemas. Para ello se utilizan clases de seminario de 10 alumnos. Los alumnos se clasifican en grupos de 3 o 4 personas. En las clases de seminario se propone la resolución de un ejercicio de un boletín entregado previamente para su estudio. Estos ejercicios son análogos a los resueltos en clase. A cada grupo del seminario se le asigna uno de los problemas que deben resolver en grupo durante la clase.

El trabajo en grupo se valora con un 40% de la nota de la actividad, mientras que el 60% restante se reserva para la valoración de la contribución individual al desarrollo del problema. Para poder medir el desempeño individual se realizan diferentes técnicas a lo largo del curso.

4.5.1. Prueba escrita individual

En los dos primeros seminarios se pidió la entrega del ejercicio individualmente. Este sistema no supone una gran innovación y no facilita el desarrollo de competencias transversales.

4.5.2. Entrevista personal

En los dos seminarios siguientes se realizó una entrevista personal a cada uno de los alumnos durante la hora del seminario, preguntando acerca de la resolución del problema propuesto. La nota de esta entrevista se discretizó utilizando una escala Likert, de manera que se podían obtener las siguientes calificaciones: 60%, 45%, 30%, 15%, y 0%.

Este sistema de evaluación es bastante fiable, ya que el contacto directo con el alumno permite distinguir claramente su grado de comprensión de los conceptos, pero requiere de una gran cantidad de tiempo para llevarlo a cabo.

4.5.3. Test interactivo

Se evalúa el grado de conocimiento de la resolución empleando un sistema de respuesta automática de los alumnos. El sistema empleado consiste en ResponseCard NXT de Turning Technologies. Se trata de teclados por radiofrecuencia LCD para el envío de respuestas. El hardware empleado enlaza con PowerPoint y dispone de un software de tratamiento de datos llamado TurningPoint [7].

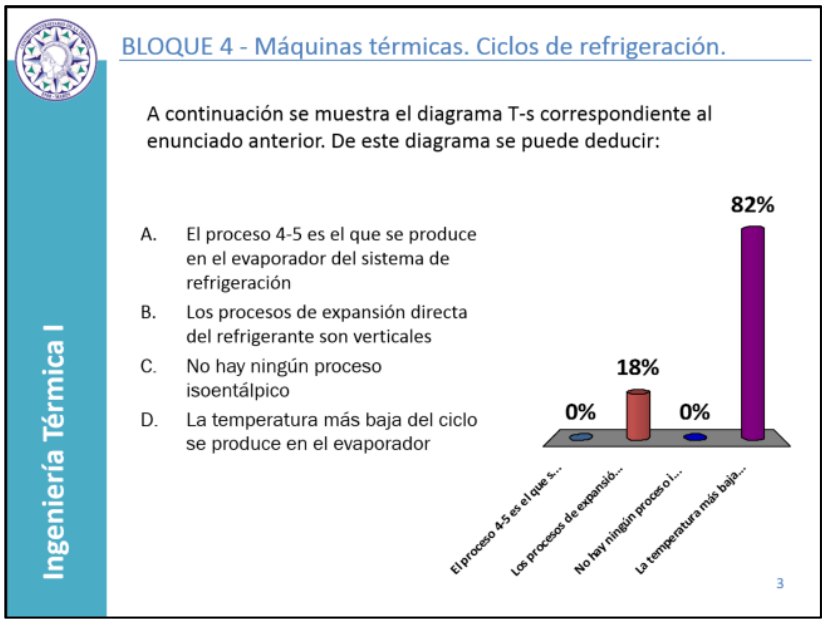


Figura 1. Pregunta utilizada en un test interactivo.

En esta prueba se pretende trasladar el contenido de una entrevista individual a un cuestionario interactivo donde se resuelva con los alumnos al mismo tiempo que se muestran las soluciones en pantalla. La Figura 1 muestra una transparencia con los resultados de una pregunta realizada a los alumnos.

El software TurningPoint permite editar presentaciones de Power Point e introducir la información de un cuestionario. Mientras al alumno se le muestra una pregunta en pantalla, el complemento de TurningPoint permite configurar cuál o cuáles de las opciones mostradas es la correcta. Además se puede configurar si el alumno puede cambiar su respuesta mientras está abierto el formulario, la puntuación de cada pregunta, si los errores restan,… etc. Una vez finalizado el cuestionario se puede guardar el sondeo, permitiendo archivar cada una de las sesiones en archivos independientes. Posteriormente estas sesiones se pueden recuperar a través del panel de control de TurningPoint.

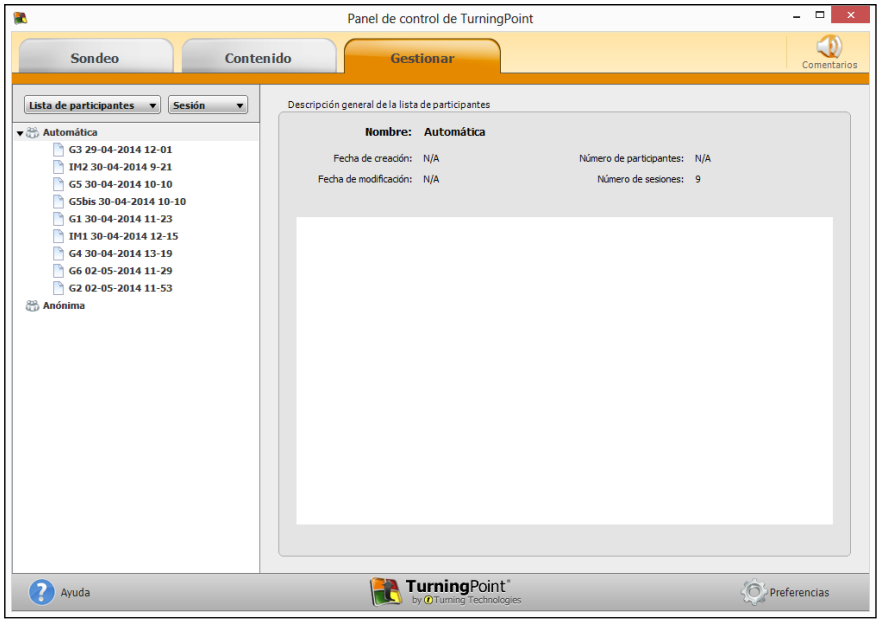


Figura 2. Software TurningPoint.

La metodología para la evaluación individual, empleando el sistema de Turning Technologies tal vez sea la más imparcial a la hora de evaluar a los estudiantes. Por otro lado es la que aporta mayor objetividad y menor tiempo requiere. En comparación con las entrevistas personales se pierde la percepción del profesor al hablar con los alumnos así como competencias importantes para el alumno, como hablar en público.

5. Valoración del nuevo sistema propuesto

Una de las principales preocupaciones a la hora de implementar los nuevos métodos es la carga de trabajo del alumno. El sistema de evaluación está diseñado para que el alumno dedique 2 horas al trabajo autónomo cada semana. Se realiza una encuesta al finalizar el curso 2013-2014 para que el alumno pueda valorar el tiempo dedicado a Ingeniería Térmica I y compararlo con el tiempo que dedicaría a una asignatura de dificultad similar que siga un método clásico de evaluación por parciales.

En el histograma de la figura 3 se muestran las horas de dedicación a la materia durante el curso (exámenes parciales o nuevos métodos propuestos). El tiempo medio dedicado utilizando los nuevos métodos es de 18,3 horas, mientras que el tiempo medio por parciales es de 23,7 horas, un 29,5% más que con los nuevos métodos. Esto puede ser debido al mayor aprovechamiento del tiempo de clase para la comprensión de los conceptos.

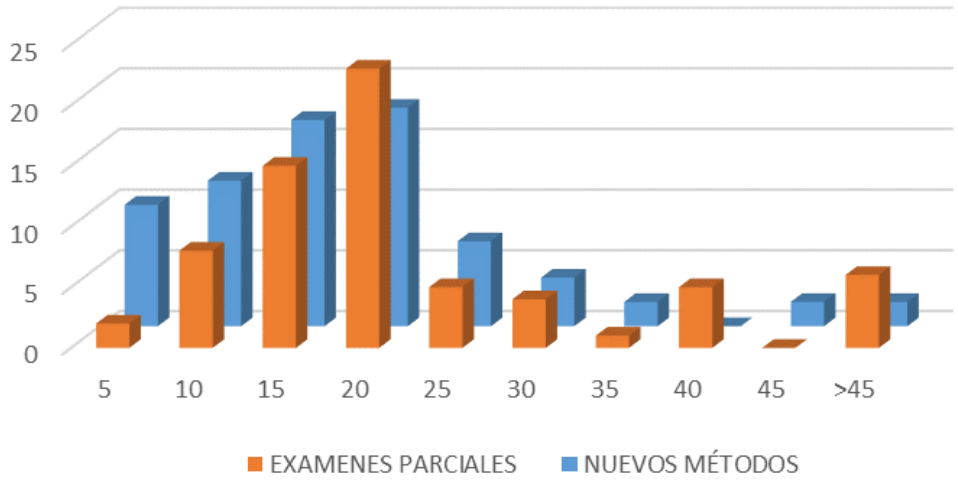


Figura 3. Histograma de resultados de la encuesta (en horas).

6. Rediseño de la metodología

Con la experiencia obtenida durante el curso 2013-2014 se ajusta la metodología docente para el curso 2014-2015. La metodología de evaluación del curso 2014-2015 se muestra en la tabla 3.

Metodología	Cantidad	% Nota evaluación continua
Prueba Final (PF)	1	40%
Controles Teóricos (CT)	3	30%
Memorias de Prácticas (MP)	5	10%
Evaluación en Seminarios (ES)	4	20%

Tabla 3. Metodología de evaluación final

Durante el curso 2013/2014 se introducen las nuevas actividades con unas frecuencias excesivamente altas. Se llevan a cabo 5 ítems de evaluación de cada una de estas nuevas actividades, cuando originalmente el alumno apenas realizaba dos exámenes parciales durante el curso. Es cierto que la intensidad de estas actividades era baja, pero, como se demostró más tarde, la alta frecuencia suponía una fuente de estrés demasiado alta para el alumno.

El examen final sufre un ajuste en su ponderación, pasando del 50% al 40%, debido a la creciente confianza en el modelo implementado.

Además de esto se modifican algunos aspectos de las actividades, como se muestra a continuación.

6.1. Controles teóricos de elección múltiple

La principal contrapartida de esta herramienta está en la percepción del alumno, que siente que se le está examinando continuamente y le resulta difícil regular el nivel de estrés asociado a la prueba, aunque esta tenga un peso muy bajo en la evaluación total. Además, el número de preguntas de cada prueba es bajo, lo que hace que la fiabilidad de las notas con menor porcentaje agregado (los primeros controles) sea también baja. Todos estos motivos, unidos a la percepción del alumno que siente que se le está "continuamente examinando" se modifica esta actividad para el curso siguiente.

En el curso 2014/2015 se mantienen estos controles pero se baja su frecuencia a 3 tests a lo largo del curso. Se intenta que el primero sea en la tercera o cuarta semana para evitar que los alumnos se descuelguen de la materia. Además se incrementa un 10% el peso de esta actividad, que se sustrae directamente del examen final. Se mantienen las preguntas con 4 opciones de las cuales solo 1 es la correcta, pero el número de preguntas por test se incrementa a 15-20. Cada test tiene ahora un peso del 10% en la nota final.

6.2. Memorias de Prácticas

Las memorias de prácticas se mantienen tal y como están, ya que tampoco sufrieron modificaciones durante el curso anterior.

6.3. Evaluación en seminarios

Cada una de las técnicas propuestas anteriormente se empleó en un seminario diferente, algunas de ellas en más de uno. Al finalizar el curso 2013-2014 se decide que la metodología más adecuada para el uso en seminarios es el test interactivo.

En el curso 2014-2015 se utiliza únicamente esta última técnica aunque la frecuencia de las evaluaciones disminuye ligeramente (de 5 a 4), aunque mantiene su peso en la nota final. También se modifica en este curso el tamaño de los grupos, convirtiéndose en parejas. Al reducir el tamaño de los grupos, se decide puntuar con un peso mayor el trabajo colectivo, invirtiéndose los porcentajes del curso anterior. Así, el trabajo grupal se evalúa con un 60% de la nota, mientras que el 40% restante se destina al dominio del ejercicio de cada uno de los miembros.

7. Conclusiones

La experiencia de los últimos tres cursos ha llevado a una evolución en los métodos docentes y de evaluación de la materia de Ingeniería Térmica I en el Centro Universitario de la Defensa de Marín, hacia un sistema de aprendizaje basado en problemas. La variedad de actividades de evaluación introducidas, y su ajuste en el tiempo para adaptarse a la idiosincrasia del Guardiamarina de 1º, hacen de esta evolución una positiva experiencia de cara a una mayor convergencia hacia los métodos europeos del Espacio de Educación Superior.

En aras de la mejora continua se pretende realizar una revisión del sistema para el nuevo curso 2015-2016. En este curso se introducirán cambios en las clases teóricas, introduciendo actividades de trabajo en grupo en las mismas. Así mismo se pretende extender este tipo de metodologías a otras materias.

Agradecimientos

A los compañeros y alumnos de la ENM que han colaborado en la implementación de esta nueva metodología.

Referencias

1. Gibson, I.S. Assessment in engineering education. A European perspective. *International Journal of Engineering Education*, **2002**, 18(4), 465-471.
2. Drennan, L.T., Beck, M. Teaching quality performance indicators -key influences on the UK universities´ scores. *Quality Assurance Education*, **2001**, 9(2), 92-102.
3. Felder, R.M., Brent, R. How to improve teaching quality? *Quality Manage J.*, **1999**, 6(2), 9-20.
4. Canto, S.P. Redesign of syllabus and evaluation procedures to improve university teaching in subjects related to industrial engineering in the context of the European Higher Education Area. *International Journal of Engineering Education*, **2010**, 26 (4), 974-984.
5. Garmendia, M., Guisasola, J., Barragués, J.I., Zuza, K. ¿Cuánto tiempo dedican los estudiantes al studio de asignaturas básicas de 1º de ingeniería? *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales*, **2006**, 20, 89-103.
6. López-Paniagua, I., Nieto-Carlier, R., Rodríguez-Martín, J., González-Fernández, C., Jiménez-Álvaro, A. Practical sessions: A key tool for teaching in the European Higher Education Area framework. *DYNA*, **2011**, 86 (5), 523-530.
7. Sitio Web de Turning Technologies [en línea]: http://www.turningtechnologies.com/ Consultado el 22 de diciembre de 2014.

Aplicación de herramientas Lean y el CUD de la ENM: generación de valor y reflexiones de benchmarking

Arce Fariña, Elena [1]; Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier [1,*]; Rey González, Guillermo [1]; Álvarez Feijoo, Miguel Ángel [1]

[1]Centro Universitario de la Defensa (CUD), Escuela Naval Militar (ENM), Plaza de España 2, 36920, Marín. Emails: elena.arce@cud.uvigo.es (M.E.A.F.), fjavierrodriguez@cud.uvigo.es (F.J.R.R.), guillermo.rey@cud.uvigo.es (G.R.G.), alvarezfeijoo@cud.uvigo.es (M.A.A.F.)

***** Autor Principal y responsable del trabajo.

Abstract: Los Centros Universitarios de la Defensa (CUD) poseen una serie de factores condicionantes peculiares respecto a otros centros universitarios que implican focalizar la atención y los esfuerzos hacia: la organización docente, la transmisión de conocimientos de modo eficaz, la generación de motivación hacia el estudio, la evaluación del nivel de formación alcanzado por los estudiantes y el diagnóstico del grado de cumplimiento de objetivos docentes. El proceso docente en el CUD de la Escuela Naval Militar (ENM) se caracteriza por: la priorización de la compresión de conceptos, los programas docentes diseñados tanto para proporcionar la capacidad de adquirir competencias como para preparar para saber hacer, la implantación de un *Plan de Acción Tutorial* (PAT) como un instrumento a través del cual el alumno se convierte en el centro de la actuación docente y el desarrollo de pruebas de evaluación continua. Esta actuación del CUD-ENM implica, de modo implícito, la aplicación de metodologías Lean, pues aplicadas a la formación superior consisten en identificar y eliminar todo aquello que no añada valor al proceso. La presente comunicación refleja algunas de las líneas diferenciadoras abordadas en el Centro Universitario de la Defensa de la ENM y su relación con el pensamiento Lean, y muestra un ejemplo del aspecto anteriormente indicado, mediante un análisis estructurado en cuatro etapas.

Keywords: metodologías Lean, plan de acción tutorial, evaluación continua.

1. Introducción

Los Centros Universitarios de la Defensa (CUD) poseen una serie de factores condicionantes peculiares respecto a otros centros universitarios que implican, probablemente en mayor medida, focalizar la atención y los esfuerzos hacia:

- la organización docente.
- la transmisión de conocimientos de modo eficaz.
- la generación de motivación hacia el estudio.
- la evaluación del nivel de formación alcanzado por los estudiantes.
- el diagnóstico del grado de cumplimiento de objetivos docentes.

El proceso docente en el CUD -ENM se caracteriza, entre otros aspectos, por:

a) La **priorización de la compresión de conceptos** y la creación de buenos entornos para el aprendizaje, bajo la premisa de que enseñar no es meramente transmitir conocimiento y reconociendo que la docencia no es solo dar clases magistrales, sino ayudar y animar a los estudiantes a aprender [1].



Figura 1 Alumnos de primer curso de grado del CUD-Marín en una clase teórica

b) Los **programas docentes** se diseñan tanto para proporcionar la capacidad de adquirir competencias como para preparar para saber hacer.

c) La implantación, desde el curso 2010-2011 y en colaboración con la ENM, de un ***Plan de Acción Tutorial*** (PAT) como el instrumento a través del cual el alumno se convierte en el centro de la actuación docente, pues permite ejecutar distintas medidas de gestión relativas a la orientación académica personalizada y al seguimiento integral.

d) El desarrollo de **pruebas de evaluación continua**. Ken Bain, director del Center for Teaching Excellence de la Universidad de Nueva York [2], refleja cómo éstos reconocen que el aprendizaje es permanente y hacen exámenes de conjunto, globales, de forma que cada prueba reemplaza a la anterior, y el examen final incluye toda la asignatura, de forma que los alumnos perciben que tienen varias oportunidades para aprender, estimulando también a aquellos que suspenden los primeros exámenes parciales.

Esta actuación del CUD-ENM implica, de modo implícito, la aplicación de **metodologías Lean**, pues el pensamiento Lean (procedente de la estandarización en las organizaciones de los principios que rigen el sistema de producción de la empresa Toyota, TPS o Toyota Production System) tiene como objetivo **elevar la eficiencia** a través de la reducción sistemática de las actividades que, consumiendo recursos, no generan valor apreciado por el cliente (desperdicio) **[**3]; definiéndose "***valor***" como todo

aquello que el cliente requiere, que forma parte de las características de un bien o servicio que son consideradas importantes por este.

2. Objetivos

En los últimos años, se viene observando que las universidades (definidas como instituciones que producen y transmiten la cultura por medio de la investigación y la enseñanza) están dando los primeros pasos en la aplicación de metodologías Lean (tales como la Universidad de Wisconsin-Madison, la Universidad de Cardiff, la Universidad JiaoTong, la Universidad de St Andrews y la Universidad de Oklahoma Central). Para ello, y bajo la premisa de que la aplicación del pensamiento LEAN a la formación superior supone identificar y eliminar todo aquello que no añade valor al proceso, en los centros anteriormente mentados se constituyeron equipos de proyecto que fueron capaces de eliminar los tiempos ocupados en procesos innecesarios, permitiendo focalizar los esfuerzos en la docencia. Los equipos desarrollaron proyectos que involucran a todas las asignaturas y departamentos permitiendo analizar la situación actual, y definir las actuaciones necesarias para alcanzar el estado futuro deseado. Es fundamental que los equipos permitan promover un ambiente de trabajo en el que los integrantes de los mismos se encuentren con libertad de proponer e innovar.

Está demostrado que muchas de las herramientas desarrolladas para apoyar la implantación en las empresas de metodologías Lean pueden ser usadas en el ámbito educativo [4]:

- El **diagrama de Ishikawa** puede ser utilizado para analizar una posibilidad de mejora o analizar una carencia en la formación detectada en la salida de los alumnos de la institución.
- El **análisis de las 5S** permite eliminar lo innecesario de los planes formativos y crear estándares de formación y mejora
- El **mapa de flujo de valor** (VSM) permite crear un esquema en el que podamos distinguir las tareas necesarias (que aportan valor o que no lo hacen) y las actividades innecesarias. Con este mapa, se podrá establecer un plan de mejora y mantener actualizada la situación actual y la final deseada.
- El **análisis 6Sigma** implica un control estadístico del proceso de mejora, permitiéndonos conocer el grado de mejora continua alcanzado.

La presente comunicación refleja algunas de las líneas diferenciadoras abordadas en el Centro Universitario de la Defensa de la ENM, Centro adscrito a la Universidad de Vigo y su relación con el **pensamiento Lean aplicado a la formación superior,** mediante un el análisis estructurado en cuatro etapas: identificación de lo que los estudiantes esperan del proceso formativo, cálculo del valor de la formación, identificación de todos los pasos del proceso y, por último, utilización de técnicas Lean para generar soluciones y mejorar el rendimiento futuro del proceso.

3. Sobre la calidad docente universitaria y su aplicación en el CUD de la ENM

3.1. El profesor preocupado por su calidad docente

Ken Bain durante años se dedicó a buscar y estudiar a los mejores profesores de los Estados Unidos, y en el libro "Lo que hacen los mejores profesores universitarios" [2] presenta una síntesis del *modus operandi* de estos grandes profesores que consiguieron que sus alumnos, además de aprender, los considerasen una guía, modelo o una simple influencia positiva y un buen recuerdo para el resto de sus

vidas. No considera un buen profesor aquel que prepara bien a sus alumnos para el examen, sino aquel que consigue que sus alumnos valoren el aprender, que obtengan un pensamiento crítico y se enfrenten con creatividad y curiosidad a la resolución de problemas, con compromiso ético, además de amplitud y profundidad en el conocimiento específico [5]. En este sentido, el *CUD-ENM* desarrolla pruebas de evaluación continua (exámenes parciales y finales), exámenes ordinarios y exámenes extraordinarios. Su profesorado prioriza la compresión de conceptos y la creación de buenos entornos para el aprendizaje, bajo la premisa de que enseñar no es meramente transmitir conocimiento y reconociendo que la docencia no es sólo dar clases magistrales, sino ayudar y animar a los estudiantes a aprender [1]. La docencia de carácter magistral sabe administrarse dentro del contenido de las materias. Los programas docentes se diseñan tanto para proporcionar la capacidad de adquirir competencias como para preparar para saber hacer.

3.2. Impartición de la docencia

Las clases se caracterizan por su alto grado de participación, colaboración y practicidad. En el CUD-ENM se diferencian tres metodologías docentes que se imparten de modo alternativo: *clases de teoría en las aulas, clases de prácticas en laboratorio y clases de seminarios para grupos muy reducidos* (a modo orientativo, la Universidad de Stanford posee un ratio de profesores por alumnos de 12 y está situada en el segundo puesto el Ranking de Shanghái del año 2014), *sin olvidar la permanente disposición de dudas personales en los despachos.*



Figura 2 Alumnos de primer curso de grado del CUD-ENM en un seminario

3.3. La iteración profesor-alumno: El Plan de acción tutorial

El CUD-ENM consideró imprescindible la implantación de un *Plan de Acción Tutorial* (PAT), el cual se configura como el instrumento a través del cual se diseña el contenido y la ejecución de las distintas acciones relativas a la Orientación académica. Es, asimismo, un proceso de seguimiento integral, siendo necesaria la colaboración con la ENM. Se pretende un adecuado equilibrio entre las expectativas de los alumnos y los objetivos que se exponen en el marco del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES). Los datos de la evaluación constituyen un elemento para la reflexión.

4. Trabajo práctico desarrollado

4.1. Antecedentes

Lean se basa en una serie de **principios**, sin los cuales no podría funcionar, destacando, la **mejora continua,** según la cual los integrantes de la organización deben esforzarse en alcanzar la perfección de forma indefinida, la **participación de todo el personal**, como la única forma de utilizar todo el potencial y poder obtener resultados al máximo nivel y la mencionada **eliminación o reducción de los desperdicios** [6]. Las mejoras introducidas por procesos de mejora continua no podrían desarrollarse sin la creación del *Empowerment*, implicación de los trabajadores de todos los niveles de la organización para poder de tomar decisiones. Aspecto que investigadores universitarios detectan como decisivo. Por ello, proponen la formación en los ***grupos kaizen*** (grupos de trabajo para la resolución de determinados problemas o para la detección de mejoras susceptibles de ser empleadas). A continuación se establece como se relacionan los principios que rigen la metodología Lean con las actividades que se podrían desarrollar dentro de la metodología docente.

1	Definir el valor desde la perspectiva del cliente. El valor solamente puede definirlo el cliente final, y como es sabido, debe ser conseguido al precio y en el plazo acordado.	El valor para la sociedad será entregar unos alumnos con los conocimientos y competencias requeridos a través de los planes de estudios. Es decir, la universidad debe formar a los alumnos en los principios Lean.
2	Identificar el flujo de la cadena de valor. En este flujo se hará mención solamente a las tareas necesarias (que aportan valor) que permiten conseguir la formación con los objetivos indicados	El flujo de cadena de valor estará formado por las acciones que permitan a un alumno de nuevo ingreso alcanzar los conocimientos y competencias necesarios, interrelacionando las formaciones regladas a través de las asignaturas con las actividades que le permitan alcanzar las competencias transversales necesarias para cualquier profesional
3	Optimizar el flujo de valor. Dado que no disponemos de medios materiales, técnicos y humanos ilimitados, deberemos intentar reducir progresivamente la cantidad de medios utilizados para alcanzar los objetivos propuestos	Una vez conocida la cadena de valor, necesitaremos eliminar los contenidos innecesarios (aplicando la técnica 5S), duplicados, etc. que suponen un desperdicio en el proceso actual
4	Permitir que el cliente "tire" (pull), de manera que obtenga los alumnos formados en el momento y número en el que son requeridos	En vez de partir de la idea que la universidad tiene de cómo debe ser el producto entregado a la sociedad, debe ser ésta la que defina cuántos profesionales necesita de cada perfil y de las características de dicho perfil. Será a partir de ese número y características cuando se definirán el último curso, el penúltimo, etc., así hasta unir el producto final con el estudiante de primer curso
5	La búsqueda de la perfección. Una vez conocidos de manera exacta los requisitos del cliente se deben utilizar métodos de medida de la mejora temporal de nuestros procesos en la búsqueda de su cumplimiento	Los sistemas de calidad de la universidad deben medir el grado de cumplimiento de los requerimientos del cliente, así como del grado de cumplimiento de los mismos

Tabla 1. Principios metodología Lean y actividades metodología docente.

Una de las principales características de Lean es el empoderamiento de todos los actores implicados en el proceso [6,7]. Los alumnos, actor principal de su propio proceso de aprendizaje, deben participar en la identificación de los puntos de mejora en su formación. Es por ello que en este trabajo se pretenden analizar diversos aspectos de la formación de un alumno desde diferentes puntos de vista, entre los que destacan: qué aspectos son percibidos por el propio alumno como parte de la cadena de

valor de su formación y cómo se pueden optimizar y/o reorientar los recursos disponibles para mejorar el proceso de formación.

4.2. Objetivos del trabajo práctico

En el diseño de este trabajo se plantearon los siguientes objetivos:

- Analizar el grado de utilidad percibida por los alumnos en relación a la docencia recibida
- Conocer el número de horas semanales dedicadas al estudio de las materias
- Calcular el valor de la formación
- A través de la metodología Lean generar soluciones de mejora del proceso formativo

4.3. Descripción del proceso desarrollado

Uno de los apartados fundamentales de cualquier diseño didáctico es el referido a cómo se enseñan los contenidos de la materia. Para lo cual, en el grado de Ingeniería Mecánica que se imparte en el CUD-ENM se ha propuesto la utilización de cuatro metodologías docentes (Figura 1).

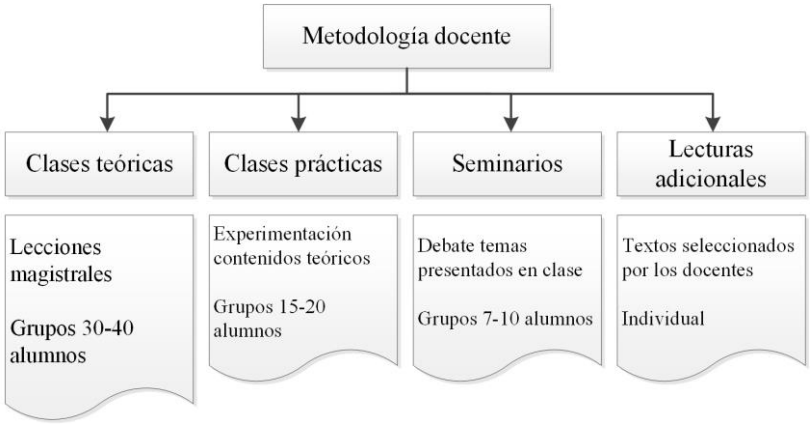


Figura 1: Metodologías docentes

Con el fin de conocer la opinión del alumnado en el presente trabajo participaron 22 estudiantes de la asignatura de *Ingeniería Térmica* y 30 de la asignatura de *Máquinas de fluidos*, ambas de tercer curso de grado. Se seleccionaron asignaturas de tercer año, por considerar que los alumnos de este curso ya tienen una opinión formada acerca de la docencia universitaria impartida en el centro. Se aplicó un cuestionario elaborado ad-hoc que evalúa la utilidad percibida por los estudiantes en relación a las asignaturas y que consta de 7 preguntas abiertas y una cuestión vinculada al número de horas semanales dedicadas a la asignatura (incluyendo dentro de éstas las horas presenciales: teoría, práctica y seminarios). Para la elaboración del cuestionario se tomó como referencia el cuestionario elaborado por Mazur para evaluar la satisfacción del alumnado con la docencia [8].

	Pregunta
1	¿Qué espera aprender en esta asignatura?
2	¿Para qué cree que le van a servir los conocimientos aprendidos en esta asignatura?
3	¿Para qué le van a servir las clases de teoría? (¿Qué espera de las mismas?)
4	¿Para qué le van a servir las clases de prácticas? (¿Qué espera de las mismas?)
5	¿Para qué le van a servir las clases de seminarios? (¿Qué espera de las mismas?)
6	¿Para qué le van a servir los apuntes/libros de texto? (¿Qué espera de los mismos?)
7	Algún comentario que crea importante añadir de cara la mejora de la dinámica de esta asignatura

Tabla 2. Cuestionario utilidad percibida de la docencia.

El pase del cuestionario de actitudes hacia el uso de metodologías docentes fue realizado tras finalizar la última sesión práctica (Tabla 2). Una vez recogidos los cuestionarios y transcritos, se llevó a cabo un análisis preliminar de la información en base al modelo de análisis cualitativo de Strauss & Corbin [9]. El objetivo de estos cuestionarios es tratar de mejorar la correspondencia entre las metodologías docentes utilizadas y las preferencias de los alumnos en su aprendizaje. Una vez aplicados los cambios propuestos deberá realizarse un seguimiento, a través de nuevos cuestionarios, que permitan conocer el nivel de desempeño y satisfacción de los alumnos.

4.4. Conclusiones particulares del estudio

Los resultados del cuestionario que han respondido los alumnos muestran algunos de los enfoques hacia los cuales se debe orientar en proceso de enseñanza-aprendizaje basado en la filosofía Lean. Así, los alumnos consideran esencial la clase teórica para entender los conceptos y los procesos. Los seminarios también son importantes para aplicar los conceptos y resolver problemas de la asignatura. Sin embargo, en lo referente a las clases prácticas éstos consideran que, aunque les sirven para conocer experimentalmente mecanismos y máquinas, se deberían reducir las horas en favor de clases de seminarios, puesto que los problemas que se plantean y resuelven son de mayor utilidad de cara a la evaluación.

Un punto al que se le ha prestado especial atención son las sugerencias que han proporcionado. Destacan: La necesidad de que la presentación de los contenidos no sea tan rápida y la particularidad de que en este centro coexisten simultáneamente la enseñanza de un grado universitario con formación militar. Lo cual implica una dificultad añadida a los alumnos, que ven reducidas sus horas de estudio no presenciales.

Como soluciones a estos dos problemas esenciales planteados se propone la creación de equipos Lean de proyecto que puedan abordar la mejora continua de la organización desde una perspectiva global eliminando muda y permitiendo a la universidad centrarse en la enseñanza y en la investigación.

Además, y tal como han indicado en muchas encuestas los alumnos, las asignaturas del grado de Ingeniería Mecánica tienen contenidos que pueden ser considerados "muda" (e.g. contenidos duplicados o innecesarios en la consecución de las competencias correspondientes a la materia evaluada).

Entre las posibles soluciones propuestas para las clases teóricas:

- Generar debates: iniciar la clase con un breve y atractivo sumario o con un relatorio de preguntas; usar en la presentación ejemplos prácticos y formular preguntas (o lo que es lo mismo, guardar una relación adecuada entre los niveles de abstracción y de concreción); alabar a los alumnos participativos; y, para terminar, abrir un turno de preguntas.
- Entregar al inicio de la exposición de cada tema un guion-esquema de sus contenidos acompañado de las referencias de la bibliografía seleccionada para su estudio con lo que se pueden lograr dos efectos importantes: se proporciona al alumno una impresión global de los contenidos a que se van a enfrentar y, por otra parte, el alumno sabrá inmediatamente y con toda claridad y exactitud cuál es el artículo, capítulo, etc. que contiene los conocimientos que debe aprender.

Y para las clases prácticas:

- Realizar un seguimiento individualizado del alumno, aunque éste trabaje en grupo, a fin de comprobar contigua y contingentemente los logros y, sobre todo, los déficits en la comprensión y/o manejo de los contenidos y aplicaciones tratadas. En las mentadas asignaturas se concreta en el diseño de diferentes informes explicativos de procesos.

5. Conclusiones generales

La participación activa del profesorado en el proceso de enseñanza-aprendizaje constituye uno de los pilares sobre los que se sustentan los nuevos planes de estudio según las directrices del EEES, lo cual exige el análisis del proceso de formación del alumnado. En este sentido, mediante un estudio práctico se ha demostrado como la filosofía Lean constituye una herramienta que permite a las instituciones determinar si responden de manera adecuada a las necesidades y expectativas de aquellos a los que se dirigen, y que, posteriormente, pueden, si lo creen necesario tras un estudio de los grupos de participación, identificar y diagnosticar los elementos aportados actualmente que no generan valor.

Las etapas en las que se estructuró el análisis fueron cuatro: identificar lo que los estudiantes esperan del proceso formativo en las asignaturas de Ingeniería Térmica y Máquinas de Fluidos del Grado en Ingeniería Mecánica, calcular el valor de la formación, identificar todos los pasos del proceso y, por último, utilizar técnicas Lean para generar soluciones y mejorar el rendimiento futuro del proceso. Se identificaron cuatro categorías de desperdicio: personas, procesos, información y activos. Los resultados de este estudio reflejan, además, como el CUD-ENM, ante los factores peculiares condicionantes que posee, aplica una serie de líneas de actuación docentes, someramente descritas, que cumplen de modo amplio las directrices establecidas en el EEES generado por el Proceso de Bolonia, y que permiten, a partir de ellas, potenciar las metodologías Lean aplicadas a la formación superior.

Referencias

[1] Finkel, D. L. Teaching with your mouth shut. Portsmouth, NH: Boynton/Cook, 2000..

[2] Bain, K. Lo que hacen los mejores profesores de universidad. Universitat de València, 2006.

[3] Araújo, P. Universidades Lean: Contribución para la reflexión. Revista de la educación superior, 2011, 40, pp.135-155.

[4] Balzer, W.K. Lean higher education: Increasing the value and performance of university processes. New York: CRC Press, 2010.

[5] Dym, C., Agogino, A., Eris, O., Frey, D., Leifer, L. Engineering design thinking, teaching, and learning. Journal of Engineering Education, 2005, vol. 94, pp. 103-120.

[6] Emiliani, M.L. Origins of Lean management in America: the role of Connecticut businesses. Journal of management History, 2006, vol. 12, pp. 167-184.

[7] Womack, J.P., Jones, D.T. Lean thinking: banish waste and create wealth in your corporation. New York: Simon and Schuster, 2010.

[8] Mazur, E. Peer instruction. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.

[9] Strauss, A., Corbin, J. Grounded theory methodology. An overview. En N. Denzin & Y. Lincoln (Eds.), Handbook of qualitative research (pp. 273-285). CA: Sage Publications, 1994.

Sesión II-F

Entorno, Sistemas y Modelado

Mejora continua de los procesos en organizaciones de Defensa.

Bellas Rivera Roberto[1,*], Rodríguez, Rodríguez, Francisco Javier [2]

[1] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. rbellas@cud.uvigo.es

[2] Centro Universitario de la Defensa de la ENM. fjavierrodriguez@cud.uvigo.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo

Abstract: Las organizaciones cuentan con unos recursos limitados y operan en un entorno difícil y competitivo. Necesitan medir su nivel de desempeño y mejorar continuamente sus procesos. Para conseguirlo, la mayoría de organizaciones de cierta dimensión han adoptado metodologías de excelencia en gestión y calidad siguiendo diferentes modelos que se inspiran en TQM (Gestión de la Calidad Total). En las últimas décadas, además de las metodologías de excelencia, se han difundido ampliamente el TPS (Toyota Production System), la filosofía Lean y diversas herramientas de mejora como Seis Sigma. La MCP (Mejora Continua de Procesos) se puede implantar mediante estas metodologías y como resultado, las organizaciones son más eficientes y aportan más valor a sus grupos de interés-stakeholders: Clientes, proveedores, propietarios, empleados y sociedad. Las organizaciones de Defensa de la mayoría de países occidentales no son ajenas a esta tendencia y han aplicado de alguna forma la Mejora Continua de Procesos para aumentar la eficiencia en los procesos clave y de soporte: Alistamiento, adiestramiento, adquisición de armamento, logística, administración, incluso los relacionados con Ciencia y Tecnología. El ajuste de los recursos, el déficit presupuestario, la profesionalización y la plena integración en organizaciones internacionales de defensa y seguridad ejercen presión en esta dirección de mejora continua y concentración en el valor. La clave es elegir el modelo de MCP que mejor se adapte a la organización e implantarlo con éxito.

Keywords: Procesos, Mejora Continua, Eficiencia, TQM, Valor, Excelencia, Organización de Defensa.

1. Introducción

Las primeras aproximaciones a la mejora continua aparecen en el siglo XIX: Incentivos a los empleados que incorporaban mejoras en sus tareas [1].

Durante la segunda Guerra Mundial, en EEUU el programa TWI (Training With Industry) buscaba aumentar la producción de armamento y suplir la ausencia de trabajadores experimentados que se alistaban. El programa fue un éxito: 1,6 MM de trabajadores sin experiencia recibieron formación certificada por TWI. Para ello se reclutó a una red de formadores profesionales que, entre otros aspectos, explicaban la importancia y los métodos de mejora continua [2]. Las ideas del programa TWI fueron recogidas por investigadores como W.Shewhart, W. E. Deming y J. Juran, que después de la 2ª G.M. impartieron formación a las industrias japonesas. Walter A. Shewhart, en 1939, creó el concepto de PDCA (Plan-Do-Check-Act) que es conocido también como ciclo de mejora continua o círculo de Deming, quien realmente lo dio a conocer. Deming promovió el ciclo PDCA como el principal método para conseguir la mejora continua, concepto que describía como [3]: "Iniciativas de mejora que incrementan el éxito y reducen los fallos".

A partir de entonces, se desarrolla en Japón en la década de los 50 un modelo de gestión de la calidad que introduce la idea de mejora continua: TQM (Total Quality Management). La Unión Japonesa de Científicos e Ingenieros (JUSE) [4] creó en 1951 el premio Deming dirigido a las empresas que mejor apliquen TQM. La filosofía TQM ha influido profundamente en el resto de modelos de mejora continua, entre ellos el TPS (Toyota Production System) promovido por Taichi Ohno, Vicepresidente Ejecutivo de dicha firma [5]. La metodología TPS busca un flujo continuo de producción que se ajuste de forma flexible a los cambios de la demanda. Para ello, se utilizan técnicas sistemáticas de mejora y participación de los operarios para reducir todos los tipos de desperdicio (muda en japonés).

Womack y Jones [6] [7] realizaron en los años 80 un estudio para el M.I.T. sobre la excelencia en fabricación de empresas mundiales acuñando el término Lean Manufacturing, que es una evolución del TPS y que se ha convertido en una filosofía de gestión de operaciones para todo tipo de organizaciones.

La metodología Seis Sigma creada por Motorola en los años 80, ha ganado popularidad desde su implantación en grandes empresas. Consiste en "un método organizado y sistemático para la mejora estratégica de los procesos y desarrollo de nuevos productos y servicios con una base estadística que busca reducir dramáticamente las tasas de defectos" [8]. El personal implicado se forma en herramientas de calidad y resolución de problemas como DMAIC (en inglés Definir-Medir-Analizar-Mejorar-Controlar) similar al ciclo PDCA.

Por otra parte, el modelo de calidad ISO 9000 elaborado por la ISO (International Organization for Standardization) es el conjunto de estándares internacionales para sistemas de calidad más difundido en el mundo. Las ISO9000 han evolucionado desde su creación y en el año 2000 se introdujo el concepto de mejora continua, siendo un requisito para la certificación de las organizaciones.

El modelo de excelencia más implantado en las grandes empresas europeas es el propuesto por la EFQM (European Foundation for Quality Management). Sirve como base para la evaluación de las empresas aspirantes al Premio Europeo a la Calidad (European Quality Award, EQA) y se ha convertido en la base para la mayoría de los premios nacionales y regionales a la calidad en Europa [9].

En Estados Unidos el modelo de excelencia Malcolm Baldridge es el más utilizado y como el EFQM establece una serie de criterios ponderados para facilitar la auto-evaluación y el benchmarking. [10]

2. Metodología

La metodología utilizada en el presente documento consistió en analizar los modelos de excelencia y mejora continua más difundidos y extraer los principios comunes que poseen y aplican para los procesos y actividades fundamentales: Planificación a largo plazo y operativa, gestión de RRHH, puesta en marcha de proyectos de mejora, control y medida de los resultados, realimentación y medidas correctoras. Finalmente se desarrolla una propuesta de aquellos principios comunes susceptibles de generar un modelo holístico de la Mejora Continua de Procesos en organizaciones de Defensa.

3. Resultados y Discusión

A continuación se analizan los principales factores constituyentes de los modelos más difundidos de mejora continua y se considera su aplicación a una organización de Defensa.

3.1. TQM y premio Deming

El premio Deming creado por la JUSE (Unión Japonesa de Científicos e Ingenieros) en 1951 [4] premia la excelencia en el desempeño de la filosofía TQM y contempla los siguientes principios: [11]

- Compromiso de la dirección: Planificar, gestionar, apoyar, revisar, informar.
- Potenciación de los empleados: Formación, trabajo en equipo, sugerencias, evaluación y reconocimiento de los éxitos.
- Decisiones basadas en hechos y datos: Emplea SPC (Control estadístico de Procesos), AMFE (Análisis Modal de Fallos y Efectos) y demás herramientas de la calidad.
- Mejora continua: Gestión por procesos, mediciones sistemáticas de desempeño, gestión de equipos de trabajo de excelencia, esfuerzos para implantar y mantener los estándares.
- Enfoque en el cliente: Colaboración con los proveedores, relación de servicio con clientes internos, no comprometer la calidad, estándares establecidos por los clientes.

Los criterios de la JUSE ponderan un 60% el proceso y 40% los resultados, están orientados a la medición de los procesos mediante técnicas estadísticas, aseguramiento de la calidad y mejora continua.

3.2. Conjunto de normas ISO9000, modelo de mejora continua ISO9004.

Las normas ISO 9000 [12] aportan considerables mejoras a las organizaciones que las adoptan con éxito, como se refleja ampliamente en las investigaciones sobre calidad y estudios empíricos [13] [14] sobre los beneficios al implantar de forma adecuada las ISO 9000: Procedimientos e instrucciones de trabajo estandarizados que favorecen la rotación y polivalencia del personal, se identifican las responsabilidades a la hora de realizar las tareas especificadas en los procedimientos eliminando duplicidades, retroalimentación de los usuarios gracias a modelos de evaluación y mejora continua, además del aumento de la satisfacción de los grupos de interés.

Dentro del conjunto de normas ISO 9000, la ISO 9004 "Orientación a la dirección para lograr un éxito sostenido" constituye una guía general para la mejora continua del sistema de gestión de la calidad a través de la orientación a la satisfacción del cliente. Sigue la estructura de la ISO 9001 pero, aunque aporta explicaciones, carece de indicaciones específicas para implementar el proceso de mejora.

La figura 1 representa el modelo de mejora continua de la ISO 9001 e ISO9004 en el que se puede apreciar la influencia del círculo de Deming, siendo sus pilares:

- Empuje, liderazgo y compromiso de la dirección (Capítulo 5).
- Participación de todo el personal de la organización en forma de: Comité de calidad, grupos de mejora, sugerencias individuales (Capítulo 6).
- Sistema de Información de Gestión de Calidad basado en indicadores cuantitativos con orientación a resultados (Capítulo 8 en la 9001/2008 y Capítulo 9 en la 9001/2015).
- Potenciación de los mecanismos de identificación de no conformidades (externas e internas), adopción de las correspondientes acciones correctivas, preventivas y de mejora (Capítulo 8 en la 9001/2008 y Capítulo 10 en la 9001/2015).

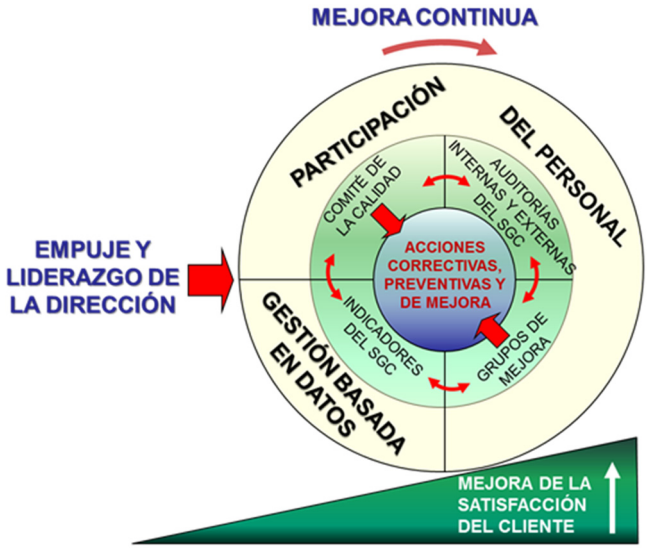


Fig.1. El modelo de Mejora Continua en la ISO9000 [15]

3.3. El modelo de excelencia EFQM

En 1988 se constituyó la European Foundation for Quality Management (EFQM), los socios iniciales fueron 14 grandes empresas y en la actualidad cuenta con más de 500 socios. La misión de EFQM es mejorar la competitividad de las organizaciones europeas buscando la excelencia en la gestión.

De los ocho conceptos principales que conforman el modelo EFQM 2013, la mayor parte están directamente relacionados con la MCP [9]: Añadir valor para los clientes, crear un futuro sostenible, desarrollar las capacidades de la organización, aprovechar la creatividad y la innovación, liderar con visión, inspiración e integridad, gestionar por procesos con agilidad, alcanzar el éxito mediante el talento, desarrollo e implicación de las personas y lograr resultados excelentes manteniéndolos en el tiempo.

En el modelo EFQM 2013 (Fig.2) los procesos son los medios con los que la empresa utiliza los recursos y la valía de las personas para producir resultados: Satisfacción del cliente, satisfacción de las personas e impacto en la sociedad. Los elementos facilitadores son el liderazgo que conduce a una planificación y estrategia adecuadas, gestiona personas, recursos y procesos.

Jane Schreurs afirma "El modelo EFQM es una herramienta para la auto-evaluación de la calidad que permite a una organización identificar sus fortalezas y debilidades y compararse (benchmarking) con otras organizaciones identificando las áreas de mejora". [16]



Figura 2. El modelo EFQM [9]

El modelo emplea para la mejora continua un esquema lógico que se denomina REDER (RADAR en inglés) y se suele representar en un círculo similar al PDCA de Deming, integrado por cuatro elementos: **R**esultados económicos y operativos, **E**nfoques (plan estratégico) que conduzcan a obtener los resultados requeridos, **D**esplegar (planes operativos, programas) los enfoques de manera sistemática para asegurar una implantación completa, **E**valuar y **R**evisar los enfoques utilizados basándose en el seguimiento y análisis de los resultados, estableciendo las mejoras que sean necesarias.

3.4. Modelo de excelencia Malcolm Baldrige.

El modelo Malcolm Baldridge [10] es el modelo de excelencia utilizado en Estados Unidos desde 1982 y es el marco de referencia para la evaluación de las empresas en el premio de calidad que lleva su nombre. Permite evaluar el desempeño en la excelencia de las organizaciones. Para ello establece siete criterios que, a su vez, se dividen en 19 subcriterios:

- Liderazgo, buen gobierno y responsabilidad social.
- Planificación estratégica.
- Orientación al cliente y al mercado.
- Medición, análisis y evaluación del desempeño, gestión de la información y del conocimiento.
- Orientación a las personas: Sistema de trabajo, aprendizaje, motivación y satisfacción.
- Gestión de los procesos, distinguiendo dos tipos: Creación de valor y soporte.
- Resultados: Productos y servicios, clientes, financieros, mercados, eficacia y liderazgo



Figura 3. Modelo Baldrige [10]

La base del modelo Baldrige (Fig.3) reside en la medición, análisis y gestión del conocimiento, de vital importancia para detectar defectos, ineficiencias y oportunidades de mejora. Los siete criterios se agrupan en dos tríadas: Procesos y resultados. Las ponderaciones de los criterios facilitan la auto-evaluación del desempeño y el benchmarking entre empresas. El Modelo Baldrige es compatible con la ISO 9000 y las metodologías Lean /Seis Sigma. La ISO 9000 contribuye a estandarizar y mejorar los procesos, por otra parte Lean/Seis Sigma contribuye a obtener los resultados esperados y proporciona métodos de resolución de problemas, en especial el DMAIC.

3.5. Aplicación a organizaciones de Defensa.

Aunque las organizaciones de Defensa presentan singularidades con respecto a las organizaciones civiles, entre otros aspectos: Misión, tipología de los RRHH y servicio proporcionado al cliente final, también buscan la gestión eficiente de los recursos y la Mejora Continua de Procesos.

3.5.1. Mejora Continua de Procesos en el Departamento de Defensa Americano.

El Departamento de Defensa americano (DoD) ha sido precursor de la mejora continua desde la implantación del programa TWI. En los años 80 ya se acometió un programa de TQM y se publicaron varias guías para su implantación [17]. En el año 2006 se emprendió un ambicioso programa de Mejora Continua de Procesos liderado por el Secretario de Estado de Defensa. Un año después se creó la Continuous Process Improvement / Lean Six Sigma Program Office [18] para facilitar la implantación de la mejora continua en todas las organizaciones que dependen del DoD.

El programa CPI/Lean Six Sigma contempla las siguientes etapas:

- Visión, misión y plan estratégico con objetivos en un horizonte de 5 años.
- Análisis del Mapa de la Cadena de Valor (VSM) en todos los niveles de la organización.
- Estructura organizativa: Líder, comité de gobierno, equipos de apoyo y grupos de trabajo.
- Fomento de la implicación de todo el personal, formación en herramientas de mejora DMAIC.
- Planes operacionales en cada una de las unidades responsables de un proceso.
- Medir el proceso y evaluar el cumplimiento de los objetivos.

Este programa se ha aplicado con éxito a los tres ejércitos y son numerosos los ejemplos de ello, según el DOD los beneficios desde su implantación ascienden a 5.000 MM de $, realizando 30.000 proyectos de mejora y formando a 20.000 personas en la metodología de mejora como la 6 Sigma [18].

3.5.2. Gestión por procesos en la Armada.

En la Directiva 02/2005 de 11 de marzo, del AJEMA, se establecen los procesos fundamentales y se adopta la gestión por procesos, posteriormente en la Directiva 02/2007 de 2 de abril se define el Modelo de Gestión por Procesos de la Armada. Desde el año 2008, con asistencia de una empresa de consultoría, se han identificado, mejorado y documentado la mayoría de los procesos, distinguiendo tres grupos: Fundamentales, clave y de apoyo, siguiendo el esquema de la cadena de valor de M.E.Porter [19].

Se han automatizado varios procesos y se tramitan mediante la intranet corporativa, gracias a ello los usuarios que participan en los procesos pueden acceder a la información de forma inmediata independientemente de su ubicación, con la consiguiente reducción de tiempo de procesamiento. Los procesos tienen asociados indicadores de rendimiento y el proceso PF-9 “Evolución de la Organización”,

establece la forma de analizar estos indicadores por parte del Estado Mayor de la Armada y sirve de orientación para el planeamiento del año siguiente. Como señala Juan Escrigas Rodríguez [20]: "Se ha mejorado la forma de analizar las actividades de la Armada, y se ha sistematizado el análisis para poder sacar conclusiones que nos permitan llevar a cabo una mejora continua".

3.6. Principios comunes para la implantación de la Mejora Continua por Procesos.

Los modelos de mejora continua y excelencia han evolucionado para incorporar elementos y criterios comunes, tal como se refleja en la siguiente tabla:

CRITERIOS	Capítulos o apartados donde aparecen los criterios				
	TQM/ Deming [21]	ISO9001/ 2015 [12]	EFQM [9]	M.Baldrige [10]	Lean 6σ [18]
Liderazgo, Compromiso	1	5.1.1	1.a, 1.b, 1.e	1.1	1.1
Política, Estrategia, Planificación	1, 10	5.2, 5.3, 6.2, 8.1	2.c	2.1, 2.2	1.4, 4.1, 5.1, 6.3
Enfoque al Cliente	1, 4, 5, 8	4.2, 7.2, 8.2.1, 9.1.2	5.c, 5.e	3.1, 3.2	1.7, 2.2
Gestión por Procesos	5, 8	0.3, 4.4	2.d, 5.a, 5.b	6.1, 6.2, 6.3	2.3
Formación y Aprendizaje	3	7.2	3.a, 3.b	5.2, 5.3	1.6, 3.1
Implicación y recompensa del Personal	3	7.3	3.c, 3.e	5.4	1.6, 1.9
Trabajo en Equipo	2, 3	7.1.4	3.c, 7.b	5.2	3.2
Información y conocimiento	4	7.5	4.e	4.1, 4.2	1.8
Infraestructura, Recursos	2	7.1.3, 7.1.4, 7.1.5	4.b, 4.c, 4.d	6.2	1.12, 3.3, 3.6
Métricas, Feedback	4, 7, 8, 9	9.1.3	6.a, 6.b, 7.a, 7.b, 8.a, 8.b, 9.a, 9.b	4.2, 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5	2.6, 7.1, 7.2
Mejora Continua	3, 6, 8	10.3	5.b	4.1, 6.1	8.1, 8.2, 8.5, 8.6

Tabla 1. Criterios de los modelos de mejora continua y excelencia

Por tanto, podemos señalar principios comunes susceptibles de emplearse para implantar un programa de mejora continua con éxito en organizaciones de Defensa:

a) Liderazgo de los niveles superiores visible en toda la organización. Su fuerte compromiso e implicación debe ser visible para el resto de la organización mediante acciones de comunicación, mostrando esta implicación acompañada de resultados en proyectos que se han desarrollado con éxito.

b) Plan de implantación de la mejora continua. Debe incluir un planeamiento estratégico para enfocar las actividades de mejora correctamente e integrarlas en los **procesos fundamentales**. Seguidamente se ha de desarrollar un planeamiento operacional para identificar proyectos que aporten los mayores beneficios. Estos proyectos de mejora implicarán a los **procesos clave** y de **apoyo** a lo largo de toda la cadena de valor. En los planes operacionales se debe establecer la estructura de **puestos y responsabilidades clave** involucrados total o parcialmente en la implantación, mantenimiento y seguimiento del proceso de mejora.

c) Estructura de objetivos, métricas e indicadores. Los objetivos que se persiguen en cada proyecto de mejora continua se medirán con métricas e indicadores que respalden los requerimientos de los grupos de interés (personal, niveles superiores, sociedad…). Los proyectos de mejora continua deben estar

orientados a los resultados, para asegurar el impacto óptimo en el flujo de valor: Reducción de los tiempos en los procesos y menor utilización de recursos para aumentar la efectividad.

d) Implicación y formación del personal. En línea con las metodologías de mejora más conocidas, en particular Seis Sigma [8], se necesita un grupo crítico de personal entrenado en la mejora continua para alcanzar el éxito en los proyectos. Las personas clave serán formadas en las herramientas básicas de mejora, como la DMAIC. Estas personas deben ocupar el destino durante dos o más años. Sería deseable mantener una clasificación en niveles según las capacidades y experiencia en mejora continua. Puede ser necesario disponer de asesores externos expertos en las fases iniciales. Pero el objetivo es que el propio personal de la organización obtenga la capacidad y experiencia necesaria para en un tiempo razonable tomar el control total del proceso recurriendo a asesores externos sólo en momentos puntuales.

e) Gestión del conocimiento, difusión y estandarización de mejores prácticas. Las mejoras alcanzadas deben formar parte de una base de datos de "mejores prácticas". Es posible que estas prácticas puedan estandarizarse en distintos procesos y procedimientos. La estandarización mejora la calidad y permite la rotación y polivalencia del personal, además constituye uno de los principios del TPS y filosofía Lean. Esto no es nuevo para las organizaciones de Defensa, ya que utilizan de forma intensiva la estandarización y normalización de comportamientos y procedimientos (sirva como ejemplo los D-CP, Manuales de Doctrina y Procedimientos de la Armada).

f) Medición de progreso y grado de madurez del programa de MCP. Se trata de medir el sostenimiento operacional del programa de mejora continua, las mejoras alcanzadas han de mantener operativas en el tiempo. Para ello, se debe proporcionar una serie de esquemas y checklists que serán utilizados por las distintas unidades organizativas para auto-evaluarse de forma periódica y darán una idea de la madurez y sostenibilidad del programa de MCP.

4. Conclusiones

El presente documento aborda los factores condicionantes de la filosofía de la mejora continua, para lo que se ha analizado su evolución desde los primeros tiempos hasta las metodologías más avanzadas que se utilizan en las organizaciones actuales. En este sentido, aunque existen muchas investigaciones sobre las metodologías y herramientas de MCP, se detecta un déficit sobre la aplicación de la MCP a organizaciones de Defensa, a pesar de su importancia estratégica, tamaño y presupuesto que manejan.

Se han identificado principios comunes para los modelos y herramientas más difundidos, los cuales son aportados detalladamente, comprobándose que es posible poner en marcha un modelo holístico que los incorpore y sea aplicado con éxito en organizaciones de Defensa, tal como se ha realizado en el programa CPI/Lean Six Sigma del Departamento de Defensa de EEUU [18] que se ha materializado en un gran número de proyectos de mejora finalizados con notables éxitos en reducción de costes, plazos y concentración en el valor de los servicios prestados a los combatientes en particular y a los grupos de interés en general.

Referencias

[1] D. Schroeder y A. Robinson, «America´s most succesful export to Japan: Continous improvement programs,» *Sloan Management Review,* vol. 32, nº 3, pp. 67-81, 1991.

[2] TWI Institute, 2015. [En línea]. Available: www.twi-institute.com.

[3] W. E. Deming, Out of the Crisis, Cambridge, Massachusets: MIT Press., 2000.

[4] Deming Prize Comitee- Union of Japanese Scientist and Engineers, «www.juse.or.jp,» [En línea]. Available: http://www.juse.or.jp/english/publications/. [Último acceso: 2015].

[5] T. Ohno, El Sistema de Produccion Toyota: Mas alla de la produccion a gran escala, Barcelona: Gestion 2000, 1991.

[6] J. Womack y D. Jones, Lean Thinking, NY: Simon & Schuster , 1996.

[7] J. Womack, D. Jones y D. Roos, The Machine That Changed the World, NY: Macmillan Publishing, 2000.

[8] K. Linderman, R. Schroeder, S. Zaheer y A. Choo, «Six sigma: a goal – theoretic perspective,» *Journal of Operations Management,* vol. 21, nº 2, pp. 193-203, 2003.

[9] EFQM, «An Overview of the EFQM,» 2013. [En línea]. Available: http://www.efqm.org/sites/default/files/overview_efqm_2013_v1.1.pdf.

[10] National Institute of Standards and Technology, «Baldrige Perfomance Excellence Program 2015-2016,» U.S.Department of Commerce, NIST., Gaithersburg, 2015.

[11] L. Martin, «Total Quality Management in the Public Sector,» *National Productivity Review,* nº 10, pp. 195-213, 1993.

[12] International Standards Organization, [En línea]. Available: http://www.iso.org/iso/iso_9000.

[13] ASQ Standards Group, «ISO 900:2000 Product Support Initiative. Web Survey Results,» Milwuake, 2004.

[14] Irwin Professional Publishing and D&B Information Services, «ISO 9000 Survey,» Chicago, IL, 1996.

[15] A. J. Fernández y R. Bellas, «Apuntes de Gestión de la Calidad, Seguridad y Medio Ambiente,» Universidad de Vigo, Vigo, 2013.

[16] J. Schreurs, «Total Quality Management Framework based on EFQM and Kirkpatrick models,» *iJET International Journal of Emerging Technologies in Learning,* vol. 1, nº 3, 2006.

[17] B. E. Mansir y N. R. Schacht, Total Quality Mngmt., Bethesda: Logistics Mngmt. Institute, 1989.

[18] CPI/LSS Program Office, «Continuous Process Improvement / Lean Six Sigma Guidebook,» Department of Defense, Washington, D.C., 2008.

[19] M. E. Porter, Estrategia Competitiva, Madrid: Ediciones Pirámide S.A., 2009.

[20] J. Escrigas Rodríguez, «La Gestión por Procesos en la Armada,» *Instituto Español de Estudios Estratégicos,* vol. 60, 2011.

[21] M. Zairi y M. A. Youssef, «Benchmarking critical factors for TQM,» *Benchmarking for Quality Management & Technology,* vol. 2, nº 1, pp. 5-20, 1995.

Desarrollo de un sistema de tomografía de muones para la detección de tráfico ilícito de material radiactivo oculto en contenedores.

Aguiar Fernández, Pablo [1] , Casarejos Ruiz, Enrique [2, *], Iglesias Lago, Alfredo [2] y Vilán Vilán, Jose Antonio [2]

[1] Grupo de Imagen Molecular, Fundación Ramón Domínguez. Santiago de Compostela.
[2] Grupo CIMA, E. de Ingeniería Industrial, Universidad de Vigo. Vigo.

* Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: e.casarejos@uvigo.es

Abstract: La detección de material nuclear especial (SNM) escondido en contenedores de carga es crucial para garantizar la seguridad nuclear. Las técnicas de detección pasiva de radiación (monitores gamma o de neutrones) pueden no detectar material blindado. Los rayos X de alta energía, gamma, o neutrones, permiten detectar material SNM oculto, pero requieren medidas de protección. Los materiales SNM y de blindaje, con alto número atómico (Z), producen gran dispersión en la incidencia de partículas subatómicas de alta energía como los muones (fondo de radiación natural de rayos cósmicos). Este efecto es la base de la técnica de inspección por tomografía de muones (MT: Muon Tomography), que permite detectar materiales de alto Z sin usar fuentes de radiación. La prueba de concepto ha sido demostrada en diferentes laboratorios. Los desarrollos iniciados en Los Alamos (LANL) han dado lugar a un prototipo de MT para inspección de contenedores de cargo. En Europa han surgido algunas iniciativas basadas en diferentes tecnologías de detección. En España, hemos iniciado actividades en esta línea en colaboración con centros de investigación internacionales. En esta contribución se describe el diseño del sistema de MT a desarrollar, junto con resultados de simulaciones preliminares del módulo de detección.

Palabras clave: tomografía de muones, inspección de cargo, END, detectores de radiación, tráfico de material nuclear

---

1. Introducción

La detección de armas nucleares y de material nuclear especial (SNM) como plutonio y ciertos tipos de uranio, escondido en contenedores de carga (automóviles o similar), es crucial para frustrar la proliferación nuclear y el terrorismo y garantizar la seguridad nuclear de todo el mundo.

Las técnicas de inspección mediante imagen radiográfica (radiografía o tomografía de rayos X o rayos gamma) pueden detectar un arma nuclear montada, pero no una pequeña cantidad de uranio altamente enriquecido (HEU), dependiendo de su tamaño y forma. Las técnicas de detección pasiva de radiación (monitores o portales detectores gamma o de neutrones) pueden no detectar material HEU con un ligero blindaje, dependiendo de la cantidad de material HEU, la presencia de trazas de uranio-232 (con emisión gamma de alta energía) o el tipo de blindaje. El uso de haces de rayos X de alta energía, de rayos gamma, o de neutrones, analizando efectos de atenuación y de inducción de procesos de fisión, permite detectar material SNM oculto, pero requiere medidas de protección que lo hacen complejo y poco práctico en muchas situaciones.

1.1. Principio de funcionamiento

Una propiedad común a los materiales SNM, y a los materiales de blindaje, es su alto número atómico (Z), por lo que estos materiales producen una gran dispersión en la incidencia de partículas subatómicas de alta energía como los muones (fondo de radiación natural de rayos cósmicos), en comparación con materiales de menor densidad e inferior Z. El análisis de este efecto es la base de la técnica de inspección por radiografía o tomografía de muones (MT: Muon Tomography), que permite la detección de materiales de alto Z sin el uso de una fuente de radiación, evitando problemas relacionados con riesgos de exposición a la radiación o de detonación del arma (salvage fuzing). Ver figuras 1 y 2.

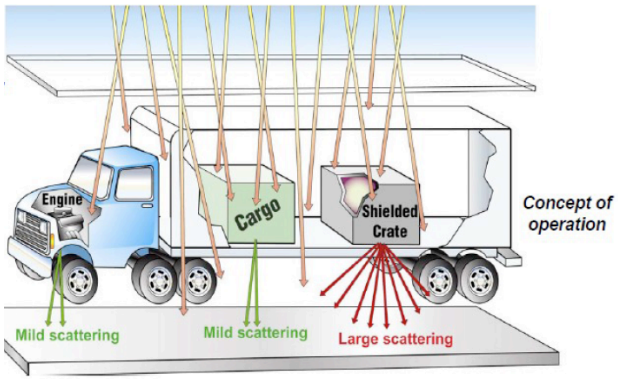


Figura 1. Los muones producidos en la atmósfera por rayos cósmicos (fondo de radiación natural), al llegar a la superficie terrestre son fuertemente dispersados en su interacción con materiales de alto número atómico, pero apenas son dispersados o atraviesan sin interaccionar materiales de bajo número atómico.

Las trayectorias del muon antes y despues de interaccionar y sufrir dispersión (múltiple) definen un ángulo de dispersión (medio), que viene determinado aproximadamente por la relación:

$$\theta_0 = \frac{14.1MeV}{\rho\beta}\sqrt{\frac{l}{X_0}}$$

Donde X_0 es la longitud de radiación del material (inversamente proporcional a Z), y p y β son el momento y velocidad del muón respectivamente.

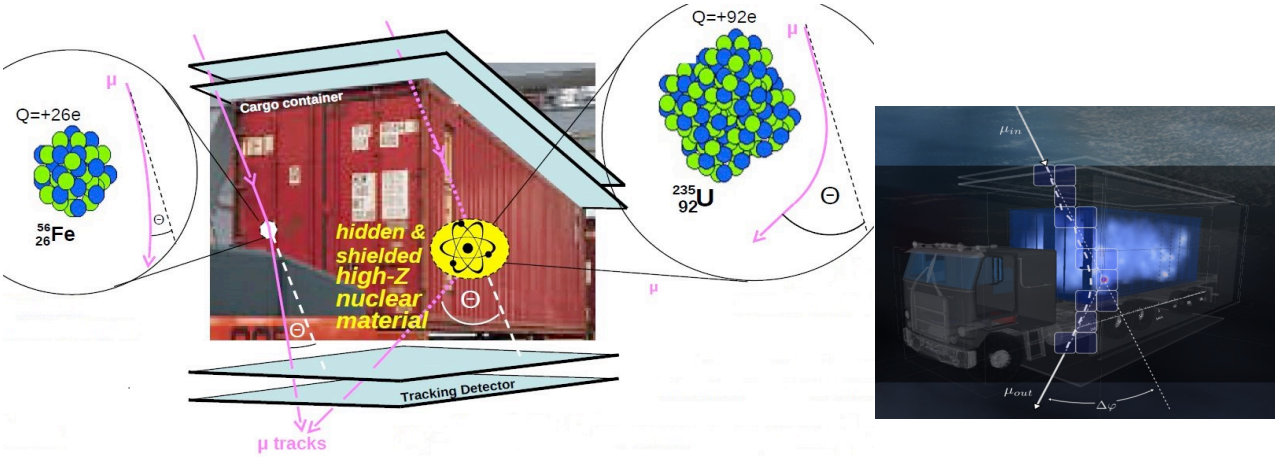


Figura 2. Izquierda: Las señales generadas en diferentes planos detectores por los muones permite reconstruir sus trayectorias (incidente y dispersada), calcular su ángulo de dispersión y estimar el valor de Z en el punto de dispersión. Derecha: Vistas de imagen tomográfica del volumen interior de un contenedor. La escala de colores representa un mapa 3D de valores de Z. El punto rojo indica la presencia de material de alto Z.

1.2. Estado del arte

La prueba de concepto ha sido demostrada en diferentes laboratorios en el mundo. Los desarrollos iniciados en el LANL (Los Alamos National Laboratory) han dado lugar a un prototipo de tomógrafo de muones (Muon Tomograph, MT) para inspección de contenedores de cargo actualmente en fase de evaluación en condiciones reales por la empresa Decision Sciences International Corporation (DSIC). Ver figura 3.



Figura 3. Proceso de escaneado de un trailer con contenedor de 12 metros, mediante tomografía de muones con el sistema Multi-Mode Passive Detection System (MMPDS) de Decision Sciences International Corporation (DSIC).

Recientemente han surgido algunas iniciativas de desarrollo de prototipos de MT basados en diferentes tecnologías de detección:

- En el centro INFN-Padova en Italia, basado en el uso de las cámaras de muones desarrolladas para el experimento CMS del CERN. Proyecto CMT (http://mutomweb.pd.infn.it:5210/?page_id=258).
- En el centro IHEP Protvino Rusia, basado en el uso de las cámaras de muones desarrolladas para el experimento ATLAS del CERN.
- En la universidad Carleton en Canada, basado en el uso de las cámaras de deriva. Proyecto CRIPT (http://www.physics.carleton.ca/cript)
- En la universidad de Bristol en UK, basado en el uso de cámaras de ionización tipo RPC.

En España, se han iniciado actividades en esta línea por parte de investigadores del grupo CIMA de la Universidad de Vigo (Uvigo) en colaboración con otros centros de investigación:

- Dip. De Física e Atrofísica de la Universitá de Catania (UniCT) y el Instituto Nationale di Astrofísica (INAF) en Italia,
- Centro de investigación Laboratorio de Instrumentaçao e Física Experimental de Partículas (LIP-Coimbra) en Portugal,
- Grupo ImaBio del centro de investigación Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC-CNRS) de Estrasburgo en Francia.

El objetivo de esta colaboración es desarrollar un prototipo de sistema de MT para la inspección de grandes volúmenes, basado en la utilización de recursos y experiencia previa de los miembros de la colaboración: en el desarrollo de detectores de muones de última generación (empleados en experimentos de física nuclear y de altas energías), de herramientas de simulación Monte Carlo de procesos de interacción radiación-materia, de algoritmos multivariable de determinación de trayectorias (muon tracking) y de algoritmos iterativos de reconstrucción tomográfica avanzada (empleados en imagen médica PET y SPECT).

2. Materiales y métodos.

2.1. Requerimientos del sistema detector de muones.

El objetivo de la propuesta es el desarrollo de un prototipo de sistema de tomografía de muones para la inspección de volúmenes significativamente grandes (>50m^3), capaz de funcionar con fiabilidad en condiciones reales de uso. Para ello, los principales requerimientos son:

- S*uficiente capacidad de reconstrucción de trayectorias de muones (muon tracking)*: La tomografía de muones se basa en la reconstrucción de trayectorias de muones incidentes en el objeto (volumen) de interés. La calidad de las imágenes obtenidas viene determinada por la resolución angular en el cálculo de trayectorias, y esta por la resolución espacial del detector de muones. Se considera que una resolución espacial del orden de pocos cm puede ser suficiente, en sistemas de alta aceptancia empleando varios planos de detección de gran tamaño (4 - 6 planos, de ~20m^2/plano).
- *Alta aceptancia (sensibilidad), y tiempo de escaneado reducido*: Dada la baja fluencia de muones a nivel de mar (1 muon/cm^2 cada minuto), y la necesidad de limitar la duración del proceso de escaneado, la aceptancia del sistema de detección (determinada por el área de

cobertura del detector) debe ser maximizada. Un área de detección de $20m^2$ permitiría obtener 1 millón de sucesos en 5 min (tasa de detección de ~3 KHz).

- *Diseño modular*: Teniendo en cuenta la necesidad de cobertura (y mantenimiento) de grandes áreas de detección es necesario la implementación de soluciones modulares.
- *Coste limitado*: El coste estimado de un sistema completo de tomografía de muones para contenedores debería de ser inferior a 1 M€. Este vendrá determinado fundamentalmente por el número de canales de lectura de señal necesarios (segmentación).
- *Robustez y funcionamiento estable en condiciones reales*: El sistema de detección (detectores, estructuras, conexiones, etc.) que conforma el tomógrafo para contenedores debe basarse en soluciones robustas, con funcionamiento estable en condiciones de variación de temperatura y estrés mecánico.

2.2. Propuesta de sistema detector de muones.

Convencionalmente, para realizar tracking de muones se han empleado planos de detectores de centelleo de plástico (cuadrados o barras) [1-4]. Los centelleadores de plástico requieren un mantenimiento mínimo, un número limitado de canales de lectura y son relativamente insensibles a las condiciones ambientales. Se han obtenido buenos resultados empleando barras de plástico centelleador, dependiendo del número de planos de detección y su tamaño de segmentación. Sin embargo, la resolución espacial viene limitada por su segmentación mecánica y la necesidad de un alto número de fotodetectores (canales de lectura). Recientemente, se ha propuesto el uso de detectores de alta resolución (cámaras de ionización gaseosa del tipo tubos de deriva o detectores de gas micro-estructurados, con resolución espacial submilimétrica) para Tomografía de Muones en aplicaciones de seguridad [5-7]. Pero el funcionamiento de estas sofisticadas cámaras gaseosas de gran tamaño no se ha mostrado fiable en condiciones reales de aplicaciones industriales. Las imágenes tomográficas obtenidas con muones para diferentes aplicaciones geofísicas [8] y de inspección de carga [9] poseen resoluciones de 5 cm/voxel, empleando barras de plástico centelleador de 3-5 cm de sección.

En nuestra propuesta se contempla la posibilidad de obtener valores de resolución espacial comparables (~ cm) utilizando planchas de plásticos de centelleo sin segmentar [10]. Previo al desarrollo de prototipos, se estudia el rendimiento básico esperado empleando herramientas de simulación Monte Carlo como GATE (Aplicación Geant4 por emisión de positrones: herramientas de simulación para PET y SPECT). Esta herramienta ha demostrado producir resultados fiables de simulación MC del funcionamiento de detectores de centelleo, incluyendo transporte óptico, y permite la integración de los resultados de bajo nivel en estructuras complejas de detección para el desarrollo de sistemas de tomografía [11]. Se plantea un concepto simple y robusto de módulo detector basado en el uso de un plástico centelleador cuadrado (BC-408, de 1m x 1m, y 2.5 cm de grosor), y componentes ópticos convencionales: tubos fotomultiplicadores pequeños (de 2.5-3.5 cm de diámetro), recubrimiento reflector (3M Vikuiti ESR, con reflectividad RC= 0.98) y gel de acoplamiento óptico (con índice n= 1.6). Consideramos un esquema de lectura de luz “tipo gamma-

cámara", con un conjunto de tubos fotomultiplicadores (PMT) uniformemente distribuidos acoplados a una cara del centelleador (ver figura 4).

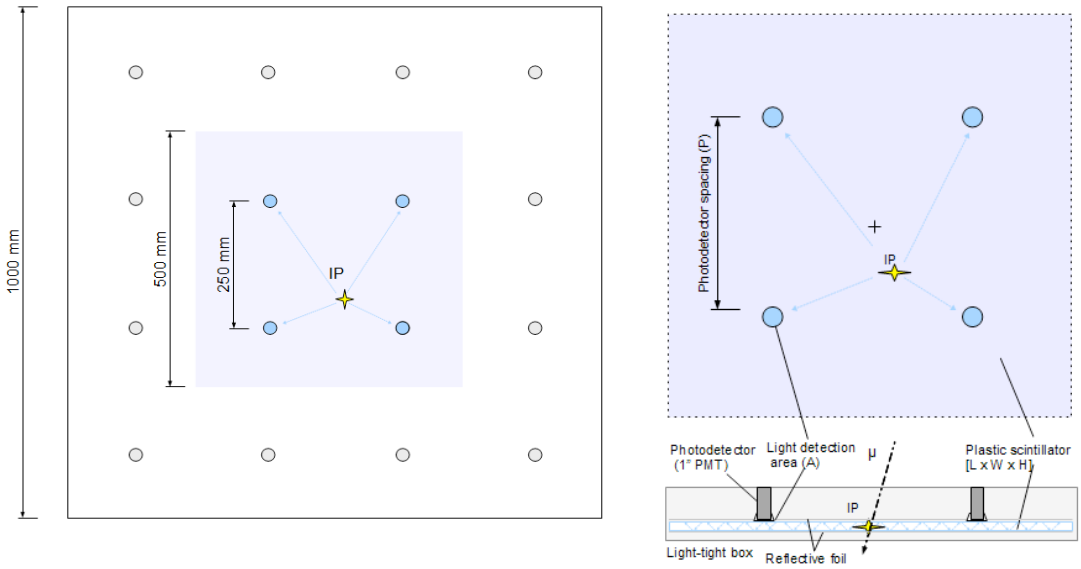


Figura 4. Izquierda: Esquema de disposición de lectura de luz en un plástico centelleador cuadrado (de 1 m x 1m, y aproximadamente 2.5 cm de grosor) empleando una distribución de en matriz cuadrada de fotomultiplicadores (PMTs) de aproximadamente 3 cm de diámetro, espaciados 25 cm. En el estudio MC de la respuesta del detector se ha considerado la zona central del mismo (50 cm x 50 cm, sombreado). Derecha: Esquema de la zona central y sección del detector mostrando los diferentes componentes del mismo.

El objetivo inicial es evaluar el módulo detector básico en términos de resolución espacial intrínseca, y su dependencia con los principales parámetros del montaje del detector (grosor del plástico centelleador, acabado de sus superficies o el tamaño del área activa de los PMT y su espaciamiento), como base para una primera estimación del rendimiento (y el coste) del sistema de detección de trayectorias de muones, en función del número de planos de detección y sus distancias relativas. En la figura 5 se muestra una posible configuración de sistema de detección de muones basado en múltiples módulos de detección como el propuesto.

3. Resultados y discusión

A partir de las simulaciones MC de la respuesta del detector [10], se han determinado los valores de los parámetros del montaje (rugosidad, grosor del plástico centelleador, índice de acoplamiento óptico) que maximizan la señal de detección de muones. Se ha caracterizado la función de respuesta de luz (Light Response Function, LRF) de los PMTs de la configuración de lectura propuesta. Los puntos de interacción de muones incidentes en la zona central del detector, se determinan empleando un simple calculo de centroide con las señales de los 4 PMTs más próximos (primera aproximación). A partir de la función de dispersión de los puntos de interacción (Point Spread Function, PSF), la distribución de interacciones de muones en la región central, se ha estimado una

resolución espacial intrínseca del detector de 1.2 a 1.3 cm (Figura. 6). Este resultado indica que se puede lograr una resolución espacial intrínseca del detector del orden de 1 cm, mediante la aplicación de métodos estadísticos avanzados (empleados en las actuales gamma-cámaras en Medicina Nuclear), como estimación de máxima verosimilitud o redes neuronales.

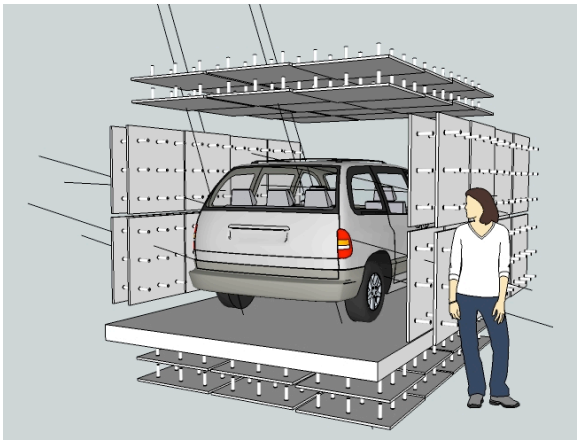


Figura 5. Recreación artística de una posible instalación de sistema de tomografía de muones para inspección de vehículos, basado en el uso de múltiples módulos de detección como el propuesto (paneles de plástico centelleador con lectura mediante matriz de PMTs) cubriendo el volumen de inspección.

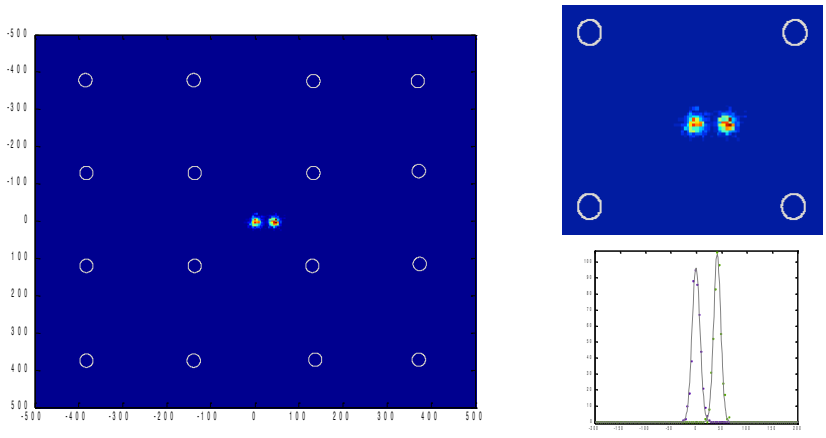


Figura 6. Imagen planar de distribuciones de puntos de interacción estimados (PSF), correspondientes a la detección de haces de muones incidentes en dos puntos de la zona central del detector, (x, y) = (0, 0) y (60, 0). Las unidades son mm. Los círculos representan la localización de 4x4 PMTs. Derecha: Detalle (zoom) de la región central de la imagen planar, mostrando dos PSFs de interacciones en los puntos x= 0 y x = 6 cm. Perfil (proyección en eje X) de las PSFs, mostrando valores de anchura de distribución de 12 a 13 mm (FWHM de ajuste a gaussiana).

Tras la definición del modulo detector, se ha montado un prototipo para la realización de medidas básicas y validación de los resultados de simulación. Estos resultados se integran en modelos de estructuras de detección con geometrías más complejas. Se simula la respuesta del sistema de tomografía, se determinan las trayectorias de muones (ver figura 7) y reconstruyen imágenes tomográficas de objetos patrón. El desarrollo de un modelo de simulación detallado permite evaluar el rendimiento y optimizar diferentes soluciones, en términos de resolución espacial y sensibilidad frente a coste (principalmente determinado por el número de fotodetectores/m^2) antes de la construcción del sistema completo de MT.

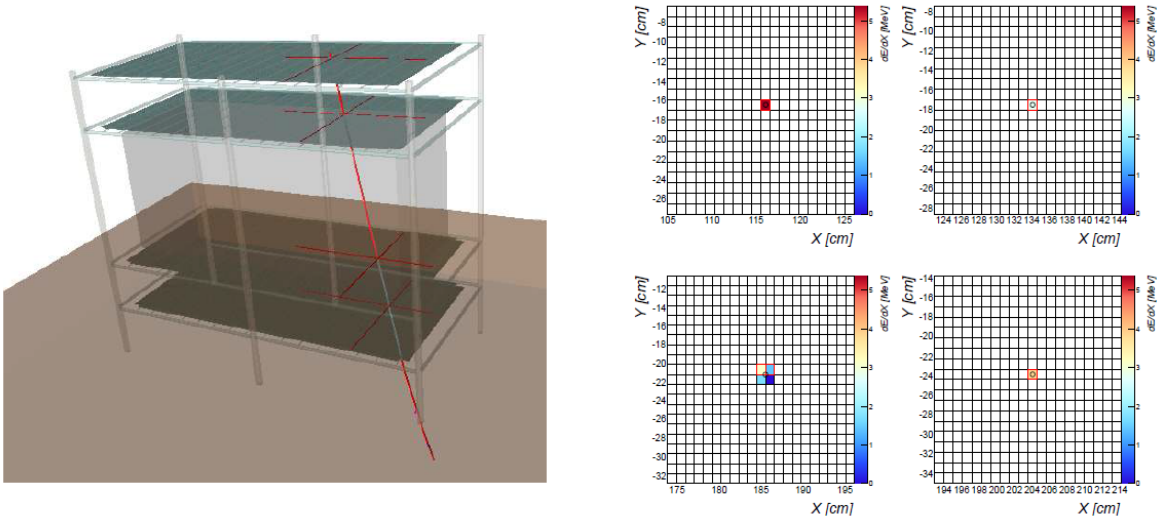


Figura 7. Reconstrucción (izquierda) de la trayectoria de un muón (de 1 GeV de energía) con interacción en cuatro planos de detección (derecha). La escala de colores de los gráficos representa la energía depositada por la interacción en cada detector.

Referencias

[1] K. Nagamine et al., Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **1995**, 356, 585-595.

[2] Tanaka et al. High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt. Asama, Japan. *Earth and Planetary Science Letters* **2007**, 263, 104–113.

[3] Ambrosi et al., The MU-RAY project: Volcano radiography with cosmic-ray muons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **2011**, 628, 120-123.

[4] S. Riggi et al., Geant4 simulation of plastic scintillator strips with embedded optical fibers for a prototype of tomographic system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **2010**, 624, 583-590.

[5] J.J. Gomez et al., Scattering muon radiography and its application to the detection of high-Z materials. *Nuclear Science Symposium Conference Record IEEE* **2003**, 2, 1061-1064.

[6] M. Hohlmann et al., GEANT4 Simulation of a Cosmic Ray Muon Tomography System with MicroPattern Gas Detectors for the Detection of HighZ Materials. *IEEE Transactions on Nuclear Science* **2009**, 56,1356-1364.

[7] S. Presente et al., First results on material identification and imaging with a large-volume muon tomography prototype. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **2009**, 604, 738-746.
[8] Lesparre et al., Design and operation of a field telescope for cosmic ray geophysical tomography. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* ***2012*****,** 1, 33–42.
[9] S. Riggi et al., Muon tomography imaging algorithms for nuclear threat detection inside large volume containers with the Muon Portal detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **2013**, 728, 59-68.
[10] P. Aguiar et al., Geant4-GATE simulation of a large plastic scintillator for muon radiography. *IEEE Transactions on Nuclear Science* **2015**, 62, 1233-1238.
[11] www.opengatecollaboration.org.

Simulación y caracterización de un incidente NBQ de tipo químico en un escenario urbano

Fernández Fernández, Francisco Javier [1,*]

[1] Centro Universitario de la Defensa (ENM); fjavier.fernandez@cud.uvigo.es (FJFF)

* Autor responsable del trabajo; fjavier.fernandez@cud.uvigo.es

Abstract: En este trabajo analizamos, en primer lugar, las limitaciones de emplear los modelos clásicos de dispersión para un agente químico, descritos en el documento AEP-45, en un ambiente urbano. Para salvar las limitaciones de dichos modelos, proponemos un modelo mejorado, basado en un modelo de dispersión acoplado con un modelo microclimático que es capaz de predecir con más precisión el comportamiento de un agente químico en una zona urbana. Empleando dicho modelo mejorado, analizamos, en tercer lugar, la posibilidad de caracterizar un incidente NBQ a partir mediciones tomadas por estaciones de monitorización. Por último, presentamos algunos experimentos numéricos basados en datos académicos.

Keywords: NBQ, Elementos Finitos, Problema de Control

1. Introducción

La existencia de las armas NBQ supone un incremento de la amenaza potencial para la paz en diferentes áreas del mundo. Algunas de estas armas con capacidad de destrucción masiva pueden estar, no sólo en poder de las grandes potencias, sino también de potencias regionales, países del tercer mundo, e incluso organizaciones terroristas (IS).

Respecto al empleo de armas NBQ, debemos considerar siempre dicha posibilidad en los conflictos armados asimétricos, siendo más probable el empleo de armas NBQ en este tipo de conflictos que el uso generalizado en conflictos entre grandes potencias. Un adversario con capacidad NBQ podrá introducir agentes, materiales y armas NBQ en cualquier momento de una forma más o menos indirecta. El lanzamiento y dispersión de los agentes o materiales NBQ puede efectuarse con diferentes medios tales como misiles, aeronaves de todo tipo, artillería de campaña, aerosoles de difícil detección, etc. Una vez que se produzca un incidente NBQ, es de vital importancia ser capaces de predecir el área de peligro

para evacuar a la población civil, alertar a las unidades destacadas en dicha zona, etc. Las ténicas que se pueden emplear para realizar la predicción del área de peligro son:

- **Técnicas simplificadas.** (procedimiento de predicción manual). Son aquellas diseñadas con la finalidad de ser realizadas manualmente por un Centro de Control NBQ, tras la recepción de un mensaje que informe de un incidente NBQ. Estas técnicas, contempladas en el ATP-45 [7], serán tan simples como sea posible y tratarán solo con los primeros mensajes iniciales, sin tener en cuenta el recalculo en relación con la actualización de los periodos de tiempo meteorológico.

- **Técnicas detalladas.** (procedimiento de predicción manual o automático). Son aquellas diseñadas con la finalidad de ser realizadas manualmente ó por un sistema automático, empleando uno ó más mensajes. Estas técnicas, contempladas en el ATP-45, serán sólo tan complicadas como sea requerido por las capacidades del sistema de alerta e información. El resultado puede ser actualizado tras la recepción de nueva información.

- **Técnicas mejoradas.** (procedimiento de predicción automático). Son aquellas diseñadas con la finalidad de ser realizadas exclusivamente por un sistema automático, debido a la complejidad y/o a los requerimientos de tiempo. El resultado es inmediatamente actualizado, tras la recepción de un nuevo dato. Estas técnicas estan contempladas en el AEP-45 [6].

En este trabajo nos centraremos en estas últimas pues son las que nos proporcionan un mayor grado de precisión a la hora de realizar la predicción del área de peligro.

2. Limitaciones de los modelos descritos en el documento AEP-45

En el documento AEP-45 se describe como emplear los modelos matemáticos **Gaussian-Pluff Model** para simular la evolución del área de peligro de un ataque **tipo A químico** (agente químico no persistente) y el modelo **Gaussian-Plume Model** para simular la evolución del área de peligro de un ataque **tipo B químico** (agente químico persistente). Dichos modelos son soluciones particulares de un modelo matemático más general, basado en la siguiente ecuación en derivadas parciales (ver [5] y [8]):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (c\mathbf{u}) = \nabla \cdot (K \nabla c) + S, \quad \Omega \times]0, T[, \tag{1}$$

donde $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ es el dominio en el cual queremos resolver la ecuación, T $[s]$ es el tiempo total, c $[gr/m^3]$ es la concentración del agente químico, $\mathbf{u}$ $[m/s]$ es la velocidad del aire, K $[m^2/s]$ es la matriz de difusión y S $[gr/m^3 s]$ es el término fuente. Para poder resolver la ecuación anterior es necesario, además, considerar condiciones sobre la concentración en la frontera del dominio $\partial\Omega$ y un valor inicial para la concentración en el tiempo $t = 0$. Se tendrá que:

- Para llegar al modelo **Gaussian-Plume Model** es necesario realizar las siguientes hipótesis:

  1. Tasa de emisión constante Q $[Kg/s]$ en un punto $\mathbf{x} = (0, 0, H)$ $(S(\mathbf{x}) = Q\delta(x)\delta(y)\delta(z-H))$.
  2. La velocidad del viento es constante y en la dirección del eje x, $\mathbf{u} = (u, 0, 0)$.
  3. La solución es estacionaria.

4. Las constantes de difusión son iguales y sólo dependen de x ($K(x)$).
5. Se desprecia el efecto difusivo en el eje x ($K_x \partial^2 c/\partial x^2 = 0$).
6. Se desprecian las variaciones en la topografía. El suelo es el plano $z = 0$.
7. El contaminante no penetra en el suelo.
8. El dominio de estudio es $\Omega = [0, \infty) \times (-\infty, \infty) \times [0, \infty)$.

Teniendo en cuenta dichas simplificaciones y empleando la transformada de Laplace (ver [8]), se obtiene la solución analítica conocida como **Modelo Gaussian-Plume**:

$$c(r, y, z) = \frac{Q}{4\pi u r} \exp\left(-\frac{y^2}{4r}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{4r}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{4r}\right)\right], \tag{2}$$

siendo $r = \dfrac{1}{u}\displaystyle\int_0^x K(\xi)\, d\xi$.

- Para deducir el **Modelo Gaussian-Pluff**, es necesario suponer que la fuente es instantánea (se produce una emisión en el instante $t = 0$), obteniendo:

$$c(r, y, z, t) = \frac{Q_T}{8(\pi r)^{3/2}} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2 + y^2}{4r}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{4r}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{4r}\right)\right]. \tag{3}$$

En este caso, Q_T $[Kg]$ representa la cantidad total de contaminate emitido en el instante inicial.

A la vista de las hipótesis que han sido necesarias para llegar a los modelos **Gaussian-Plume** (2) y **Gaussian-Pluff** (3), se pone de manifiesto sus limitaciones para simular el área de peligro en un ambiente urbano. En particular, es destacable lo siguiente:

- La hipótesis de que el suelo es plano no en zonas urbanas acotadas (una o dos manzanas) en las cuales cobra una importancia elevada la componente vertical debido, sobre todo, a los movimientos convectivos del aire.
- La velocidad de viento constante y paralela al eje x no es aplicable en entramados urbanos en los cuales la presencia de edificios hace que los flujos de aire lleguen a ser turbulentos.
- Debido a que las condiciones meteorológicas pueden sufrir cambios en escalas de tiempo relativamente pequeñas, el considerar soluciones estacionarias no parece válida.
- El efecto difusivo en la componente vertical no se puede despreciar cuando dicha componente juega un papel vital en el problema.

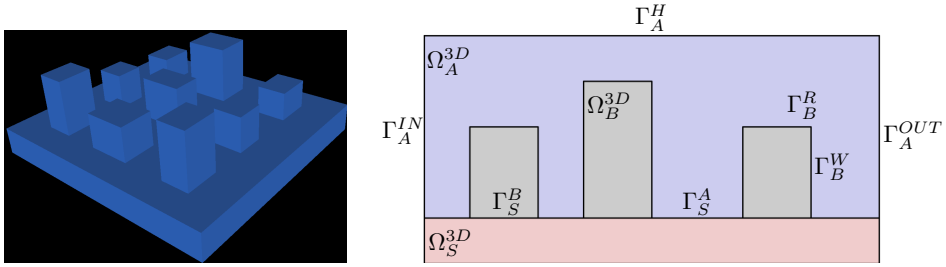
En este trabajo propondremos un método para mejorar la predicción del área de peligro en un ambiente urbano considerando directamente la ecuación general (1) que acoplaremos con un modelo microclimático, con el fin de tener un conocimiento más preciso de las corrientes de aire entre los edificios. El empleo de modelos más sofisticados como el que presentamos en este trabajo, también está contemplado en el documento AEP-45 bajo el epígrafe *Using Diffusion Models*, sin embargo, no se hace mención explícita al modelo a considerar.

Para tener en cuenta el caso el en cual la evolución de la concentración del agente químico dependa de la temperatura del aire, añadiremos a la ecuación (1) un término de reacción de la forma $G(\theta, c)$, donde θ $[K]$ es la temperatura del aire (dicho término de reacción modelará la interacción de la concentración con la temperatura del aire). Finalmente, presentaremos una metodología que nos permite estimar el punto de emisión de un producto químico en función de mediciones realizadas por estaciones de monitorización, la cantidad de sustancia liberada o ambas (caracterización de un incidente NBQ).

3. Formulación matemática del problema

Consideraremos un dominio acotado tridimensional $\Omega_A^{3D} \subset \mathbb{R}^3$ correspondiente a un núcleo urbano, siendo $\partial\Omega_A^{3D}$ la frontera de dicho dominio, esto es paredes y techos de edificios, suelo y, adicionalmente, fronteras ficticias que delimitan nuestro dominio. Dentro de estas últimas, destacamos la frontera que llamaremos Γ_A^{IN} por la que tenemos un flujo de aire entrante y Γ_A^{OUT} por donde el flujo de aire es saliente. Supondremos que la temperatura del aire puede afectar a la concentración del contaminante y que, eventualmente, puede haber efectos de sedimentación.

Dominio de cálculo **Esquema de las fronteras**



3.1. Un modelo mejorado de dispersión

Consideraremos el siguiente modelo para la evolución de la concentración de un agente químico c_A:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial c_A}{\partial t} + \mathbf{u}_A \cdot \nabla c_A + w_C \dfrac{\partial c_A}{\partial z} - \nabla \cdot (K_C \nabla c_A) = F_C + G(\theta_A, c_A), \quad \Omega_A^{3D} \times]0, T[, \\ c_A = c_A^{IN}, \quad \Gamma_A^{IN} \times]0, T[, \\ K_C \dfrac{\partial c_A}{\partial \mathbf{n}_A} = 0, \quad (\partial\Omega_A^{3D} \setminus \Gamma_A^{IN}) \times]0, T[, \\ c_A(0) = c_A^0, \quad \Omega_A^{3D}. \end{cases} \tag{4}$$

Donde, c_A $[gr/m^3]$ es la concentración de agente químico, w_C $[m/s]$ es la velocidad de sedimentación (constante), $\mathbf{u}_A$ $[m/s]$ es la velocidad del aire, θ_A $[K]$ es la temperatura del aire, F_C $[gr/m^3 s]$ es el término fuente, lógicamente relacionado con el punto emisor y la cantidad de sustancia liberada, G_C $[gr/m^3 s]$ es una función que mide el efecto que, sobre la concentración del agente, tiene la temperatura del aire, K_A $[m^2/s]$ es la constante de difusión, c_A^{IN} $[gr/m^3]$ es la concentración de agente químico que está entrando por la frontera Γ_A^{IN} y c_A^0 $[gr/m^3]$ es la concentración inicial de agente químico. Debemos observar que $\nabla \cdot (\mathbf{u_A} c) = \nabla \cdot \mathbf{u}_A c_A + \mathbf{u}_A \cdot \nabla c_A = \mathbf{u} \cdot \nabla c_A$, puesto que, supondremos que $\nabla \cdot \mathbf{u}_A = 0$. Con respecto al término fuento F_C, en la literatura científica (ver, por ejemplo, [2]) el lector verá que es común modelar este término a través de una Delta de Dirac:

$$F_C(\mathbf{x}, t) = Q_C(t)\delta_{\mathbf{b}_C}(\mathbf{x}), \tag{5}$$

donde $Q_C(t)$ $[gr/s]$ es la tasa de sustancia liberada y $\mathbf{b}_C$ es el punto emisor. En el caso de tener una emisión puntual, el término anterior sería:

$$F_C(\mathbf{x}, t) = Q_C \delta_0(t) \delta_{\mathbf{b}_C}(\mathbf{x}), \tag{6}$$

siendo Q_C $[gr]$ es la cantidad total liberada de substancia en el tiempo $t = 0$. Observamos que tanto (5) como (6) se corresponden con segundos miembros no pueden ser empleados en la deducción de los modelos (3) o (2) por tratarse de un caso general no contemplado en las simplificaciones previstas. En este trabajo nos centraremos en términos fuente del tipo (5).

Observación. La velcidad $\mathbf{u}_A$ y temperatura del aire θ_A supondremos que son soluciones de un modelo microclimático de microescala que nos permite tener un conocimiento preciso del comportamiento de las variables meteorológicas en la zona de estudio. Si el lector está interesado en conocer los detalles de dicho modelo se ruega que contacte con el autor.

3.2. Caracterización de un incidente NBQ

Se trata de caracterizar un incidente NBQ a través del punto de emisión $\mathbf{b}_C$ y la tasa de emisión Q_C asociados al segundo miembro (5). Comencemos estableciendo una serie de notaciones:

- $\mathbf{b}_C \in \overline{\Omega_A^{3D}}$ es el punto de emisión del agente químico. Las posibles ubicaciones del punto de emisión se encuentran en una región $\mathcal{U}_{ad}$ formada por la unión de M sectores Z_{ad}^k en los cuales es probable que se haya producido el incidente NBQ (ubicación del dispositivo).

- F_C es el término fuente, puesto que depende de $\mathbf{b}_C$ y Q_C (tasa de emisión del agente químico), lo denotaremos por $F_C(\mathbf{b}_C, Q_C)$ para poner de manifiesto dicha dependencia.

- $\{\widetilde{c}_i^n : i = 1, \ldots, N_P,\ n = 1, \ldots, N_T\}$ es el conjunto de mediciones realizadas por las estaciones en los puntos de coordenadas espacio-temporales $\{(\mathbf{x}_i, t_n) : i = 1, \ldots, N_P,\ n = 1, \ldots, N_T\}$. Básicamente, estamos suponiendo que disponemos de una red de sensores de medida para monitorizar la evolución del agente químico.

- Con el fin de caracterizar de forma conveniente el incidente NBQ definiremos un funcional de coste que medirá la discrepancia entre las mediciones obtenidas por las estaciones y las que predice nuestro modelo. Puesto que las solución de nuestro modelo depende de la posición del punto de emisión y de la tasa de sustancia liberada, haremos patente dicha dependencia en el funcional de coste:

$$J(\mathbf{b}_C, Q_C) = \sum_{i=1}^{N_P} \sum_{n=1}^{N_T} \left(c_A(\mathbf{x}_i, t_n) - \widetilde{c}_i^n\right)^2. \tag{7}$$

  Para evaluar el funcional anterior, es necesario resolver la ecuación (4).

Observación. Nos interesa es minimizar el funcional (7), esto es, entenderemos que hemos caracterizado el incidente NBQ cuando encontremos un punto de emisión $\mathbf{b}_C$ y una tasa de emisión Q_C, de forma que las predicciones hechas por el modelo (4), empleando dichos elementos, se asemejen a las mediciones tomadas por las estaciones.

Desde un punto de vista matemático, el problema de minimizar el funcional anterior (cuya evaluación requiere de la resolución de una ecuación en derivadas parciales) se puede formular dentro de la teoría del control óptimo de ecuaciones en derivadas parciales, teoría que el lector puede consultar, por ejemplo, en la referencia clásica [4].

Estudiaremos entonces los siguientes problemas

- **Problema 1. Estimación del punto de emisión.** Se trata de, supuesto que la tasa de emisión $\widetilde{Q}_C$ del agente químico es conocida, estimar el punto de emisión. Esto es, estamos interesados en resolver el siguiente problema de control óptimo,

$$(P_1) \qquad \min_{\mathbf{b}_C \in \mathcal{U}_{ad}} J(\mathbf{b}_C, \widetilde{Q}_C). \tag{8}$$

- **Problema 2. Estimación de la tasa de emisión.** Se trata de, supuesto que el punto de emisión $\widetilde{\mathbf{b}}_C$ es conocido, estimar la tasa de emisión Q_C. Esto es, estamos intesados en resolver el siguiente problema de control óptimo,

$$(P_2) \qquad \min_{Q_C \in \mathcal{V}_{ad}} J(\widetilde{\mathbf{b}}_C, Q_C). \tag{9}$$

- **Problema 3. Estimación del punto de emisión y la tasa de emisión.** Se trata de determinar el punto de emisión $\mathbf{b}_C$ y la tasa de emisión asociada Q_C, esto es, estamos interesados en la resolución numérica del siguiente problema de control óptimo:

$$(P_3) \qquad \min_{(\mathbf{b}_C, Q_C) \in \mathcal{U}_{ad} \times \mathcal{V}_{ad}} J(\mathbf{b}_C, Q_C). \tag{10}$$

La resolución numérica del problema (9) se puede realizar empleando algoritmos de minimización estándar ya que la variable de control es real y acotada, sin embargo, la resolución numérica de los problemas (8) y (10) hay que realizarla en el marco de los problemas MINLP (Mixed Integer Nonlinear Programming). Esta complejidad es debida a que, posiblemente, los sectores de búsqueda no se intersecan (una plaza y la azotea de un edificio, etc.).

4. Resolución numérica del problema

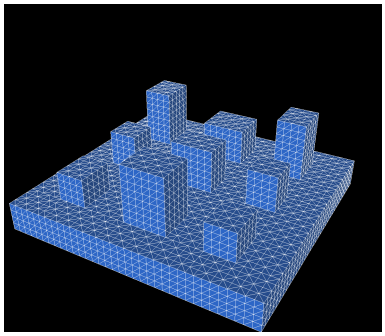
Hemos diseñado un algoritmo que nos permite, por un lado, resolver numéricamente el modelo (4) y, por otro lado, ser aprovechable para la resolución de los problemas relacionados con la caracterización del incidente (8)-(10). Puesto que el modelo de dispersión (4) no tiene una solución analítica, emplearemos un método numérico para su resolución numérica, en nuestro caso, emplearemos el método de características para las discretizaciones temporales y el método de elementos finitos para las discreizaciones espaciales, dichas discretizaciones fueron implementadas con la ayuda del software FreeFem++ (ver [3]). Los mallados necesarios para resolver el problema con elementos finitos serán del tipo tetraédrico. En el caso de los problemas de minimización resultantes de discretizar los problemas de control (8)-(10), se ha empleado el algoritmo de puntos interiores IPOPT (ver [9]). Para calcular el gradiente del funcional de coste (necesario para el algoritmo de puntos interiores IPOPT) hemos empleado las ecuaciones de estado adjunto (ver [4]) y las ecuaciones linealizadas. En todos nuestros

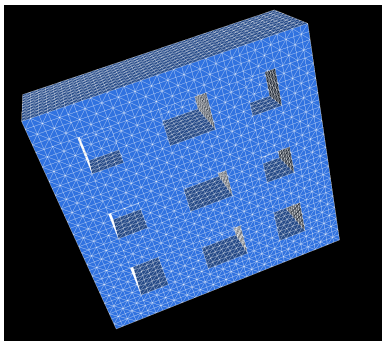
experimentos numéricos hemos considerado un incidente en el cual la tasa de emisión puede variar con el tiempo y que la temperatura ambiente no influye en la evolución de la concentración (G=0).

5. Algunos resultados numéricos

Presentamos en esta sección algunos resultados que hemos obtenido en un escenario realista asociado a una zona urbana compuesta por nueve bloques de edificios. A continuación mostramos los mallados que hemos considerado para los elementos sólidos (izquierda) y el aire (derecha):

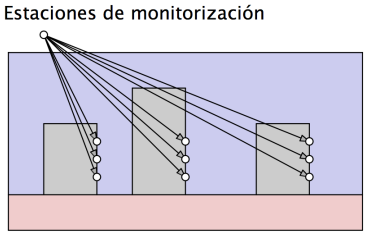
Mallado elementos sólidos (7846 vértices) **Mallado del aire (12736 vértices)**





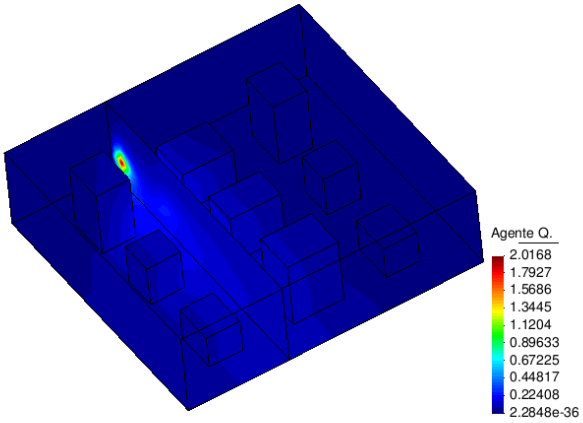
5.1. Generación de datos sintéticos

En los ejemplos que presentamos en este trabajo, hemos empleado como conjunto de mediciones, concentraciones generadas de forma sintética al resolver el modelo empleando una posición y tasa de emisión predeterminados. Dichas mediciones son tomadas por estaciones de monitorización situadas a 1, 2 y 3 metros en cada edificio.



Nuestro objetivo es ser capaces de recuperar los datos que hemos empleado para generar las mediciones sintéticas empleando nuestro algoritmo. Los parámetros empleados en las simulaciones son académicos y no se corresponden con parámetros reales. En cualquier caso, el buen funcionamiento del algoritmo no depende de los parámetros elegidos (siempre y cuando se tomen en un cierto rango). Mostramos a continuación la concentración del agente químico en el último paso de tiempo (20 minutos) asociado a la simulación realizada para la generación de las medidas, dicha simulación fue realizada suponiendo que el punto de emisión se encuentra en una determinadas coordenadas (en nuestro caso, 2, 12 y 7 metros respectivamente) y que la tasa de emisión es constante (en nuestro caso, 2 $[gr/s]$). Se muestra también la temperatura del aire.

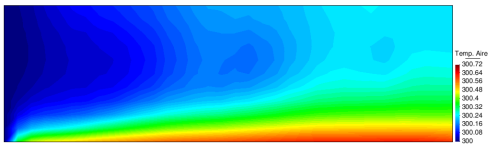
Concentración de agente en las fronteras



Concentración de agente en una sección



Temperatura del aire en una sección



A la vista del corte asociado a la concentración del agente, observamos claramente la dependencia con respecto a la componente asociada al eje z y el efecto que las corrientes de aire verticales (corrientes convectivas provocadas por la diferencia de temperaturas entre el suelo y el aire) tienen sobre la dispersión del agente químico. Dichos efectos convectivos se aprecian también en la distribución de temperaturas.

5.2. Resolución numérica de los problemas (8)-(10).

Pasamos a continuación a describir los resultados de los distintos experimentos realizados. Se trata de resolver numéricamente los problemas (8)-(10) empleando como mediciones los datos sintéticos cuya generación se ha descrito en la sección anterior. En todos los problemas se ha considerado un test de parada de $1.e-10$, obteniendo los siguientes resultados (Core i5-4402E, 8Gb RAM):

- Problema 1. El algoritmo converge en 23 iteraciones (tiempo de CPU 4.571s), se obtiene de forma exacta el punto de emisión utilizado para generar los datos sintéticos (ecuaciones linealizadas).
- Problema 2. En este caso, en la zona en la que hemos ubicado el punto de emisión, el algoritmo converge en 80 iteraciones (tiempo de CPU 38.584s), se obtiene la tasa de emisión empleada para generar los datos sintéticos con un error del 0.1% (ecuaciones linealizadas).
- Problema 3. El algoritmo que hemos desarrollado para los problemas anteriores no proporciona resultados aceptables (las variables de control son de naturaleza distinta). Estamos desarrollando una metodología más adecuada a esta clase de problemas.

A la vista de los resultados obtenidos, observamos que el algoritmo presentado funciona de forma adecuada a un nivel académico.

6. Conclusiones

Se pueden resumir en las siguientes:

- El uso de los modelos descritos en el documento AEP-45 para escenarios urbanos acotados no parece válido, siendo necesario emplear modelos más sofisticados basados en la resolución

numérica de ecuaciones en derivadas parciales. El empleo de dichos modelos está previsto en el documento AEP-45 bajo el epígrafe *Using Diffusion Models*.

- La caracterización de un incidente NBQ es posible empleando las técnicas aquí presentadas, por lo menos a un nivel académico. Recuperar el punto de emisión y la tasa de descarga es posible y se obtienen buenos resultados. El poder determinar la ubicación de un dispositivo a partir de mediciones realizadas sobre el terreno puede resultar útil para la neutralización de la amenaza.
- El coste computacional necesario para la resolución del problema es muy elevado por lo que se requiere de disponer de una infraestructura adecuada.

Agradecimientos

A la Jefatura de Estudios de la ENM por facilitarnos la documentación necesaria para realizar este trabajo.

Referencias

1. Ermak, D. L. An analytical model for air pollutant transport and deposition from a point source. *Atmospheric Environment*, **1977**, *Vol. 11*, 231 - 237.
2. García-Chan, N.; Alvarez-Vázquez, L. J.; Martínez, A.; Vázquez-Méndez, M. E.; On optimal location and management of a new industrial plant: Numerical simulation and control. *Journal of the Franklin Institute*, **2014**, *Vol. 351*, 1356-1371.
3. Hecht, F.; New development in FreeFem++. *Journal of Numerical Mathematics*, **2012**, *Vol. 20*, 251-265.
4. Lions, J. L.; Contrôle optimal de systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles. *Dunod, Paris; Gauthier-Villars, Paris*, **1968**.
5. Lushi, E.; Stockie, J. M.; An inverse Gaussian plume approach for estimating atmospheric pollutant emissions from multiple point sources. *Atmospheric Environment*, **2010**, *Vol. 44*, 1097-1107.
6. NATO AEP-45-2000; Programmers manual for reporting nuclear detonations, biological and chemical attacks, and predicting and warning of associated hazards and hazard area. *STANAG*, **2000**.
7. NATO ATP-45-2014; Warning And Reporting And Hazard Prediction Of Chemical, Biological, Radiological And Nuclear Incidents (Operators Manual). *STANAG*, **2000**.
8. Stockie, J.M. The mathematics of atmospheric dispersion modeling. *SIAM Review* **2011**, *Vol. 53*, 349-372.
9. Wachter, A.; Biegler, L. T.; On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. *Mathematical Programming*, *Vol. 106*, **2006**, 25-57.

Autoinyectables DEF para protección NBQ: i+d en nuevas presentaciones.

Sánchez Ramos, Juan José[1,*]

[1] Centro Militar de Farmacia de la Defensa. Colmenar Viejo (Madrid). Base Logística de San Pedro. Carretera Miraflores, km 23. 28770 Colmenar Viejo (Madrid). Email: jsanram@oc.mde.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: jsanram@oc.mde.es

---

Abstract: Un autoinyectable (AI) es un dispositivo médico que permite la administración por vía intramuscular de un medicamento de urgencia, por el propio afectado o por un compañero, de forma automática tras activar su mecanismo de disparo. Los autoinyectables (AIs) tienen especial interés en el ámbito militar para Defensa NBQ, al permitir la administración automática de diferentes antídotos, terapias de apoyo y otros medicamentos de urgencia. Desde 1991, el Centro Militar de Farmacia de la Defensa (CEMILFARDEF) diseña, investiga, desarrolla y produce industrialmente AIs para las Fuerzas Armadas Españolas. El actual dispositivo de autoinyección es el resultado de un extenso y continuo proceso de i+d en el CEMILFARDEF, que pone a disposición de las Fuerzas Armadas cuatro terapias de urgencia con antídotos bajo la forma farmacéutica de AIs: *Atropina+Oxima DEF AI*, *Atropina DEF AI*, *Diazepam DEF AI*, y *Morfina DEF AI*. Se significa la importancia del momento actual del estado de la ciencia en el que se encuentran estos procesos de investigación científica y de tecnología farmacéutica sobre AI en el CEMILFARDEF y los objetivos, fundamentados en la explotación de los resultados actuales, en la obtención de nuevas contramedidas sanitarias seguras, eficaces y de calidad, bajo la presentación de AI, con las que afrontar la amenaza que en el escenario estratégico actual suponen los agentes NBQ para la Defensa y Seguridad Nacional.

Keywords: Autoinyectables, antídotos, seguridad y defensa NBQ, medicamentos de urgencia, contramedidas sanitarias.

---

1. Introducción

Los AI constituyen una forma de presentación de medicamentos en *dosis unitaria inyectable* para el tratamiento propio o de un compañero, en situaciones de aislamiento y urgencia vital [1]. Liberan de forma automática una dosis exacta, estéril, apirógena y libre de partículas, de un medicamento inyectable, de forma rápida, segura y eficaz, con solo activar su mecanismo de disparo. Están indicados en procesos extra-hospitalarios muy rápidos tanto en su comienzo como evolución a gravedad, en los que la administración intramuscular de un medicamento de primera línea puede salvar la vida del afectado, en tanto es evacuado y recibe atención sanitaria especializada. Los AIs de epinefrina para el tratamiento de urgencia de la anafilaxia grave –picadura de insectos [2]- o los AIs con antídotos contra agentes nerviosos -tabún (GA), sarín (GB), soman (GD), o VX- que podrían ser usados en una ataque contra la población civil o militar [3] representan este tipo de terapias de urgencia. Lo impredecible de la exposición al agente desencadenante, y la rigurosidad del proceso clínico resultante definen tres factores de importancia en la i+d de AIs: En primer lugar, cada individuo de un grupo de riesgo debe llevar siempre consigo al menos un AI (*portabilidad*); en segundo lugar, debe ser capaz de utilizarlo correctamente en el momento oportuno y en las condiciones de estrés que acompañan al ataque (*user-friendly*); y en tercer lugar, el AI debe ser seguro y eficaz en su *funcionamiento*. En la mejora continuada de estos tres factores se fundamenten los procesos de i+d sobre AIs.

Durante la Segunda Guerra Mundial se hizo evidente la necesidad de un dispositivo para la rápida administración parenteral de medicamentos de urgencia por el propio combatiente. El *Syrette*, introducido en el ejército norteamericano en 1950 [4] fue uno de los primeros AI, formado por un tubo de metal flexible, similar a un tubo de pomada oftálmica, con una aguja y su protector acoplados, conteniendo una dosis inyectable de morfina como analgésico potente. Desde entonces, la tecnología farmacéutica de los AI ha experimentado una gran evolución como resultado de sus múltiples ventajas, especialmente en el ámbito militar para garantizar la administración de antídotos que protejan al combatiente en situaciones límite de estrés de combate [5], además de su poder disuasorio como contramedida sanitaria [6]. Varios AI están disponibles en el mercado farmacéutico internacional con diferentes combinaciones de antídotos contra agentes nerviosos (atropina, obidoxima, pralidoxima y HI6) y terapias de apoyo NBQ (diazepam o avizafona como anticonvulsivante contra neurotóxicos, o morfina en casos de dolor extremo y aislamiento del afectado) [7,8]. Por otro lado, la epinefrina autoinyectable ha alcanzado una gran relevancia en el tratamiento extra-hospitalario de la anafilaxia grave [5], y ha aumentado el interés civil por los dispositivos de autoinyección. Varios AI de epinefrina están actualmente autorizados para su uso en Europa [9].

En este contexto, el *Autoinyectable AJP -Autoinyector de Jeringas Prellenadas-* (AI-AJP) tiene su origen a principio de los noventa, tras el desabastecimiento de AI de interés militar producido por las frecuentes oleadas en la demanda, motivadas por conflictos internacionales globalizados con amenaza de agresión mediante armas químicas (Guerra del Golfo Pérsico y *Operación Tormenta del Desierto* en 1991, y el recrudecimiento del conflicto bélico con Irak en 1.998). Los AI para Defensa NBQ son medicamentos huérfanos por estar indicados en el tratamiento de intoxicaciones raras, y tienen limitado interés comercial para la industria farmacéutica civil. Las crisis de desabastecimiento siguen poniendo de manifiesto la necesidad y las ventajas de la fabricación propia en los ejércitos de este tipo de recursos estratégicos de interés para la Defensa y Seguridad Nacional.

Los primeros AI-AJP con antídotos contra agentes nerviosos fueron producidos por el CEMILFARDEF en 1992. Contenían una jeringa de vidrio con aguja insertada del sistema *SCF Hypak*^{R} de Becton&Dickinson, cargada con 2 mg de sulfato de atropina y 220 mg de clorhidrato de obidoxima, en 1 ml. El reducido volumen disponible para la solución inyectable y la insuficiente longitud de aguja efectiva (<17mm), entre otras limitaciones, motivaron la i+d de una segunda generación de AI-AJP, cuya producción comenzó en 1998, y cuya principal innovación fue la incorporación de una jeringa específicamente desarrollada para este AI-AJP, cargada con 2 mg de sulfato de atropina y 600 mg de cloruro de pralidoxima, en 3 ml de solución inyectable. En 2006 comienza la producción de la tercera generación de AI-AJP actualmente en vigor, en la que se reducen peso y dimensiones, y se mejora su calidad, seguridad y eficacia.

La situación geoestratégica y el carácter asimétrico de los conflictos actuales presentan desafíos que hacen necesaria la continuidad del proceso de investigación científica y de tecnología farmacéutica sobre AIs como contramedida sanitaria con la que afrontar amenazas para la Defensa y Seguridad Nacional. En esta comunicación se exponen las nuevas líneas de i+d sobre el AI-AJP activas en el CEMILFARDEF, con los objetivos de mejorar la portabilidad (dimensiones y peso), el envase primario del medicamento, la automatización del proceso de fabricación, y la obtención de nuevas presentaciones de AIs para protección NBQ.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

La metodología para el estudio de los atributos y variables críticas para un AI ha sido obtenida tras una revisión bibliográfica de las publicaciones científicas más recientes. Se detecta la falta de ensayos y criterios de valoración universalmente aceptados, estandarizados y validados, y su publicación oficial en farmacopea para la caracterización de estos dispositivos de urgencia vital [9]. Los procedimientos experimentales desarrollados, normalizados y validados en el CEMILFARDEF para la producción y control de calidad de estos medicamentos, constituye la principal fuente metodológica para la evaluación de resultados de la i+d sobre AIs.

Para el diseño y optimización de cada componente del dispositivo de autoinyección se utilizan programas de ACAD (*Application for Computer-Aided Design*). Los prototipos diseñados son posteriormente fabricados en taller mecánico, ensayando diferentes materiales, según la función del componente en el dispositivo. La metodología seguida para el desarrollo final se fundamenta en procesos cíclicos experimentales de diseño-producción-ensayo/error de cada nuevo prototipo desarrollado, generando nuevas especificaciones que corrigen defectos observados y optimizan sus características. Los prototipos desarrollados de cada componente son caracterizados tanto individualmente, como en el conjunto del AI, y tanto en reposo como durante la activación y descarga del dispositivo.

Los componentes de la jeringa (tubo de vidrio, juntas de estanqueidad, aguja con su protector y soporte) como envase primario que contiene a la solución inyectable, son críticos en cuanto a su seguridad y calidad, y son rigurosamente evaluados en cuanto a sus características físicas (tolerancias, funcionamiento y resistencia mecánica y térmica -esterilización por calor-), químicas (composición, inercia y estabilidad), y microbiológicas (propiedades barrera y esterilidad).

Las soluciones inyectables de cada antídoto o medicamento de urgencia se obtienen mediante ensayos de desarrollo galénico y, una vez envasadas en la jeringase, someten a estudios de estabilidad normalizados tanto en tiempo real como de envejecimiento acelerado, y su evolución es controlada mediante ensayos analíticos periódicos.

Tras el ensamblado del dispositivo de autoinyección y la jeringa prellenada con la solución inyectable del medicamento, se lleva a cabo la caracterización y control de las fuentes de variabilidad del AI [10] mediante ensayos físicos, químicos y microbiológicos. Se evalúa la robustez del AI bajo condiciones de empleo extremas (ensayos de resistencia a la caída, a la carga estática, y de estrés dinámico mediante ensayos de laboratorio y de campo). Se evalúa su portabilidad y uso (dimensiones, peso, empleo). Se controlan las características y exigencias particulares de cada etapa de la activación y descarga (fuerza de activación, tiempo de autoinyección, longitud de aguja efectiva, dosis descargada). Se estudia y cualifica la integridad, esterilidad, inyectabilidad, friabilidad, estabilidad y compatibilidad del autoinyectable [11], así como el análisis físico-químico y microbiológico de la solución inyectable descargada. Los resultados obtenidos deben cumplir las especificaciones técnicas establecidas, para garantizar la calidad, seguridad y eficacia del AI. Por último, se identifican y caracterizan las variables críticas de diseño para el desarrollo de nuevos AI, en función de las propiedades galénicas y volumen final de la solución inyectable.

3. Resultados y Discusión

En la Figura 1 se representa, como resultado del proceso de i+d ejecutado, los actuales componentes del AI-AJP, la actual jeringa específicamente desarrollada, y los *Autoinyectables de atropina-oxima DEF, Diazepam DEF, Atropina DEF,* y *Morfina DEF*. Constituyen el punto de partida del estado del arte para la nueva etapa de i+d, que tiene los siguientes objetivos basados en el rediseño del actual dispositivo de autoinyección, y su implementación tanto a los actuales autoinyectables como a los nuevos que se han de desarrollar:

3.1. Síntesis química de novo de principios activos, antídotos para Defensa NBQ.

Estudio del estado actual de las patentes de síntesis y su optimización, para la obtención a escala de planta piloto, y posterior escalado industrial, de principios activos de interés estratégico y reducida disponibilidad comercial, para su posterior presentación, tras estudios de desarrollo galénico y estabilidad, en nuevos AIs: a) Obidoxima, pralidoxima y oxima HI6 como reactivadores de la enzima acetilcolinesterasa inhibida por un agente nervioso; b) Avizafona como alternativa al diazepam en el tratamiento de las convulsiones producidas por agentes nerviosos; b) DTPA-Ca y DTPA-Zn como agentes de decorporación radioactiva de plutonio y otros elementos radioactivos ante un incidente nuclear.

Este objetivo se apoya en un proyecto de investigación sobre nuevos productos de interés estratégico militar para personas en riesgo de contaminación nuclear por Cs^{137} y otras especies radiactivas, del Instituto Mixto de Investigación Biosanitaria de la Defensa (IMIDEF), que prevé desarrollar nuevas formas farmacéuticas de Azul Prusia mediante síntesis química de novo del principio activo.

3.2. Desarrollo galénico y estudios de estabilidad de formulaciones farmacéuticas con las nuevas moléculas de antídotos, y su acondicionamiento primario en AIs.

Estudios de formulación para determinar las composiciones óptimas de las soluciones inyectables de los antídotos obtenidos, preparadas a la concentración terapéutica, y su acondicionamiento en la nueva jeringa prellenada del AI. Estudios de compatibilidad química de mezclas binarias del principio activo-excipientes. Estudios de estabilidad en diferentes condiciones ambientales y de almacenamiento, y en diferentes intervalos de tiempo.

3.3. Optimización del envase primario del autoinyectable.

Modificación integral de la actual jeringa, como envase primario de la solución inyectable, a un nuevo formato de "*carpula*" comercialmente disponible, válida para ser cargada en el AI, que cumpla las especificaciones técnicas citadas (resistencia, dinámica de funcionamiento, estabilidad, y dimensiones, entre otras características). Este objetivo simplificará y automatizará el actual proceso de producción industrial de AIs, que es complejo y de alto riesgo de contaminación microbiológica por el operador de fabricación. Con el nuevo formato de "*carpula*" se pretende, además, la obtención de jeringas de doble cámara sólido/líquido para AIs con oxima HI6 como polvo liofilizado en una cámara, y solución de atropina en la otra cámara, químicamente inestables entre sí.

3.4. Rediseño de componentes del dispositivo de autoinyección.

En función del nuevo cartucho "*carpula*" como envase primario de la solución inyectable, mediante ensayos de diseño/producción/ensayo/error se optimiza y caracteriza cada componente en cuanto a variables críticas, máxima reducción de dimensiones, dinámica de funcionamiento y resistencia de materiales.

3.5. Desarrollo, validación y estandarización de nuevas técnicas de control de calidad.

Permite automatizar la caracterización física, química y microbiológica tanto de las soluciones inyectables, como del envase primario, los componentes del dispositivo de autoinyección, y los propios AIs como producto terminado y como forma farmacéutica de administración de medicamentos estériles.

3.6. Automatización de la producción industrial de autoinyectables.

Se diseña y desarrolla, en colaboración con un fabricante nacional de maquinaria para industria farmacéutica, un equipo de producción industrial de "*carpulas*" que ejecuta de forma automática cada una de las operaciones básicas manuales que actualmente integran el proceso de fabricación de autoinyectables, bajo condiciones de producción por vía aséptica sin esterilización terminal, eliminando los riesgos y variabilidad del actual proceso.

3.7. Obtención de nuevos AIs de interés estratégico para Defensa y Seguridad Nacional.

La nueva etapa de i+d sobre AIs prevé la obtención de las siguientes presentaciones de interés tanto militar como civil, producidas por el CEMILFARDEF:

a) AI Multicomponentes contra agentes nerviosos: atropina-pralidoxima-diazepam (2 mg, 600 mg y 10 mg, en 3 ml). Combina en un solo AI la inhibición competitiva de la acetilcolina por la atropina, la reactivación de la enzima acetilcolinesterasa mediante la oxima, y la acción anticonvulsivante de diazepam. Supone una innovación terapéutica al no existir AI equivalente en el estado del arte. b) AI de atropina- oxima HI6 (oxima específica para Soman). c) AIs de oximas: pralidoxima y obidoxima. d) AI de avizafona como anticonvulsivante contra agentes nerviosos. Las presentaciones incluidas en estos cuatro apartados amplían el necesario arsenal terapéutico para Defensa NBQ y proporcionan autonomía en la disponibilidad de recursos sanitarios críticos. e) AIs de DTPA-Ca y DTPA-Zn para decorporación radiactiva de plutonio y otros elementos radiactivos ante un incidente o catástrofe nuclear. Suponen también una innovación terapéutica al no existir AIs equivalentes en el estado del arte. f) AI de epinefrina para anafilaxia grave y resucitación cardiopulmonar, de especial interés como medicamento de urgencia, proporcionando autonomía en su disponibilidad.

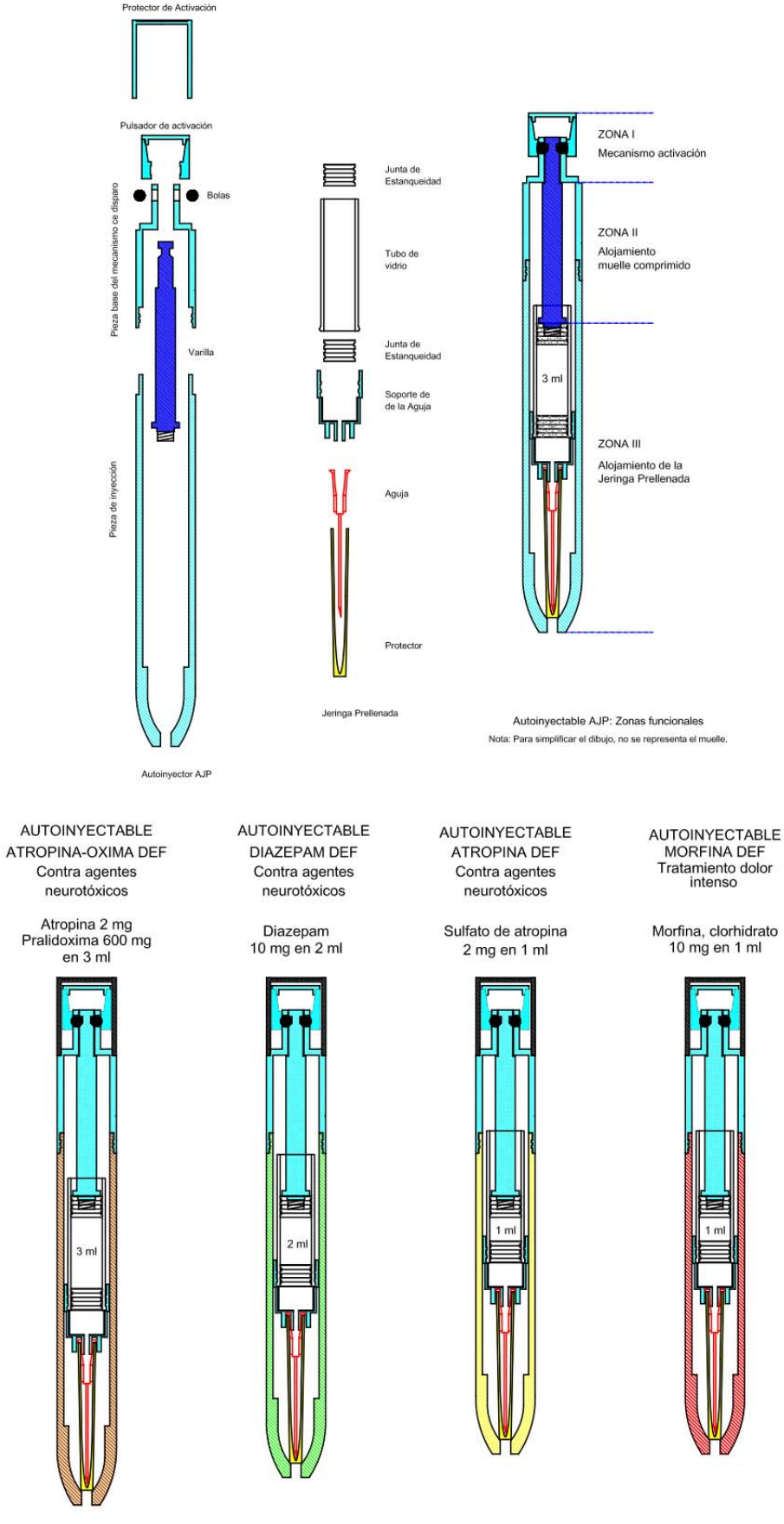


Figura 1. Componentes del AI-AJP, jeringa, y Autoinyectables DEF.

4. Conclusiones

La continuidad de los procesos de i+d sobre autoinyectables en el CEMILFARDEF, que ponen actualmente a disposición de las Fuerzas Armadas cuatro presentaciones, permitirá obtener nuevos antídotos de interés en seguridad y defensa NBQ nacional y multinacional, su presentación en autoinyectables, la mejora integral del dispositivo de autoinyección, y el aumento de capacidades de producción mediante la automatización del proceso industrial de fabricación, redundando en la garantía de calidad, seguridad y eficacia de los autoinyectables.

Referencias

1. Sanchez-Ramos, J.J. Estudio y caracterización del Autoinyectable de atropina-oxima DEF. Diseño de nuevos Autoinyectables para Defensa NBQ y otros medicamentos de urgencia. Sanidad Militar **2014**, 70, 7–19.
2. Kemp, S.F.; Lockey, R.F.; Simons, F.E.R. World Allergy Organization ad hoc Committee on Epinephrine in Anaphylaxis. Epinephrine: the drug of choice for anaphylaxis. A statement of the World Allergy Organization. Allergy 2008, 63, 1061-1070.
3. Rebmann, T.; Clements, B.W.; Bailey, J.A.; Evans, R.G. Organophosphate antidote auto-injectors vs. traditional administration: a time motion study. J Emerg Med 2009, 37, 139-143.
4. Szinicz, L. History of chemical and biological warfare agents. Toxicology 2005, 214, 167-181
5. Davis, J.E. Self-injectable epinephrine for allergic emergencies. J Emerg Med 2009, 37, 57-62.
6. Wetherell, J.; Price, M.; Mumford, H.; Armstrong, S.; Scott, L. Development of next generation medical countermeasures to nerve agent poisoning. Toxicology 2007, 233, 120-127.
7. Antidote Treatment Nerve Agent, Auto-Injector. Meridian Medical Technologies. Products. Preparing to Protect. Disponible en: http://www.meridianmeds.com/products.aspx Último acceso web: 21/07/2015.
8. Original life saving chemistry. Chem Protec. Products. Disponible en: http://www.chemprotect.eu/index.php?id=products Último acceso web: 21/07/2015.
9. Frew, A.J. What are the “ideal” features of an adrenaline (epinephrine) auto-injector in the treatment of anaphylaxis?. Allergy 2011, 66, 15-24.
10. Rathore, N.; Pranay, P.; Eu, B.; Ji, W.; Walls, E. Variability in syringe components and its impact on functionality of delivery systems. PDA J Pharm Sci Technol 2011, 65,5, 468-80.
11. Sacha, G.A.; Saffel-Clemmer, W.; Abram, K.; Akers, M.J. Practical fundamentals of glass, rubber, and plastic sterile packaging systems. Pharmaceutical Development and Technology 2010, 15,1, 6–34.

Medidas espectrales de la actividad electroencefalográfica durante tareas de simulación militar

Sebastián Guerrero, Mª Victoria [1,*], Navascués Sanagustín, Mª Antonia [2], Ruiz López, Carlos [1], Iso Pérez, José M^a [3], Arcos Sánchez, Carolina [4], Arana Aritmediz, Victoria [4] y Orna Montesinos, Concepción [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza. Academia General Militar. Ctra. de Huesca s/n, 50090 Zaragoza; msebasti@unizar.es (SGMV), cruizl@unizar.es (RLC), conorna@unizar.es (OMC)

[2] Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de Zaragoza. C/ María de Luna 3, 50018 Zaragoza; manavas@unizar.es

[3] Academia General Militar. Ctra. de Huesca s/n, 50090 Zaragoza; jisopere@et.mde.es

[4] Hospital General de la Defensa de Zaragoza; carolinarcos@hotmail.com (ASC), maraari@oc.mde.es (AAV)

***** Autor responsable del trabajo; msebasti@unizar.es

Abstract: La atención durante la realización de distintas tareas es una de las funciones cerebrales más estudiadas en estos momentos, ya que constituye el prerrequisito para otros procesos cognitivos complejos. El nivel de ejecución en una tarea y la capacidad para procesar la información dependen del estado de activación cerebral. El electroencefalograma (EEG) es una de las herramientas utilizadas para el estudio de dicha activación cortical, y su cuantificación permite obtener información que por mera inspección visual no podría ser descubierta. Nuestro equipo propone en este trabajo métodos analíticos y computacionales avanzados para obtener cuantificadores del EEG (parámetros de Hjorth) que asignan valores numéricos a la características básicas del sistema observado y permiten así establecer comparaciones entre distintos EEG y diferenciar los distintos estados cerebrales. Se aplican dichos cuantificadores para estudiar la atención del personal de las Fuerzas Armadas Españolas en el desempeño de ejercicios tácticos de simulación de sus funciones militares. Los EEG se han grabado en reposo con ojos cerrados, reposo con ojos abiertos y durante la realización de un ejercicio táctico de simulación en el manejo de un carro de combate usando un videojuego. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la actividad de las áreas cerebrales involucradas en la tarea.

Keywords: EEG; atención; parámetros de Hjorth; simulación militar

---

1. Introducción

La atención ha sido uno de los últimos procesos complejos cerebrales en adquirir la categoría de *función cerebral superior*, siendo en estos momentos una de las funciones más estudiadas, por constituir el prerrequisito para otros procesos cognitivos complejos.

Coloquialmente se puede definir la atención como la percepción selectiva y dirigida, el interés por una fuente particular de estimulación y esfuerzo, o la concentración sobre una tarea.

Desde el punto de vista neurológico, se puede considerar un mecanismo neuronal que regula y focaliza el organismo y en particular nuestra consciencia, seleccionando y organizando la percepción, filtrando y desechando la información no deseada y permitiendo que un estímulo pueda dar lugar a un *impacto*.

Nuestro trabajo se centra en el estudio de la atención/concentración durante la realización de una tarea de simulación de la actividad militar. El nivel de ejecución en una tarea y la capacidad para procesar la información son dependientes del estado de activación cerebral en que se encuentra el sujeto [1]. Para el estudio de la activación cortical la técnica más ampliamente utilizada en el ámbito clínico y en investigación básica o aplicada es el electroencefalograma (EEG). El estudio cuantificado de las señales electroencefalográficas permite obtener información que por mera inspección visual no podría ser descubierta. Este tipo de análisis es, por tanto, útil en el estudio de la atención/concentración durante la realización de distintas tareas [2,3].

Nuestro equipo ha propuesto métodos analíticos y computacionales avanzados para la obtención de aproximantes espectrales de la señal EEG a partir de coeficientes de Fourier de tipo numérico. Se han desarrollado además distintos cuantificadores de la señal (unos obtenidos a partir del estudio espectral y otros de tipo fractal) que asignan valores numéricos a las características básicas del sistema observado y permiten así establecer comparaciones entre distintos EEG y diferenciar los distintos estados cerebrales correspondientes a procesos mentales y/o patologías.

Estos métodos están siendo utilizados en el Proyecto de Investigación CUD ID:2013-16 para el estudio de la atención/concentración del personal de las Fuerzas Armadas Españolas en situaciones propias de su actividad y que requieren alerta, es decir, en el desempeño de ejercicios tácticos de simulación de sus funciones militares. En este trabajo se presentan algunos de los resultados obtenidos en el estudio llevado a cabo en dicho Proyecto. Se han recogido en el Hospital General de la Defensa de Zaragoza las señales EEG de un grupo de personal de las FAS. Los EEG se han grabado en reposo y durante la realización de un ejercicio táctico de simulación en el manejo de un carro de combate usando un videojuego. Los cuantificadores de tipo espectral analizados en el trabajo son los parámetros de Hjorth denominados Actividad y Movilidad obtenidos para el tercer minuto de las señales EEG de 12 canales correspondientes a las áreas frontales, temporales, parietales y occipitales.

2. Materiales y métodos. Sección Experimental

2.1. Parámetros de Hjorth

El neurofisiólogo B. Hjorth definió en 1970 un conjunto de parámetros que utilizó como herramienta clínica en la descripción cuantitativa del EEG. Dichos cuantificadores se conocen desde entonces como

parámetros de Hjorth o descriptores normalizados de pendiente, y describen una señal en el dominio del tiempo (amplitud, pendiente, relación de los cambios de pendiente) y en el de la frecuencia [4].

Los descriptores son los siguientes:

1. Actividad ($\mathcal{A}$): da una medida de la varianza de la amplitud de la señal. Se denomina en ocasiones varianza o potencia media.
2. Movilidad($\mathcal{M}$): da una medida de la desviación estándar de la derivada de la señal en referencia a la desviación estándar de la amplitud. Se considera un estimador de la frecuencia media de la señal.
3. Complejidad ($\mathcal{C}$): es un parámetro adimensional que se define como la razón entre la movilidad de la primera derivada de la señal y la movilidad de la señal misma.

El cálculo de dichos parámetros se realiza a partir de los momentos espectrales de la señal. Se recuerda que una señal experimental se puede expresar en una cierta época como una función del tiempo $x(t)$ y por medio de su transformada de Fourier describirla en función de la frecuencia $\widehat{x}(w)$.

El momento espectral de orden n de la señal se define como:

$$m_n = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} w^n S(w)\, dw,$$

siendo $S(w) = \widehat{x}(w)\ \widehat{x}^*(w) = |\widehat{x}(w)|^2$, $\widehat{x}^*(w)$ el conjugado complejo de $\widehat{x}(w)$ y $|\widehat{x}(w)|$ su módulo. Todos los momentos impares para señales reales son nulos.

Los parámetros de Hjorth se expresan en función de dichos momentos como sigue:

$$\begin{aligned}\mathcal{A} &= m_0,\\ \mathcal{M} &= (m_2/m_0)^{1/2},\\ \mathcal{C} &= (m_4/m_2)^{1/2}/(m_2/m_0)^{1/2}.\end{aligned}$$

En este trabajo se calculan la Actividad y la Movilidad. La expresión de dichos parámetros en el dominio temporal se basa en la igualdad de la energía, es decir, en que la potencia total en el dominio de la frecuencia es idéntica a la potencia media en el dominio del tiempo.

En la práctica se trabaja con señales experimentales de duración finita. Denotando $L^2(T)$ el espacio de funciones de cuadrado integrable en $I = [-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}]$, se define la norma de $x \in L^2(T)$ como:

$$\|x\|_{L^2}^2 \ = \ (x,x)_{L^2} \ = \ \frac{1}{T}\int_I x(t)\ x^*(t)\ dt.$$

De este modo se obtiene, por la fórmula de Plancherel (Parseval) para una señal de este tipo ([5]):

$$\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} |\widehat{x}(w)|^2\, dw \ = \ \frac{1}{T}\int_I |x(t)|^2\, dt,$$

(si la señal es de soporte compacto, como es el caso, el dominio de la frecuencia quedaría restringido a dicho soporte).

Suponiendo que x admite primera y segunda derivadas con las mismas hipótesis, se puede aplicar el resultado anterior a estas, sabiendo además que:

$$\widehat{\frac{d^\alpha}{dt^\alpha}x} \ = \ i^\alpha w^\alpha\ \widehat{x}.$$

Considerando que x es una señal real, pueden expresarse los momentos en función de la frecuencia y del tiempo como sigue:

$$m_0 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} S(w)\,dw \;=\; \frac{1}{T}\int_I |x(t)|^2\,dt,$$

$$m_2 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} w^2\,S(w)\,dw \;=\; \frac{1}{T}\int_I \left|\frac{dx}{dt}\right|^2\,dt,$$

siendo I el intervalo de definición.

En nuestro caso la señal original no es conocida, y probablemente no es una función suave. Este hecho motiva la computación de los parámetros de la correspondiente suma de Fourier de la señal, es decir, el cálculo en el dominio de la frecuencia.

Dada una función periódica $f(t)$ en el intervalo I, se considera la suma trigonométrica de Fourier:

$$S(t) = c_0 + \sum_{m=1}^{\infty}(c_m\cos(m\omega_0 t) + d_m\sin(m\omega_0 t)), \tag{1}$$

donde $\omega_0 = 2\pi/T$ es la frecuencia fundamental (T es el periodo). Los coeficientes c_0, c_m, d_m se definen como sigue:

$$c_0 = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt,$$

$$c_m = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos(m\omega_0 t)dt, \qquad m = 1, 2, \ldots$$

$$d_m = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin(m\omega_0 t)dt, \qquad m = 1, 2, \ldots$$

En el caso en estudio solo se conocen los datos muestreos de la señal experimental $x(t)$, por lo que para el cálculo de dichos coeficientes se utiliza la regla del trapecio compuesto.

Los parámetros Actividad y Movilidad se expresan en términos de los coeficientes de Fourier como sigue:

$$\mathcal{A} = m_0 = {c_0}^2 + \frac{1}{2}\sum_{m=1}^{M}\left({c_m}^2 + {d_m}^2\right),$$

$$\mathcal{M} = \left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} = \frac{\omega_0\left(\sum_{m=1}^{\infty} m^2\left({c_m}^2 + {d_m}^2\right)\right)^{1/2}}{\left(2{c_0}^2 + \sum_{m=1}^{\infty}\left({c_m}^2 + {d_m}^2\right)\right)^{1/2}}.$$

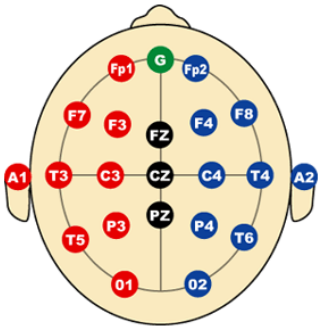
2.2. Sujetos

Las señales EEG analizadas en el trabajo se han recogido en el Hospital General de la Defensa de Zaragoza. Pertenecen a un grupo de voluntarios de las Fuerzas Armadas, compuesto por Caballeros y Damas Cadetes Alumnos, Oficiales y Suboficiales de la Academia General Militar de Zaragoza y del Hospital General de la Defensa de Zaragoza. Los EEG se han grabado en reposo y durante la realización de varios ejercicios tácticos de simulación en un Ipad del manejo de un carro de combate.

Para cada sujeto se han recogido seis tipos de señales de 3 minutos de duración, de las cuales en este trabajo se han analizado tres de ellas: EEG en reposo con ojos cerrados (oc), EEG en reposo con ojos abiertos (oa), EEG mientras se simula en un Ipad la conducción de un carro de combate (t1).

La señal electroencefalográfica de cada sujeto se ha grabado con un equipo ambulatorio digital que usa el software *Compumedics Limited Profusion EEG 4*. El montaje es monopolar (con electrodos de Ag/AgCl) y se utilizan 16 canales del Sistema 10-20 internacional de Jasper referenciados a Cz. La prueba se ha realizado en un recinto débilmente iluminado, tranquilo, a temperatura constante y en una sala eléctricamente blindada. La señal se ha muestreado a 256 puntos por segundo y se ha analizado el tercer minuto de cada registro.

En este estudio se presentan los resultados del análisis de 12 canales: C3, C4, F7, F8, O1, O2, P3, P4, T3, T4, T5 y T6 de 36 sujetos.



2.2.1. Métodos estadísticos

Tras obtener los valores de los parámetros de Hjorth para cada uno de los canales y tipo de EEG se ha realizado un estudio estadístico completo de los resultados obtenidos.

En primer lugar se ha llevado a cabo un análisis exploratorio de los datos, realizando diagramas de barras, gráficos Box-Plot y gráficos de error. A continuación se ha estudiado cada parámetro para analizar si existen diferencias significativas entre las tres tareas estudiadas en cada canal, tomadas dos a dos, es decir ojos cerrados contra ojos abiertos, ojos cerrados contra tarea de simulación de manejo del carro de combate y ojos abiertos contra tarea de simulación.

- **Movilidad**. Se ha aplicado la prueba de Kolmogorov-Smirnov para comprobar la hipótesis de normalidad de los datos. No se rechazan las hipótesis de normalidad en todos los canales con un nivel de confianza del 95%, por lo que se va a aplicar una prueba paramétrica T para muestras relacionadas con el fin de estudiar si existen diferencias significativas entre las tres tareas.

  La prueba T para dos muestras relacionadas permite contrastar la hipótesis de que la diferencia de medias entre cada dos tareas es cero en cualquiera de los 12 electrodos (es decir, tienen la misma media), con un nivel de confianza del 99.9% ($\alpha = 0.001$).

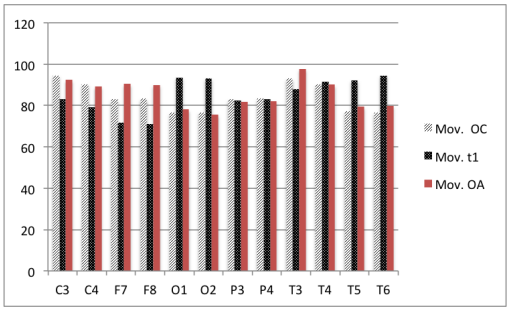
- **Actividad**. La prueba de Kolmogorov-Smirnov para comprobar la hipótesis de normalidad de los datos no se puede aceptar en la mayoría de los canales analizados. Para estudiar si existen diferencias significativas entre tareas se ha aplicado en este caso la prueba no paramétrica de Wilcoxon que contrasta la hipótesis de que los dos tipos de EEG en cualquier electrodo tiene la misma función de distribución (es decir, no hay diferencias significativas entre ambas mediciones). Principalmente mide la magnitud en valor absoluto de las diferencias entre los pares de mediciones realizadas a cada individuo en dos tareas.

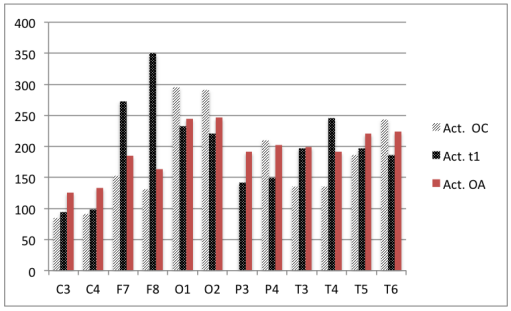
3. Resultados y Discusión

Las medias de los datos obtenidos en los parámetros de Hjorth (Actividad y Movilidad) para cada tarea y en cada electrodo se muestran en la siguiente tabla:

	MOVILIDAD			ACTIVIDAD		
	Basal oc	**Tarea t1**	**Basal oa**	**Basal oc**	**Tarea t1**	**Basal oa**
C3	94.524	83.206	92.446	84.210	93.923	126.050
C4	90.299	79.191	89.183	91.172	98.970	133.447
F7	82.928	71.567	90.415	153.008	272.954	185.016
F8	83.270	71.094	90.012	131.459	349.940	163.642
O1	76.432	93.522	78.093	295.229	232.542	244.958
O2	76.719	93.170	75.671	291.414	220.669	246.172
P3	82.946	82.507	81.874	192.5181	141.488	191.390
P4	83.511	82.962	82.207	210.416	148.849	202.005
T3	92.978	87.972	97.668	135.320	197.348	199,331
T4	90.045	91.412	90.047	135.553	245.581	191.324
T5	77.180	92.244	79.458	186.203	196.435	220.591
T6	76.498	94.528	79.916	243.456	186.587	223.720

Los diagramas de barras permiten observar las diferencias entre las medias.





La variabilidad de las medias en la Movilidad (71-98) es mucho menor que en la Actividad (84-350).

Se observa un aumento de la Movilidad (y por tanto de la frecuencia) durante la realización de la tarea de simulación respecto a las tareas basales en la zona occipital (O1 y O2) y en parte del área temporal (T5 y T6). El valor máximo registrado se da en la localización T6 durante la tarea, y los mínimos en frontales durante la realización del ejercicio. En la mayoría de los casos las medias en la tarea basal con ojos cerrados y basal ojos abiertos son similares. Esto se explica por la activación del área visual primaria y la zona temporal del cerebro (corteza auditiva primaria) durante la realización de la tarea de simulación, ya que ambas zonas son las que se involucran en este tipo de tareas (el vídeojuego está dotado de sonido).

En la Actividad destaca un aumento considerable del valor de la media durante la realización de la tarea de simulación respecto los electroencefalogramas basales en la zona frontal (F7 y F8) y en la temporal (T4).

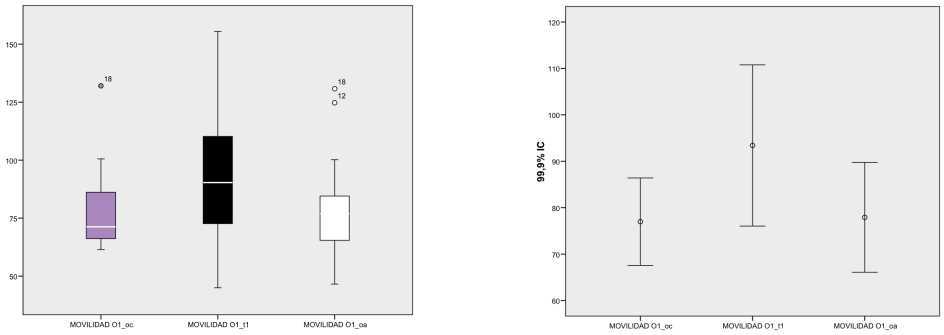
Los datos de la Movilidad analizados con la prueba paramétrica T para muestras relacionadas proporcionan los siguientes resultados:

- No hay diferencias significativas entre la tarea basal con ojos cerrados y la basal con ojos abiertos en ninguno de los electrodos estudiados.
- Las diferencias significativas entre el estado basal con ojos cerrados y la tarea de simulación, p-valores inferiores a 0.001, se dan en los canales O1, O2, T5 y T6, siendo superiores los valores correspondientes a la tarea.

- Las diferencias significativas entre la tarea de simulación y el estado basal con ojos abiertos, p-valores inferiores a 0.001, se dan en F7, F8, O1, O2, siendo la movilidad en la tarea superior en occipitales e inferior en frontales.

La siguiente tabla recoge los valores del estadístico de contraste y del nivel de significación obtenido en los electrodos en los que hay diferencias significativas.

	oc - t1		**t1 - oa**	
	T	p-valor	**T**	p-valor
F7	-	-	-4.606	0.000
F8	-	-	-5.904	0.000
O1	-4.195	0.000	4.479	0.000
O2	-4.546	0.000	4.546	0.000
T5	-3.905	0.000	-	-
T6	-4.955	0.000	-	-



En el gráfico box plot de la izquierda se observa que las puntuaciones durante la tarea son claramente diferentes (más altas), que en estado basal tanto con ojos cerrados como con ojos abiertos. En el gráfico barras de error de la derecha se muestra como la media de la tarea y su intervalo de confianza al 99, 9% es muy superior a la media en reposo (ojos cerrados y abiertos).

En la Actividad no se han encontrado diferencias significativas al aplicar la prueba no paramétrica de Wilcoxon en ninguno de los canales analizados en el estudio.

4. Conclusiones

Se puede concluir que la Movilidad es un buen indicador de la actividad cerebral, ya que varía en las distintas tareas en las áreas cerebrales involucradas en la realización de la tarea de atención. El aumento considerable de la Movilidad en las zonas occipitales y parte de las temporales, así como las diferencias significativas obtenidas en dichas áreas con el test estadístico (al comparar la tarea basal ojos cerrados con la simulación) muestran la activación del área visual primaria localizada en el lóbulo occipital y la corteza auditiva primaria localizada en el lóbulo temporal.

Los resultados previos obtenidos por nuestro grupo ya ponían de manifiesto la activación de estas áreas cerebrales [6–8]. Hasta el momento se había estudiado la diferencia entre el estado cerebral basal de ojos cerrados y la realización de la tarea. Se cuestionaba si las diferencias halladas en el área visual ponían de manifiesto la activación por la tarea o simplemente la apertura de ojos realizada durante la ejecución de la tarea. Este trabajo aclara esta cuestión, ya que al no haber diferencias entre el test basal ojos cerrados y el basal ojos abiertos y sí haberlas entre cada uno de ellos y el de la ejecución de la tarea,

se corrobora que es la realización de la tarea la que activa el área visual primaria y no simplemente la apertura de ojos.

Las diferencias encontradas entre la tarea basal ojos abiertos y la tarea de simulación en el área occipital corrobora los resultados anteriores de activación del área visual involucrada en la tarea. Esta activación puede deberse al procesado sensorial que realiza el sujeto durante la tarea atencional. Se trata fundamentalmente de mecanismos activados en los procesos que implican atención visual que es la modalidad de atención mejor investigada. La atención visual es el resultado de una red de conexiones corticales y subcorticales, de descripción prolija, que conforma un circuito cuya entrada es la información captada en la retina y su salida es a través del sistema oculomotor, por lo que no se afecta con los ojos cerrados.

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en el Proyecto de Investigación (CUD, ID: 2013-16), financiado por el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza.

Referencias

1. Campbell, K.; Bell, I.; Bastien, C. Evoked potential measures of information processing during natural sleep. En *Sleep, Arousal and Performance*; R.J. Broughton and R.D. Ogilvie (Eds.), Boston. Birkhuser, 1992, pp. 88-116.
2. Dussault, C.; Jouanin J.C.; Guezennec C.Y. EEG and ECG Changes During Selected Flight Sequences. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* **2004** *75* No. 10, 889-897.
3. Yang, H.; Wang, Y.; Wang, C.J.; Tai H.M. Correlation Dimensions of EEG Changes During Mental Tasks. Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS San Francisco, CA, USA, 2004, pp. 616-619.
4. Hjorth, B. EEG analysis based on time domain properties. *Electroenceph. and Clin. Neurophys.* **1970**, *29*, 306-312.
5. Hsu, H.P. Análisis de Fourier. Addison-Wesley Iberoamericana, S.A. Wilmington, 1987.
6. Navascués M.A.; Sebastián M.V. Fitting Curves by fractal interpolation: an application to the quantification of cognitive brain processes, in *Thinking in Patterns: Fractal and Related Phenomena in Nature*. Novak, M.M. (ed.) World Scientific Publishers, 2004; pp. 143-154.
7. Sebastián, M.V.; Navascués, M.A.; Valdizán J.R. Cuantificación de señales electroencefalográficas para el estudio de la atención. *Actas: Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad, DESEi+d 2013* González-Marcos, A.P. (coord.), Madrid, 2013; pp. 543-554.
8. Sebastián, M.V.; Navascués, M.A.; Ruiz C.; Iso J.M.; Arcos C.; Arana V.; Orna C. Estudio Electroencefalográfico de la atención durante la realización de tareas de simulación militar. *Actas: II Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad, DESEi+d 2014*. Dena Arto et al. Ed. Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza, 2014; pp. 487-494.

Sesión III-A

Adquisición de Información y Procesado

Modelos Ocultos de Markov como herramienta de análisis de perfiles conductuales. Aplicación al estudio de grupos terroristas.

Barreras Peral, Álvaro[1], Dranca, Lacramioara[1], López Castelló, Pedro A.[2], Oller Marcén, Antonio M.[1], Umpiérrez Rodríguez, Francisco J.[2], Velasco Cebrián, M. Pilar [1] y Vigara Benito, Rubén[1]*

[1] CUD Zaragoza; Email {albarrer,licri,oller,velascom,rvigara}@unizar.es
[2] Guardia Civil; Email {plopezcastello,fjumpierrez}@guardiacivil.es

* Autor responsable del trabajo; rvigara@unizar.es

Abstract: La detección automática de cambios de conducta en individuos o grupos es una herramienta de gran potencial para los cuerpos de seguridad, pues estos cambios de conducta pueden ser el reflejo observable de distintas actividades relacionadas con la dinámica de un grupo terrorista. En los estudios de detección de amenazas asimétricas como las acciones de bandas terroristas han comenzado a aplicarse técnicas matemáticas que permitan el reconocimiento de patrones temporales y la detección de cambios de conducta para intentar predecir y prevenir futuros ataques. El objetivo de este trabajo es modelizar la actividad de una banda terrorista a través de procesos estocásticos parcialmente observados, en particular modelos ocultos de Markov.

Keywords: modelo oculto de Markov; proceso estocástico; modelización actividad terrorista

---

1. Introducción

Muchos procesos del mundo real producen secuencias de símbolos observables (discretos o continuos), en los cuales la forma de obtención de dichos símbolos permanece oculta para nosotros. El problema consiste entonces en construir un modelo de señal que explique y caracterice la secuencia de los símbolos observados, lo cual permitirá identificar y reconocer secuencias de observaciones producidas posteriormente. Sin embargo, el planteamiento de tal modelo precisa tomar algunas decisiones iniciales que pueden condicionar la eficacia del modelo, por ejemplo, linealidad o no linealidad, variante o invariante en función del tiempo, determinista o estocástico, etc.

Uno de estos procesos reales donde se combinan acciones observables y no observables interrelacionadas es la dinámica de un grupo terrorista, para cuyo estudio se han empleado diversas técnicas

de modelización de procesos estocásticos relacionadas con el reconocimiento de patrones temporales. Como ya se mencionó en [1], los Modelos Ocultos de Markov (HMM por sus siglas en inglés) contituyen un importante método que permite modelizar este tipo de procesos estocásticos parcialmente observados, de forma que el sistema es una cadena de Markov cuyos estados no son directamente observables, pero se pueden inferir a través de otros procesos estocásticos que producen una secuencia de observaciones.

Este tipo de métodos podría aplicarse, por tanto, para la detección de amenazas asimétricas (por ejemplo, acciones terroristas) o de comportamientos anómalos identificando eventos raros y entonces definir así el patrón de actividades terroristas con un HMM. El HMM describiría la dinámica de una red terrorista incluyendo la información a priori de las personas involucradas, las características temporales de las transacciones (p.e., comunicaciones entre personas, viajes, financiaciones) y la localización geográfica, así como las transiciones del modelo en función de la densidad de actos terroristas permitiría predecir posibles cambios repentinos en la actividad del grupo.

En este trabajo analizamos los posibles tipos de aplicación de los HMM para modelizar la actividad de los grupos terroristas. Para ello, en la Sección 2 introducimos los precedentes y la teoría básica de los HMM como método de trabajo. En la Sección 3 desarrollamos tres paradigmas distintos de aplicación de estos modelos para la modelización de dinámicas terroristas. Posteriormente, en la Sección 4 establecemos las conclusiones obtenidas para su aplicación al caso concreto del grupo terrorista ETA.

2. Metodología estocástica: Los Modelos Ocultos de Markov

Existen en la literatura algunas técnicas previas a los HMM para la modelización del perfil de actividad de grupos terroristas que buscan proporcionar un fundamento teórico para el agrupamiento de los ataques. Podemos destacar los modelos autoregresivos por umbrales (TAR) que usan técnicas de análisis de series temporales [2], y los modelos autoexcitados de obstáculo (SEHM), que presentan dos componentes diferenciadas para explicar el esparcimiento y la agrupación de los datos [3].

Ambas técnicas asumen que el agrupamiento temporal de los ataques de un grupo terrorista se debe a consecuencias debidas a un evento acontecido. En contraposición con esta idea, los HMM asumen que el agrupamiento de los ataques puede explicarse en términos de alguna dinámica no observada de la organización terrorista.

Así, mientras otros modelos explican el agrupamiento de los ataques en función del número de ataques realizados con anterioridad, los HMM usan como hipótesis que el incremento o descenso de la intensidad de los ataques puede atribuirse de forma natural a posibles cambios en los estados internos del grupo, lo cual es un reflejo de la evolución en la dinámica del mismo. Este enfoque usado por los HMM con d-estados presenta múltiples ventajas:

- Las hipótesis necesarias son pocas y están fácilmente motivadas.
- El modelo es descrito por un número exacto de $d(d+1)$ parámetros.
- La singularidad en el conjunto de datos observados puede explicarse por la transición entre los distintos estados, al mismo tiempo que el agrupamiento de los ataques puede atribuirse a perfiles de intensidad diferente en cada estado.

- Las herramientas computacionales aplicables son eficientes y permiten el aprendizaje y la inferencia del modelo.

Podemos definir un HMM como un proceso doblemente estocástico, en el cual existe un proceso estocástico subyacente que no es observable pero que puede ser parcialmente observado a través de otros procesos estocásticos que producen una secuencia de símbolos.

Por ejemplo, consideremos el experimento de la obtención de una cadena de T observaciones $O = O_1O_2 \dots O_T$, en la que cada observación O_i corresponde al color v_j de una bola de M posibles colores, $V = \{v_1, \dots, v_M\}$, que ha sido obtenida del interior de una urna, la cuál a su vez fue elegida entre un total de N urnas distintas, $Q = \{q_1, \dots, q_N\}$, en un proceso no observable para nosotros. Cada urna puede ser interpretada como un estado diferente y entonces el proceso queda determinado por tres tipos distintos de distribuciones de probabilidad:

- Distribución de probabilidad del estado inicial $\pi = \{\pi_i\}$, donde π_i representa la probabilidad de estar en el estado q_i en el instante $t = 1$.

- Distribución de probabilidad de la transición de estado $A = \{a_{ij}\}$, donde a_{ij} representa la probabilidad de estar en el estado q_j en el instante $t + 1$ condicionado a estar en el estado q_i en el estado t.

- Distribución de probabilidad del símbolo de la observación $B = \{b_j(k)\}$, donde $b_j(k)$ representa la probabilidad de obtener la observación v_k en el instante t, condicionado a estar en el estado q_j en ese mismo instante.

En base a este ejemplo, observamos que un HMM tiene tres elementos principales a tener en cuenta:

- Un número finito de estados N.

- Un cambio de estado en cada instante t, obtenido en función de una distribución de probabilidad de transición que depende del estado previo.

- Un símbolo resultado de la observación obtenido tras cada transición en función de una distribución de probabilidad que depende del estado actual.

Y, por tanto, dicho modelo queda representado a través de las distribuciones de probabilidad que lo definen $\lambda = \{A, B, \pi\}$.

Una vez definidas las variables y establecidos los parámetros del modelo, surgen tres problemas fundamentales para la aplicación real de un HMM:

1. Problema de evaluación: Dada una secuencia de observaciones O y un modelo λ, cómo computar la probabilidad de dicha secuencia O restringida al modelo λ. Resolver este problema supone elegir el modelo que mejor se ajusta a las observaciones.

2. Problema de estimación: Dada una secuencia de observaciones O, cómo elegir la secuencia de estados $I = i_1, \dots, i_T$ óptima en algún sentido. Para resolver este problema es necesario elegir criterios óptimos que permitan conocer la estructura del modelo.

3. Problema de entrenamiento: Cómo ajustar los parámetros A, B, π del modelo λ para maximizar la probabilidad obtenida en el problema 1. La solución a este problema permite ajustar el modelo a los fenómenos reales.

La resolución de estos problemas permite un ajuste correcto del método al problema real y actualmente constituye un campo de mucho interés en este área.

Una introducción a los HMM puede encontrarse en [4], mientras que [5] y [6] presentan aplicaciones de los HMM al estudio de actividad terrorista.

3. Discusión: Aplicación de los HMM a la modelización de la dinámica de grupos terroristas

Debido a la naturaleza desconocida de algunos procesos durante el estudio de la dinámica de grupos terroristas, los modelos ocultos de Markov son un marco adecuado para su modelización. En este entorno, los símbolos observables son los atentados o los ataques perpetrados por el grupo terrorista. Sin embargo, existen dinámicas ocultas, parámetros desconocidos que explican parte de esas observaciones (estructura interna del grupo, características individuales de cada miembro, etc.). Por ello se han realizado diferentes análisis para modelizar mediante HMM la dinámica de grupos terroristas desde distintos puntos de vista y con diferentes objetivos. Por ejemplo, en [6] se utilizan HMM para detectar anomalías dentro de la actividad de un grupo terrorista. Los autores combinan la teoría de los modelos ocultos de Markov con un seguimiento de características, que incluye características importantes a tener en cuenta por el modelo (por ejemplo edad de una persona, localización de un evento, aspectos económicos, etc.), para alcanzar su objetivo. El estudio realizado en [5] sobre la actividad de grupos terroristas se analizará con más detalle en la siguiente subsección.

Dependiendo de los objetivos que se deseen alcanzar, se deberán utilizar diferentes estrategias y diferentes modelos. A continuación se presentarán tres paradigmas para el estudio de la dinámica de grupos terroristas, para cada uno de ellos se detallan los objetivos, aplicaciones y definición del modelo oculto de Markov correspondiente.

En cuanto a la definición y actualización de las distribuciones de probabilidad A, B y π de los siguientes modelos, se utilizarán los habituales algoritmos de Viterbi (problema de *estimación*) y Baum-Welch (problema de *entrenamiento*). Para inicializar dichos parámetros es necesario tener en cuenta características intrínsecas al problema tratado y al grupo terrorista, por lo que no se tratará en la definición inicial de los siguientes modelos.

3.1. Paradigma basado en el grupo terrorista

El primer caso es el presentado en [5]. Se pretende modelizar la actividad del grupo terrorista en su conjunto.

- *Objetivo*: modelizar la actividad del grupo terrorista, detectando cuándo el grupo está activo (produce más ataques en un intervalo de tiempo) y cuándo está inactivo (produce menos ataques en un intervalo de tiempo).
- *Aplicación*: detectar picos de actividad en el grupo terrorista, incrementos y descensos repentinos de atentados perpetrados por el grupo.

La solución propuesta por los autores en [5] es el uso de un HMM para el grupo terrorista, donde los parámetros son: $Q = \{\text{Inactivo, Activo}\}$ y $V = \{Ataque\}$.

Observemos que los posibles estados del grupo terrorista son *Inactivo* y *Activo* y el único símbolo observable es *Ataque*. En el apartado (c) de la Figura 1 se incluye el modelo en el que cualquiera de los dos estados es alcanzable desde cualquier estado. Los estados *Inactivo* y *Activo* se corresponden con los números 1 y 2 de la figura, respectivamente. En dicho trabajo se establece una ventana de tiempo δ (de 15 días), de manera que se realizan dos estudios diferentes analizando: $a)$ el número de ataques durante la ventana de tiempo δ, $b)$ el número de días con ataques en la ventana de tiempo δ. Como resultado se obtiene un modelo de la actividad del grupo en su conjunto que permite detectar incrementos y descensos en la actividad del mismo, produciéndose así los cambios de estado entre *Inactivo* y *Activo*.

Para un profundo estudio de este modelo, así como su aplicación a dos casos particulares (*FARC* y *Shining Path*) véase [5].

3.2. Paradigma basado en los comandos del grupo terrorista

En este segundo caso se asume que el grupo terrorista está compuesto por varios comandos y se desea estudiar la actividad de los diferentes comandos dentro del grupo.

- *Objetivo*: modelizar la actividad de cada comando dentro del grupo.
- *Aplicación*: ocurrido un atentado, determinar la probabilidad de que un comando sea el autor de dicho atentado. Elaborar un perfil de la actividad de cada comando, con la naturaleza de sus acciones y su desarrollo temporal.

La solución que se presenta es la creación de un HMM en el que los estados posibles corresponden a cada uno de los comando del grupo y los símbolos observables del modelo corresponden a los atentados realizados. De esta forma los parámetros serían: $Q = \{C_1, \ldots, C_N\}$ y $V = \{v_1, \ldots, v_M\}$, donde C_i denota el comando i–ésimo dentro de los N comandos en los que se divide el grupo. Los símbolos observables, v_j, corresponden a los diferentes tipos de atentado que pueden darse. [1]

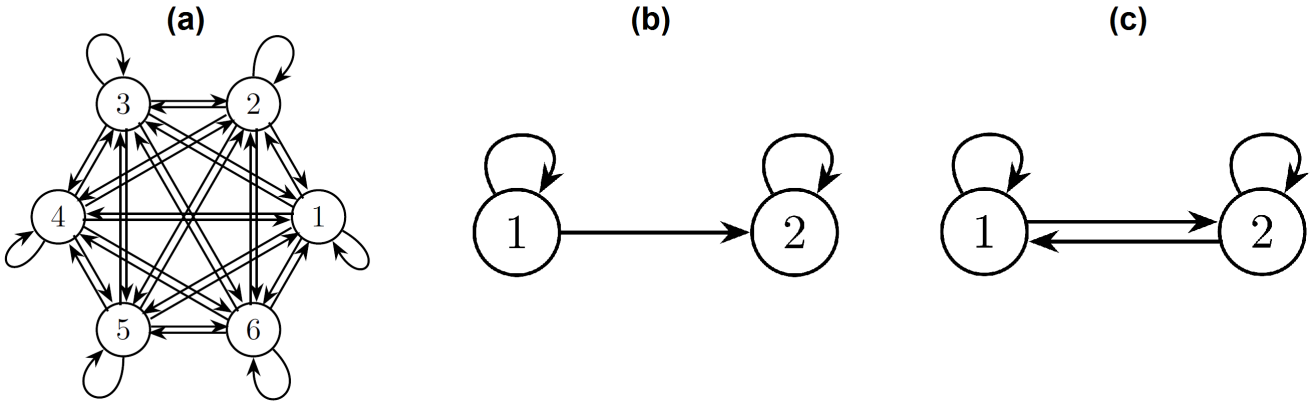
En el apartado (a) de la Figura 1 se incluye el modelo para este caso en el que se ha representado un modelo con seis posibles estados (el razonamiento es análogo para cualquier número de estados). Se trata de un modelo ergódico, en el que es posible alcanzar cualquier estado (comando) desde cualquiera de los estados. La interpretación es la siguiente: para cada observación (atentado) del modelo, el estado oculto (comando autor del atentado) puede cambiar a cualquier otro estado o seguir siendo el mismo; es decir, atentados consecutivos pueden ser obra de distintos comandos o del mismo comando.

En este estudio se ha asumido que cada atentado se lleva a cabo por un único comando, suposición aceptable en muchos entornos. Si se desea estudiar entornos en los que en un solo atentado pueden involucrarse diferentes comandos es necesaria una estrategia diferente.

En cuanto a los símbolos observados, una posible mejora de esta estrategia es la de incluir información geográfica sobre el atentado. De manera que el símbolo incluya el tipo de atentado y la localización del

[1] Una posible clasificación de los tipos de atentado, sugerida por expertos en terrorismo de la Guardia Civil, sería: arma, explosión, logística.

Figura 1. Modelos de actividad.



mismo. En muchos entornos, la localización de un atentado es un parámetro importante a la hora de establecer la autoría del mismo.

3.3. Paradigma basado en los individuos del grupo terrorista

El último caso a estudiar se centra en la modelización de la actividad individual de cada persona perteneciente al grupo terrorista. Distinguiremos dos subcasos dentro de este paradigma, correspondientes a dos objetivos diferentes.

- *Objetivo 1*: modelización de la actividad de cada individuo en función de si este ha sido *captado* por el grupo o si ha sido *integrado* en el grupo terrorista.
- *Aplicación 1*: detección de los momentos de *captación* e *integración* en el grupo terrorista (interés real, por ejemplo, por parte de la Guardia Civil en el seguimiento de miembros de ETA).

Sobre la hipótesis de que la conducta pública de un individuo está influida por el grado de implicación en las actividades del grupo terrorista, se propone crear un HMM para cada individuo del grupo. De esta forma los parámetros serían: $Q = \{\text{Captado, Integrado}\}$ y $V = \{v_1, \ldots, v_M\}$, donde los estados *Captado*, *Integrado* hacen referencia a la situación personal del individuo respecto al grupo. Puesto que la integración del individuo en el grupo terrorista no es un hecho inmediato, primero se produce un acercamiento y el individuo es captado por el grupo, involucrándose cada vez más hasta que pasa a formar parte del grupo como un miembro más (Integrado). Al igual que en el caso anterior, los símbolos observables, v_j, corresponden a los diferentes tipos de atentado.[2] En el aparado (b) de la Figura 1 se incluye el modelo para este caso, se trata de un caso particular de modelo *left-to-right*. En estos modelos solo es posible cambios de estado desde aquellos con índices más bajos hacia índices más altos. El estado *Captado* se corresponde con el número 1 en la figura y el estado *Integrado* con el número 2. En cada nueva observación (atentado cometido), el estado del individuo puede permanecer igual o puede cambiar al siguiente (de *Captado* a *Integrado*) pero no puede cambiar a un estado anterior (de *Integrado* a *Captado*).

[2]Para cada modelo (recordemos que se establece un modelo para cada individuo), todas las observaciones consideradas se corresponden con atentados en los que ha participado el individuo de dicho modelo.

Una alternativa dentro de este paradigma es la de considerar más posibles estados. Por ejemplo considerar $Q = \{\text{Afín, Captado, Integrado}\}$, de manera que se modelice la trayectoria del individuo desde un periodo anterior y poder detectar el momento de captación (ver Sección 4 para otra alternativa).

Por último, presentamos el segundo problema de modelización dentro del estudio de la actividad individual:

- *Objetivo 2*: modelización de la actividad de cada individuo en función de la participación en cada uno de los atentados.
- *Aplicación 2*: determinar la autoría de un atentado realizado. Elaboración de un historial individual de la participación en atentados de cada miembro del grupo terrorista.

En este caso también se crea un HMM para cada individuo del grupo, siendo los parámetros del modelo: $Q = \{\text{No involucrado, Involucrado}\}$ y $V = \{v_1, \ldots, v_M\}$, donde los estados hacen referencia a la involucración del individuo del modelo en un atentado observado. Los símbolos observables agrupados en V son los mismos que los del caso anterior. En el apartado (c) de la Figura 1 se muestra el modelo correspondiente a este caso. Los números 1 y 2 de la figura se corresponden con los estados *No involucrado* e *Involucrado* respectivamente. En este modelo cualquier estado es alcanzable desde cualquier otro estado; es decir, la participación de un individuo en un atentado observado no explica su involucración en la observación (atentado) siguiente.

Evidentemente, si un individuo no participa en un atentado, la probabilidad de que cometa cualquiera de los tipos de atentado reflejados en V será cero. No obstante, el hecho de que el modelo refleje un estado *No involucrado* no impide que la probabilidad $P(\text{No Involucrado} \mid v_i)$ sea no nula; es decir, es posible que para alguna observación v_i el estado de dicho individuo según la estimación del modelo sea *No involucrado*. Esto se debe a que la involucración del individuo (su estado) en un atentado es desconocida (oculta) para el modelo, por lo que puede haber discrepancias y es necesario tenerlas en cuenta a la hora de trabajar con este tipo de modelos.

Observemos que es posible que haya más de un individuo involucrado en un mismo atentado. No obstante, no hay problemas de definición en la solución presentada, puesto que para cada individuo se ha definido un HMM diferente y la coautoría en un atentado no supone ningun problema.

4. Conclusiones: Aplicación de los HMM a la modelización de un caso particular, ETA

Una vez presentadas distintas soluciones basadas en HMM para modelizar la dinámica de grupos terroristas, concluimos en función de las necesidades de la Guardia Civil que el paradigma presentado en la Subsección 3.3 es el que ofrece actualmente una aplicación más útil al caso particular de ETA.

Existen miembros del grupo terrorista "no fichados" de los que los cuerpos de seguridad desconocen su pertenencia a ETA. Estos individuos no fichados pueden pasar desapercibidos llevando una vida aparentemente normal, pero en muchos casos tienen en común su pertenencia al *entorno* del grupo: colectivos públicamente afines a las actividades de ETA. Las fuerzas de seguridad disponen de distintos mecanismos de control y vigilancia de las actividades *públicas* de dicho entorno: manifestaciones, reuniones, firma de manifiestos, etc. En esas labores de control se recolecta información sobre múltiples individuos que no son miembros "fichados" del grupo. Esta información queda almacenada, y cuando los

cuerpos de seguridad detienen a un miembro del grupo en ocasiones descubren que el detenido figura en sus bases de datos como participante en actividades públicas de apoyo al grupo realizadas en el pasado.

El resultado principal que aquí presentamos se basa en la implementación del paradigma presentado en la Subsección 3.3 para modelizar la actividad individual de esas personas afines al grupo terrorista ETA. Se desea establecer una medida de la probabilidad de que un individuo no fichado haya sido captado por el grupo, por tanto los estados del modelo serán: $Q = \{\text{Afín, Captado}\}$.

Una vez establecido el marco teórico, se podrían contrastar los resultados obtenidos mediante este modelo con información extraída de bases de datos de los cuerpos de seguridad. Cada individuo k almacenado en la base de datos proporciona una secuencia de observaciones $O_1^k, \ldots, O_T^k$ a partir de sus intervenciones públicas, y en el caso de los individuos captados y posteriormente detenidos conocemos también la secuencia de estados $i_1^k, \ldots, i_T^k$ subyacente. Para estimar los parámetros de nuestro modelo λ, utilizaríamos los datos almacenados sobre los individuos detenidos. Una vez hecho esto, para cada uno de los individuos no fichados se calcularía la probabilidad de encontrarse en el estado "Captado" sujeto a su correspondiente secuencia de observaciones (problema de estimación). La implementación de dicho modelo así como la validación del mismo mediante información de dichas bases de datos forma parte del trabajo actual y futuro de los autores de este trabajo y se encuentra a la espera de la recepción de nuevos datos que ha sido acordada para ser proporcionada próximamente por la Guardia Civil.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza a través del proyecto CUD 2013-02. Así mismo, la Jefatura del Servicio de Información de la Guardia Civil ha facilitado todos los datos a estudio, colaborando activamente en el proyecto.

Referencias

1. Velasco, M.P.; Bernardi, S.; Dranca, L.; López, P.A.; Oller, A.M.; Sánchez, A.; Umpiérrez, F.J.; Vigara, R. Estudio de aplicabilidad de técnicas de minería de datos para el apoyo a la toma de decisiones en la lucha antiterrorista. En: Dena, A. *et al.* Actas: II Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad, DESEi+d 2014. Ed. Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, **2014**, 157-164.
2. Enders, W.; Sandler, T. The effectiveness of antiterrorism policies: A vector autoregression-intervention analysis. *The American Political Science Review* **1993**, *87*, 829-844.
3. Porter, M.D.; White, G. Self-exciting hurdle models for terrorist activity. *Ann. Appl. Stat.* **2012**, *6*, 106-124.
4. Rabiner, L.R.; Juang, B.H. An introduction to hidden Márkov models. *IEEE ASSP Magazine* **1986**, 4-15.
5. Raghavan, V.; Galstyan, A.; Tartakovsky, A.G. Hidden Márkov models for the activity profile of terrorist groups. *The Annals of Applied Statistics* **2013**, *7*, 2402-2430.
6. Singh, S.; Tu, H.; Donat, W.; Pattipati, K.; Willett, P. Anomaly Detection via Feature-Aided Tracking and Hidden Márkov Models. *IEEE Transactions on Systems, Man and CyberneticsPart A: Systems and Humans* **2009**, *39*, 144-159.

Debilidades y amenazas del sistema 3G y análisis de detección de BTS atacante

Fernández Alonso, Diego [1,*], Vázquez Alejos, Ana [2] y García Sánchez, Manuel [2]

[1] Sistemas Radio, Universidad de Vigo. Email: diegoferalonso@uvigo.es (D.F.A.)
[2] Sistemas Radio, Universidad de Vigo.; Emails: analejos@uvigo.es (A.V.A)
manuel.garciasanchez@uvigo.es (M.G.S.)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: diegoferalonso@uvigo.es (D.F.A.)

Abstract:

Este artículo presenta debilidades y amenazas de la 3ª generación de comunicaciones móviles (3G), que aunque proporciona autenticación mutua, confidencialidad e integridad, presenta partes vulnerables en la arquitectura. Estas debilidades están relacionadas con el establecimiento y transmisión de claves y datos en texto plano durante el proceso. Aprovechar las vulnerabilidades de 3G no es fácil debido a que es necesario tener conocimientos sobre recursos específicos, como software para configurar una estación base transceptora (Base Transceiver Station, BTS). Mayormente las amenazas se llevan a cabo sobre la interfaz radio ya que es donde los intrusos tienen más capacidad de acceso. Usando el método denominado Captura de Identidad, un intruso puede modificar las capacidades de seguridad del equipo de usuario y forzar al dispositivo víctima a usar un mecanismo de autenticación más débil. Se puede asociar al ataque Man-in-the-Middle usando una BTS falsa para interceptar la comunicación entre la víctima y la red cuando la BTS falsa está conectada a una PLMN (red móvil terrestre pública) real.

Keywords: seguridad, vulnerabilidad, UMTS, ataque, cifrado, integridad.

---

1. Introducción

Una de las partes más vulnerables de la arquitectura de 3G es el acceso a la red, debido a que es donde se sitúan las principales amenazas, y están relacionadas con el establecimiento y transmisión de claves y datos en texto plano durante el proceso. Los algoritmos de autenticación y acuerdo de clave, y encriptación e integridad, son muy robustos, pero las vulnerabilidades existen debido al modo que el sistema tiene para iniciar el establecimiento de seguridad con estos algoritmos.

Los mensajes de seguridad son estudiados en función de dos procesos principales de seguridad, la autenticación mutua y el cifrado e integridad. El procedimiento de establecimiento del modo de seguridad define el proceso de establecimiento de seguridad con sus mensajes, e indica los mensajes protegidos en los enlaces ascendente (móvil – estación base) y descendente (estación base – móvil).

El terminal de usuario (User Equipment, UE) se compone del dispositivo 3G y del módulo USIM (Universal Subscriber Identity Module). La USIM es la tarjeta con las configuraciones y datos de usuario. En este módulo se almacena entre otra información el número IMSI (International Mobile Subscriber Identity), que identifica unívocamente una estación móvil particular y es sensible a ataques. La tarjeta USIM debe soportar la autenticación y acuerdo de clave de 3G y ser compatible con el sistema GSM.

2. Procedimientos de Seguridad y algoritmos en UMTS

Los mensajes de seguridad son estudiados en función de dos procesos principales de seguridad:

- Autenticación Mutua.
- Cifrado / Integridad.

Las especificaciones sobre procedimientos de seguridad y algoritmos comenzaron a ser descritos por el 3rd Generation Partnership Project (1999) de la especificación UMTS 3GPP. UMTS proporciona:

- Confidencialidad.
- Integridad.
- Autenticación mutua.

La autenticación trabaja entre el abonado de UMTS y la red de servicio (SN). La confidencialidad se logra usando algoritmos de cifrado (o encriptación) para tráfico de datos, usando un mecanismo para el TMSI (Temporary Mobile Subscriber identity), haciendo que el número IMSI no pueda ser obtenido. El uso del mecanismo de integridad de datos para señalización habilita la protección contra estaciones base falsas.

Mensajes de datos y señalización son intercambiados entre el equipo de usuario (UE) y el conjunto SGSM/VLR mediante enlaces de radio y enlaces cableados. Dependiendo del mecanismo los mensajes son intercambiados en diferentes capas.

El mecanismo de integridad intercambia mensajes de señalización entre el UE y el RNC a nivel de RRC (Radio Resource Control)

El mecanismo de encriptación intercambia mensajes de señalización entre el UE y el RNC en las capas de RLC (Radio Link Control) y MAC (Medium Access Control).

El transporte de la Clave de Cifrado (CK) y de la Clave de Integridad (IK) utiliza el control de señalización. La información enviada a la red UMTS tiene dos objetivos:

- La protección de datos a través de la encriptación e integridad entre el UE y el RNC.
- Autenticación mutua entre USIM y SGSN/VLR y entre HLR/AuC y USIM.

El proceso de autenticación contiene:

- La Clave de Autenticación K, generada en el AuC.
- Las funciones de autenticación f1 y f2.
- Las funciones de generación de clave f3, f4 y f5.
- El número de secuencia SQN, también generado en el AuC.

La protección del Cifrado/Integración contiene:

- La Clave de Cifrado (CK).
- La Clave de Integridad (IK).
- La función de cifrado f8.
- La función de integridad f9.

El registro HLR almacena los datos de entorno donde el UE es almacenado por política de seguridad. El AuC es parte de la red en donde los números de secuencia (SQNs) son generados, en adición a los números aleatorios (RANDs) para ser relacionados con la clave secreta K, la cuál es compartida entre el UE y la Home Network (HN).

3.1. Procedimiento de establecimiento del modo de seguridad

Este procedimiento define el proceso de establecimiento de la seguridad junto con sus mensajes e indica los mensajes protegidos con integridad en los enlaces ascendente y descendente.

El cifrado y descifrado tiene lugar en el terminal y en el RNC en el lado de la red, y la Clave de Cifrado tiene que ser transferida desde el Núcleo de Red (CN) a la Red de Acceso Radio (RAN). Después de que el RNC haya obtenido la Clave de Cifrado, se puede activar la encriptación enviando el comando del modo de seguridad Control de Recurso Radio (RRC) al terminal.

Cuando la protección de integridad (y posiblemente de encriptación) esté activada, mensajes e información relevante de seguridad son transmitidos entre UE, RNC y SGSN/VLR durante el procedimiento de establecimiento.

La USIM deberá soportar autenticación y acuerdo de clave (AKA), y soportar retrocompatibilidad con el sistema GSM (3rd Generation Partnership Project, 2015).

El primer mensaje de petición de conexión es enviado sobre el Canal de Acceso Aleatorio, el cuál es un canal común y puede ser fácilmente interceptado constituyendo un punto de vulnerabilidad.

En la figura 1 se describe gráficamente los pasos del procedimiento de configuración de seguridad entre los elementos de red envueltos en el proceso.

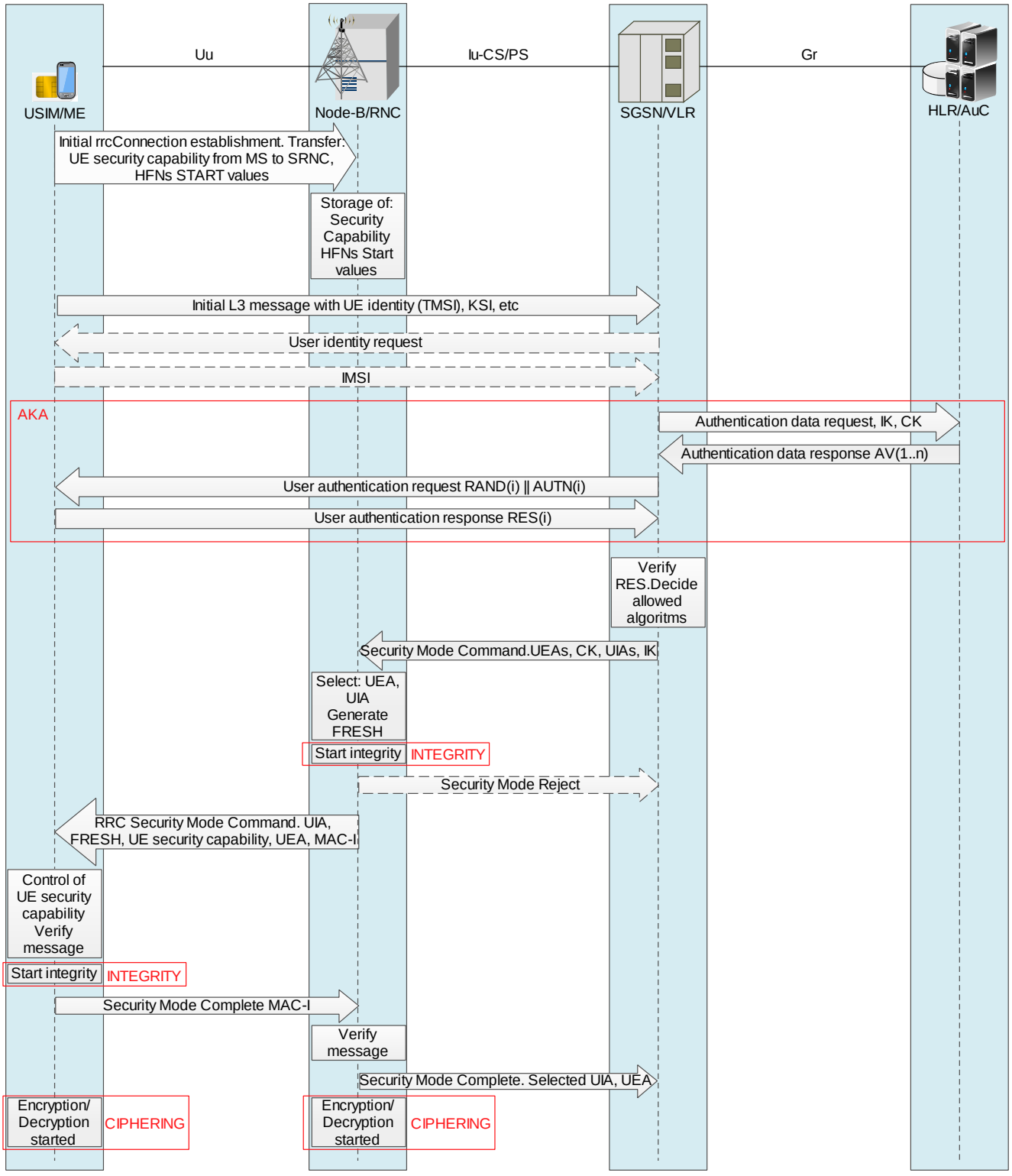


Figura 1. Proceso de establecimiento de seguridad.

3. Vulnerabilidades en el procedimiento de establecimiento del modo de seguridad

La arquitectura de seguridad de UMTS ofrece cierta protección contra amenazas incluyendo ataques de estaciones base falsas, Man-in-the-Middle y de repetición. El sistema también asegura la

confidencialidad de datos de usuario y la integridad de datos de señalización. Sin embargo la arquitectura presenta vulnerabilidades en relación con el procedimiento de establecimiento del modo de seguridad debido a que uno de los interfaces utilizado es el radio, donde los intrusos pueden llevar a cabo la mayoría de los ataques contra el sistema 3G.

En el procedimiento de establecimiento del modo de seguridad el mensaje de "Establecimiento de Conexión RRC" no está protegido. Este mensaje inicial incluye las "Capacidades de Seguridad del UE" ya que la red debe conocer la información antes del comienzo de la protección de integridad. Las capacidades de seguridad del UE incluyen los Algoritmos de Encriptación y las capacidades de integridad para UMTS.

La Autenticación y Acuerdo de Clave proporciona dos autenticaciones simultáneamente, el equipo móvil y la red. Pero algunos mensajes no están protegidos, como el número IMSI, el quinteto de autenticación (AUTN), el número aleaotrio (RAND), la respuesta ampliada (XRES), la Clave de Cifrado (CK), la Clave de Integridad (IK), el par RAND y AUTN y la respuesta de usuario. No están protegidos ni por cifrado ni por integridad [1]. Sin embargo la respuesta de datos de autenticación donde AUTN, XRES, CK, IK, y RAND son incluidos, no es transmitida sobre el interfaz radio Uu, en el cuál se sitúan las principales amenazas.Una importante brecha de seguridad es el número IMSI debido al proceso de identificación. En este proceso cuando el VLR/SGSN envía la petición de identidad de usuario, el UE/USIM transmite una respuesta con el IMSI en claro dentro del mensaje de respuesta. Las amenazas sobre el interfaz radio de un intruso son mostradas en la tabla 1.

Acceso no autorizado a los datos	
Interceptación del tráfico de usuario	Para interceptar el tráfico de usuario en el interfaz radio
Interceptación de datos de control o de señalización	Para interceptar datos de control o de señalización para acceder a la administración de seguridad u otra información
Enmascaramiento como participante de la comunicación	Para enmascarar un elemento de la red para interceptar tráfico de usuario, datos de señalización o datos de control
Análisis pasivo de tráfico	Para observar el tiempo, tasa, longitud, origen o destino de los mensajes para obtener acceso a la información
Análisis activo de tráfico	Para iniciar sesiones de comunicaciones y luego obtener acceso a la información a través de la observación del tiempo, tasa, longitud, orígenes o destinos de mensajes asociados
Amenaza a la integridad	
Manipulación del tráfico de usuario	Para modificar, insertar, repetir o borrar tráfico de usuario, por manipulación accidental o deliberada
Manipulación de datos de control o de señalización	Para modificar, insertar, repetir o borrar datos de señalización o datos de control, por manipulación accidental o deliberada.
Ataques de negación de servicio	
Intervención física	Para impedir que sea transmitido por medios físicos el tráfico de usuario, datos de señalización y datos de control
Intervención por protocolo	Para impedir que sea transmitido tráfico de usuario, datos de señalización y datos de control induciendo fallos de protocolos.

Ataque enmascarándose como un participante de la comunicación	Para denegar el servicio a un usuario impidiendo la transmisión del tráfico de usuario, datos de señalización o datos de control, enmascarándose como un elemento de red
Acceso no autorizado a servicios	
Enmascarándose como otro usuario	Para suplantarse como otro usuario hacia la red.

Tabla 1. Amenazas sobre el interfaz radio [2].

La lista completa de amenazas de seguridad está definida por el ETSI 3rd Generation Partnership Project (2001).

4. Ataques contra un dispositivo UMTS/HSPA

Para el desarrollo de los ataques los intrusos deben tener capacidades computacionales y una o más de las capacidades de interceptación, suplantación de usuario, suplantación de red, Man-in-the-Midde, y comprometer vectores de autenticación en la red.

Para desarrollar ataques contra un dispositivo UMTS con capacidad 2G/2.5G, como la obtención de la identidad de usuario, negación de servicio, supresión de encriptación entre objetivo e intruso, y Man-in-the-middle, es necesario utilizar una estación base modificada para suplantar la celda de una BTS real. Los ataques son llevados a cabo contra un dispositivo UMTS capaz de conectarse a la red GSM/GPRS/EDGE y soportar encriptación GEA/0 (GPRS Encryption Algorithm). Estos ataques explotan una debilidad de muchos dispositivos móviles debido a la opción que tienen de conectarse automáticamente a una red 3G o 2G dependiendo de la disponibilidad de ambos.

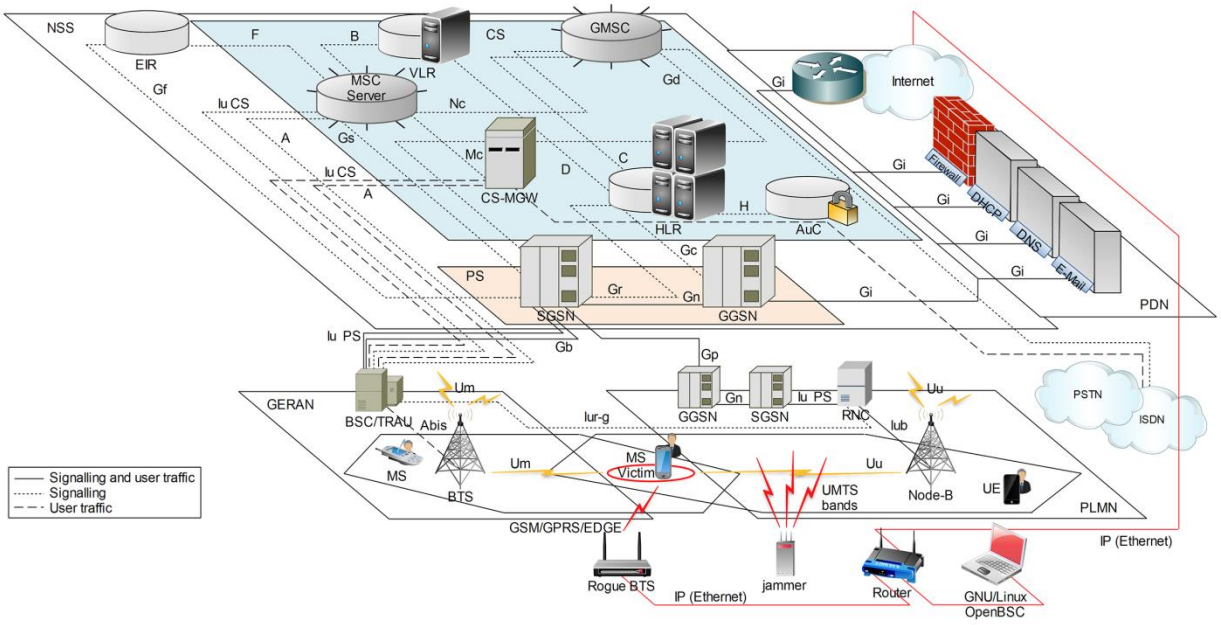


Figura 2. Ataque en las redes UMTS y GERAN.

El dispositivo móvil objetivo debería perder la conexión con su red real y conectarse a la BTS atacante, para lo que se puede usar un inhibidor de frecuencias o transmitir la señal con más potencia que la auténtica BTS.

De este modo se utiliza la debilidad de GSM de no utilizar autenticación bidireccional. El dispositivo tiene que autenticarse a la red a través del número IMSI, pero la estación no tiene por qué autenticarse [3]. Además la estación base puede no usar encriptación, y el dispositivo deberá aceptarlo, ya que está obligado a aceptar el tipo de encriptación especificado por la estación base.

Usando el método de Captura de Identidad, un intruso puede modificar las capacidades de seguridad del equipo de usuario y forzar al dispositivo víctima a usar un mecanismo de autenticación más débil. De hecho la red permite a usuarios soportar seguridad sin cifrado usando UEA0 (algoritmo de encriptación UMTS 0).

Um es el interfaz radio en GSM y GPRS, y el A-bis es el interfaz que conecta la BTS y el controlador de estación base (BSC). El interfaz Gb permite la conexión de un BSC perteneciente a una red GERAN (GSM/EDGE Radio Access Network) con el SGSN (Serving GPRS Support Node) de una red GPRS, o con el SGSN del núcleo de una red UMTS

5. Detección de BTS atacante

Un ataque de una BTS GSM/GPRS falsa podría ser detectado en una fase temprana a través de la detección de la portadora transmitida.

Se necesita para esto un analizador de espectro para determinar si una portadora puede ser potencialmente maliciosa. Aunque el nivel de potencia de recepción depende de la localización relativa de las estaciones base y el dispositivo, la BTS maliciosa necesita transmitir con más potencia para ser detectada.

Se puede utilizar dos métodos para la posible detección. Uno de ellos es la comparación entre "time-slots" de la duplexación por división en tiempo (TDD) el cuál permanece vacío en la BTS falsa.

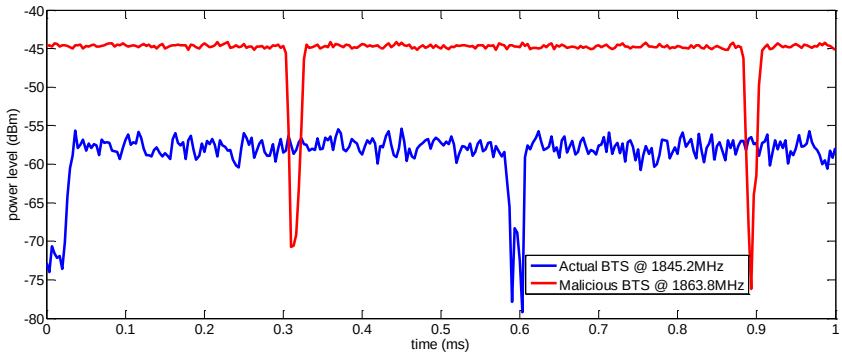


Figura 3. Comparación de tiempos de BTSs real y falsa.

El segundo método de detección consiste en comprobar el control de potencia de la señal. La señal de una estación base real utiliza un bucle de control, mientras que la BTS falsa no tiene esta capacidad de potencia de control, pudiendo hacer posible determinar si la portadora es legítima o no.

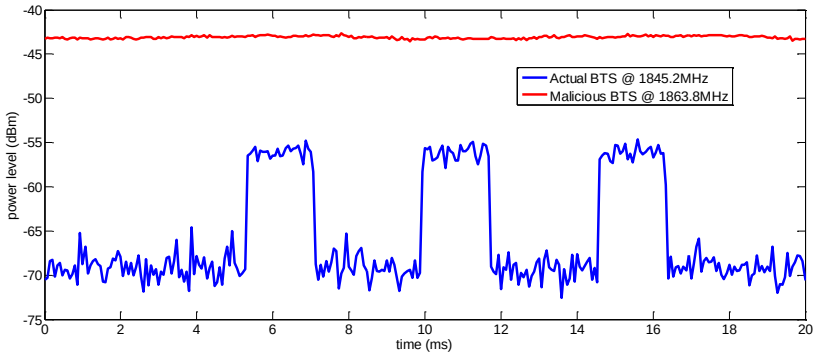


Figura 4. Comparación entre controles de potencia.

4. Conclusiones

La arquitectura de UMTS proporciona autenticación mutua, adecuadas clave de integridad y de cifrado e integridad de datos de mensajes de señalización en el interfaz radio. UMTS hereda parte de las debilidades de 2G y 2.5G ya que la tecnología 3G debe de ser compatible con estas últimas.

Uno de los problemas de seguridad de UMTS es el intercambio de mensajes en el procedimiento de establecimiento de seguridad debido a los mensajes transmitidos sin encriptar. Debido a que los núcleos de los métodos de seguridad, algoritmo de Milenage para Autenticación y Acuerdo de Clave, y Kasumi para encriptación e integridad no han sido rotos, los ataques intentan romper la seguridad de los mensajes no cifrados, pero no descifrar los mensajes encriptados. Además para llevarlos a cabo se necesitan conocimientos específicos y los equipos necesarios pueden ser muy caros.

Por otro lado sería posible detectar un posible ataque de una BTS falsa mediante una comparación de los “time-slots” o comprobando el control automático de potencia.

Referencias

1. Khan, M.; Ahmed, A.; Raza Cheema, A.; Vulnerabilities of UMTS Access Domain Security. *Architecture, Ninth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing* **2008**, 350-355.
2. ETSI 3rd Generation Partnership Project. Security threats. *3G security; Security threats and requirements* **2001**. Technical Specification TS 21.133; version 4.1.0 Release 4.
3. Picó, J.; Pérez, D. A practical attack against GPRS/EDGE/UMTS/HSPA mobile data. *Black Hat DC* **2011**.

Trabajo apoyado por el Gobierno de España y el Fondo de Desarrollo Regional Europeo (ERDF) bajo el proyecto *TACTICA*.

Estudio teórico-práctico del fenómeno de contribución por onda reflejada aplicado a un buque de la Armada Española.

Antoranz Álvaro, Javier [1,*]

[1] Ministerio de Defensa. Armada Española. Escuela Naval Militar. Centro de Estudios y Medidas Electromagnéticas (CEMEDEM). Email: **jantalv@fn.mde.es**

* AN (CIA-EOF) Javier Antoranz Álvaro. E-Mail: **jantalv@fn.mde.es**

Abstract:

Los buques de guerra de la actualidad disponen de un gran número de sistemas de comunicaciones que transmiten y reciben energía electromagnética. Para garantizar la operatividad de los mismos es necesario conocer los diagramas de cobertura de las antenas encargadas de radiar la señal, y para una correcta interpretación de dichos diagramas es imprescindible conocer la validez del modelo de propagación característico de cada diagrama medido. Este artículo se centra en el estudio de la validez de un determinado modelo de propagación conocido como "Propagación por onda de espacio con efecto de reflexión en la Tierra". Este modelo propone la existencia de un fenómeno físico consistente en que la señal recibida en la unidad receptora es la combinación del rayo de visión directa (propagación en espacio libre) y del rayo reflejado en la superficie marítima. Este fenómeno es conocido como contribución por onda reflejada. Para estudiar la validez de dicho modelo, el presente artículo tiene por objeto realizar un experimento para obtener la curva de propagación de un radar de navegación implantado en un buque de la Armada Española (Patrullero SERVIOLA), y comparar los resultados obtenidos con los esperados teóricamente.

Keywords: propagación, onda reflejada; suma en fase; oposición de fase, SERVIOLA,

1. Introducción

Los buques de guerra actuales poseen numerosos sistemas de comunicaciones. Si se quiere garantizar una correcta operatividad de los mismos y poder realizar cálculos correctos tanto de alcance como de cobertura espacial, es necesario conocer el modelo de propagación característico de cada sistema de comunicación. El modelo de propagación característico de un sistema de comunicaciones depende fundamentalmente de la frecuencia utilizada para la transmisión de señal, así como de las condiciones medioambientales en las que se realice la propagación.

Este artículo se centra en el modelo de propagación adecuado para medir diagramas de cobertura de antenas transmisoras de UHF y SHF situadas en un buque que navega en un mar en calma, con visión directa de la unidad medidora, y sin presencia de obstáculos entre el buque y la unidad medidora. En esas condiciones el modelo de propagación idóneo es el modelo de propagación por onda de espacio con efecto de reflexión en la Tierra. Este modelo propone la existencia de un fenómeno físico consistente en que la señal recibida en la unidad receptora es la combinación del rayo de visión directa (propagación en espacio libre) y del rayo reflejado en la superficie marítima. Este fenómeno es conocido como **contribución por onda reflejada.**

La importancia de este fenómeno radica en que ocurre con mucha frecuencia, ya que las condiciones de medida definidas previamente, son muy habituales a la hora de medir diagramas de cobertura o calcular alcances de sistemas de UHF y SHF (especialmente en los rádares de navegación).

En este artículo, se explicará en primer lugar el fenómeno de contribución por onda reflejada. En segundo lugar se realizará un pequeño experimento consistente en medir a través de trayectorias de alejamiento y acercamiento, la curva de propagación característica de un radar de navegación implantado en un buque de la Armada Española (Patrullero SERVIOLA), para posteriormente comparar los resultados obtenidos con lo esperado a nivel teórico y poder así extraer conclusiones.

2. Descripción del fenómeno de contribución por onda reflejada

La troposfera y la ionosfera, la orografía del suelo, los obstáculos presentes, la elevación de las antenas transmisoras y receptoras sobre el suelo, la curvatura de la tierra y la climatología son los responsables de que el modelo ideal de propagación en espacio libre, descrito por la ecuación de Friis, no sea correcto en la mayoría de los casos reales.

En frecuencias de VHF y superiores se consideran aquellos mecanismos de propagación en los que la contribución más importante proviene de la combinación de las siguientes contribuciones:[1]

- Rayo de visión directa (propagación en espacio libre).
- Rayo reflejado en la superficie terrestre.
- Rayo difractado por las irregularidades del terreno, o por la propia curvatura de la Tierra.

En una situación en la que asumimos que la orografía del suelo es regular (como por ejemplo un mar en calma), que hay visión directa entre el transmisor y el receptor de un sistema de comunicación,

y que la distancia entre los mismos es del orden de unas decenas de kilómetros, entonces la Tierra se puede modelar como una superficie plana y despreciar la contribución por rayo difractado.

Asumiendo una tierra plana, los coeficientes de reflexión dependen del tipo de suelo, del ángulo de incidencia y de la polarización de la onda. Cuando la distancia entre las antenas es muy grande comparada con la altura de las mismas (situación habitual) el ángulo de incidencia ψ tiende a 0º. [1]
En ese caso los coeficientes de reflexión para ambas polarizaciones tienden a –1, que es el valor usual en tierra plana. **Entonces la señal que llega al receptor es la suma del rayo directo (E_d) y del rayo reflejado(E_r)**. Como la distancia entre antenas d es muy grande comparada con las alturas h_T y h_R, ψ tiende a 0 y la variación entre los caminos recorridos R1 y R2 por ambos rayos va a ser muy pequeña. Por ello, la atenuación de ambos caminos va a ser prácticamente la misma, existiendo únicamente una variación en la fase entre las señales que llegan al receptor.

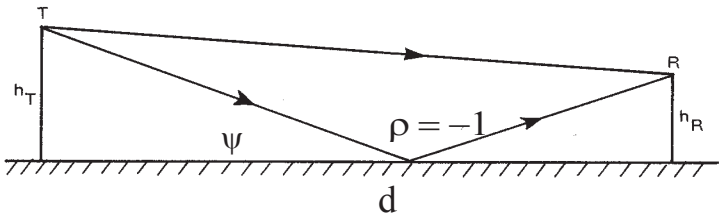


Figura 1: Trayectorias recorridas por Rayo directo y rayo reflejado. Cuando se cumple que d es muy grande comparada con las alturas hT y hR entonces ψ→0

Además en este caso, las antenas tienen prácticamente la misma ganancia para ambos rayos. Según la fase con la que se sumen ambas señales (asumiendo un coeficiente de reflexión igual a –1) tendremos una ganancia de 6 dB (suma en fase) con respecto a la propagación del rayo directo, o un nulo de campo (suma en oposición de fase). Para un coeficiente de reflexión cualquiera tendremos la siguiente expresión del campo en el receptor (E_{rx}), donde se ha considerado que la atenuación por caminos es la misma para ambos rayos, y las variaciones se encuentran en el coeficiente de reflexión ρ y en la fase debida a la diferencia de caminos ΔΦ [1]. Esta fase depende de la diferencia de caminos ΔR=R2-R1, y de la longitud de onda λ

$$E_{rx} = E_d + E_r = E_d\,(1+ \rho\cdot\exp(-j\Delta\Phi)) \qquad \text{En donde } \Delta\Phi = 2\pi\Delta R/\lambda \qquad (1)$$

Asumiendo un coeficiente de reflexión en el suelo igual a ρ=–1, la expresión (1) se puede simplificar. El módulo del campo recibido es entonces $E_{rx=}\,|E|$

$$|E| = 2|E_d|sen\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) = 2|E_d|sen\left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}\right) \qquad (2)$$

dónde se ha aplicado $\Delta\Phi = 2\pi\Delta R/\lambda$ y $\Delta R = 2h_T h_R/d$ que es cierto cuando la distancia entre las antenas es mucho mayor que la altura de las mismas.
Conocido el campo eléctrico en recepción, la potencia en recepción es fácilmente calculable a través de las fórmulas de Friis.
A continuación se adjunta una gráfica en la que se comparan para un mismo sistema de comunicaciones las pérdidas de propagación (en potencia) en espacio libre, con las pérdidas

propagación (en potencia) asumiendo el modelo de onda reflejada y utilizando la ecuación expresada en (2). En la parte izquierda de la gráfica se observan varios puntos de suma en fase y varios puntos de suma en oposición de fase. Los puntos de suma en fase están siempre 6 dB por encima de la curva del espacio libre. **El punto C** es el punto en donde se cortan la curva del espacio libre con la de onda reflejada. A partir del punto C la curva del modelo de onda reflejada siempre estará por debajo de la curva del espacio libre. **Los puntos M y m** son los últimos puntos de la curva de onda reflejada en donde se producen las sumas de fase y en oposición de fase respectivamente.

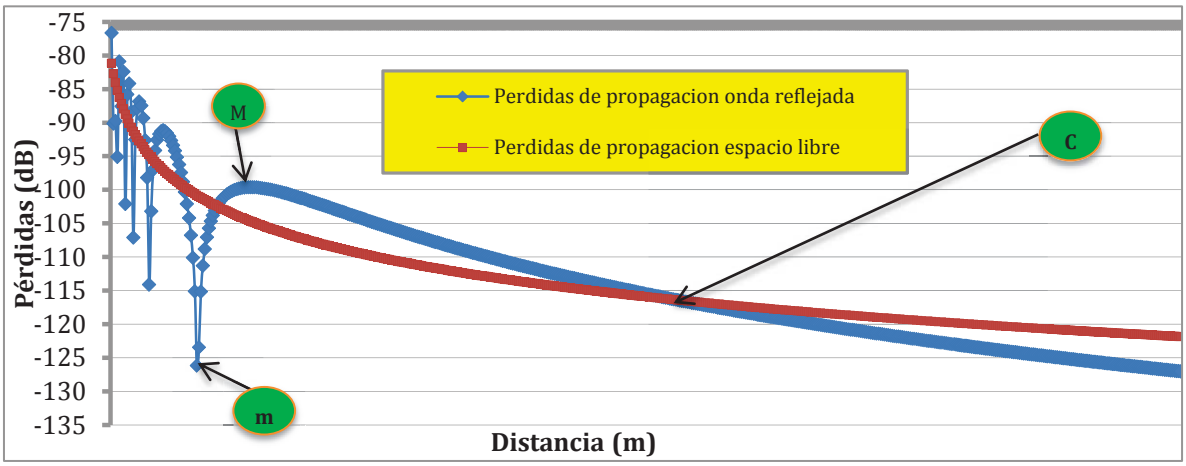


Figura 2: Curvas de propagación en espacio libre y onda reflejada. La curva roja representa las pérdidas de propagación de una onda en el espacio libre. La curva azul representa las pérdidas de propagación de esa misma onda asumiendo el modelo de propagación de onda reflejada.

Viendo esta gráfica se observa que **la distancia ideal entre un transmisor y un receptor bajo estas condiciones de propagación es entre el punto M y el punto C**, ya que en ese margen se está alejado de las fluctuaciones y además se está en una zona en la que se recibe más potencia que por propagación en espacio libre.

Es interesante destacar el hecho de que cuando el argumento del seno se hace muy pequeño (tiende a 0), ya sea porque h_T o h_R son muy pequeños o el producto λd es muy grande, el seno se hace igual a su argumento y se observa que el módulo del campo recibido varía de forma inversa al cuadrado de la distancia. Esto significa que la potencia variará de forma inversamente proporcional a la distancia elevada a cuatro, en lugar de la distancia al cuadrado tal como lo hace el rayo directo (espacio libre). En la Figura 2 este comportamiento se da en la parte derecha de la gráfica, es decir, a partir del punto C, que es cuando la distancia entre transmisor y receptor empieza a hacerse muy grande.

3. Medidas experimentales de curvas de propagación

A continuación se van a presentar los resultados obtenidos al realizar un experimento consistente en obtener la curva de propagación característica del radar comercial SPERRY en la banda X instalado a bordo del Patrullero "Serviola" de la Armada Española. El experimento fue realizado por el CEMEDEM el día 4 de Febrero, estando el Serviola navegando en aguas de la ría de Pontevedra. El CEMEDEM pidió al Serviola que realizase trayectorias de alejamiento y acercamiento hacia la Escuela Naval Militar, transmitiendo constantemente con su radar de Navegación. El CEMEDEM iba

midiendo y anotando para cada distancia, la potencia recibida. Este experimento se realizó para dos alturas distintas de antena receptora (h_R). Una situada a 17,5 metros del nivel del mar (en el piso alto del CEMEDEM), y la otra a 7 metros del nivel del mar (en la explanada del CEMEDEM). La altura de la antena transmisora (h_T) del buque es en todo momento constante y es de 19 metros medida sobre el nivel del mar. Este dato fue proporcionado por la dotación del Serviola.

A continuación se muestra una tabla resumen con los valores más significativos de los parámetros en ambos experimentos.

Parámetros	**Experimento 1**	**Experimento 2**
Altura Tx (h_T)	19 m	19 m
Altura Rx (h_R)	7	17,5
Frecuencia Radar Navegación	Banda X	Banda X
Distancia trayectoria alejamiento-acercamiento	1-5 mn *	1-5 mn *
Estado de la mar	Mar en calma	Mar en calma
Visión entre CEMEDEM-buque	Directa	Directa

* 1mn=1 Milla naútica =1852 metros.

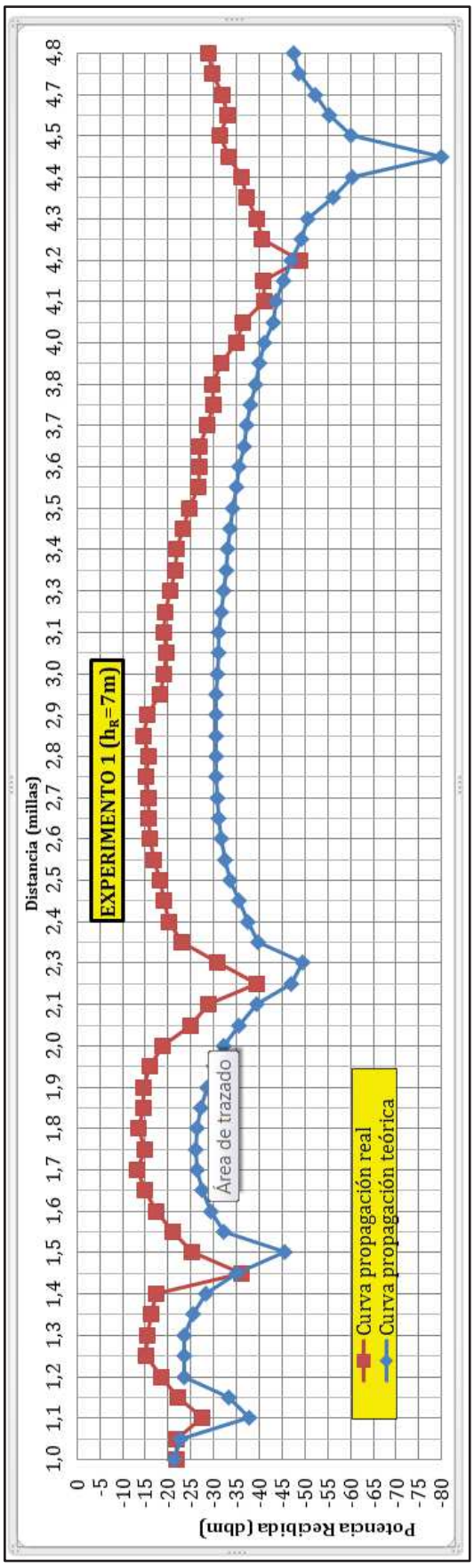
Debido a que las distancias entre el Emisor y el transmisor son muy grandes en comparación con las alturas de las antenas (1mn=1852m >> 7m y 17,5m), pero que a su vez esta distancia es suficientemente pequeña para poder asumir la tierra como una superficie plana; y a que la mar está en calma en ambos experimentos, se puede modelar entonces el agua de mar como una superficie plana, sin rugosidades cuyo coeficiente de reflexión (ρ) tiende a -1.

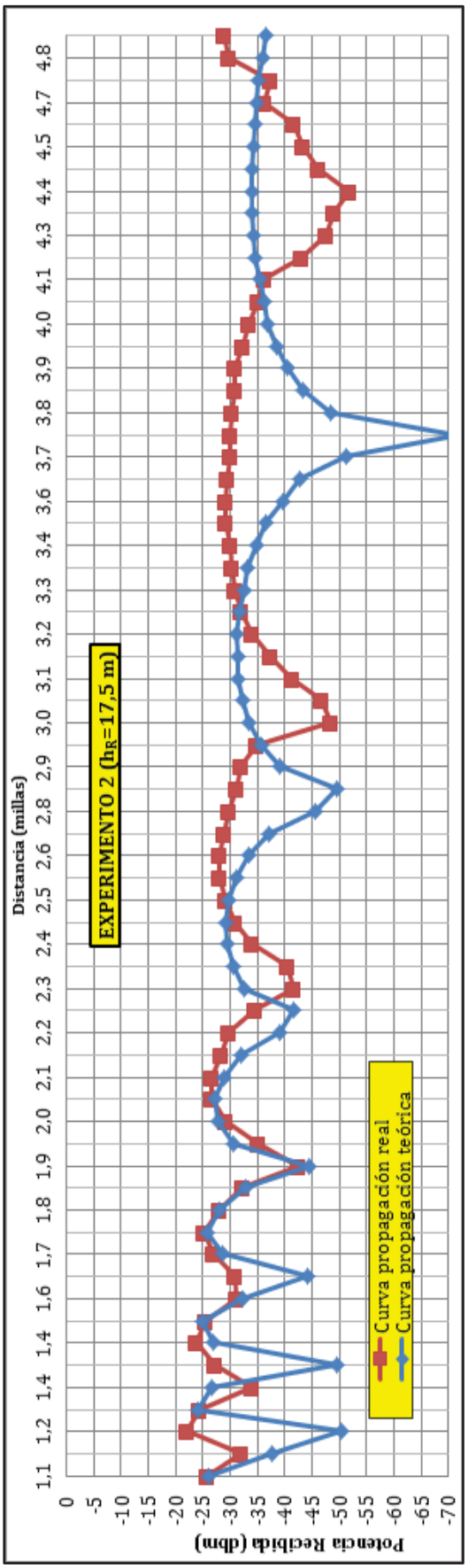
Vemos entonces que en ambos experimentos se cumplen las simplificaciones propias del modelo de onda reflejada. Así pues, se puede considerar que la atenuación de ambos caminos va a ser prácticamente la misma, existiendo únicamente una variación en la fase entre las señales que llegan al receptor. Es por ello que tal y como hemos visto el apartado anterior podemos utilizar las ecuaciones propias del fenómeno de contribución por onda reflejada y comparar así los resultados obtenidos a nivel experimental con los calculados teóricamente con las ecuaciones del modelo para comprobar la validez del modelo.

Los niveles absolutos de potencia no son relevantes en este caso, ya que lo que se busca es validar el modelo de propagación comparando los resultados teóricos con los obtenidos experimentalmente. En concreto se busca comprobar si las distancias obtenidas en las que se producen los máximos relativos en la gráfica (suma en fase) y mínimos relativos (suma en oposición de fase) se corresponden con las calculadas teóricamente.

En cada una de las dos gráficas que se muestran en el siguiente apartado se recoge la curva de propagación medida experimentalmente y la esperada teóricamente aplicando las ecuaciones del modelo de contribución por onda reflejada.

4. Resultados y Discusión





Viendo ambas gráficas se observan las siguientes cuestiones:

- La correspondencia entre la curva de propagación real y la teórico es muy buena cuando h_R=7m, ya que tanto los máximos (suma en fase) y mínimos (suma en oposición de fase) medidos están prácticamente a la misma distancia que los esperados teóricamente. La máxima desviación entre los datos medidos y los teóricos una es del 5 % y se produce en el último mínimo relativo (Se esperaba en 4,45 millas y se obtuvo a 4,2 millas).

- La correspondencia entre la curva de propagación real y la teórico, cuando h_R =17,5 m empieza siendo buena hasta las 2,2 millas pero posteriormente empeora mucho llegando incluso a existir una desviación del 18% en el último mínimo relativo (Se esperaba en 3,7 millas y se obtuvo a 4,4 millas).

- En el experimento en la que h_R =7m se alcanzan los últimos máximos y mínimos a distancias más cortas que las distancias a las que dichos máximos y mínimos se alcanzan para h_R=17,5 m

De estas observaciones se deducen los siguientes hechos:

- Si no se varían las condiciones de propagación, el modelo de propagación de onda reflejada se asemeja mejor a la realidad, cuanto más baja es la altura del receptor .

- Si no se varían las condiciones de propagación, y para una altura de emisor y de receptor fijas, se observa que el modelo de propagación se asemeja más a la realidad cuanto menor es la distancia entre emisor y receptor. Según aumenta ésta distancia, el modelo va perdiendo validez.

- Si no se varían las condiciones de propagación, el punto M y por lo tanto el punto C (Ver figura 2) se consiguen a menores distancias cuanto más baja es la altura del receptor.

A la luz de estas deducciones y del análisis de las ecuaciones del modelo de onda reflejada, se extraen una serie de conclusiones que se exponen en el siguiente apartado.

5. Conclusiones

1. El modelo de propagación de onda reflejada presenta mayor validez al minimizar la altura del receptor y reducir la distancia entre emisor y receptor.
2. En el modelo de propagación de onda reflejada la potencia recibida aumenta a medida que aumenta la altura de las antenas.
3. La distancia óptima entre emisor y receptor (explicada al final del apartado 2) se hace más pequeña a medida que se reduce la altura de la antena receptora.

Asumiendo estas conclusiones, en un sistema de comunicación, cuyas condiciones de propagación son las del modelo de onda reflejada, será necesario reducir o aumentar la altura de la antena receptora en función de la finalidad de dicho sistema de comunicación.

Para el caso de medida de diagramas de cobertura, en donde la potencia recibida no es un parámetro muy importante pues son medidas de potencia relativas y no absolutas, y en donde es crítico no estar en zonas de fluctuaciones de la curva, lo ideal sería reducir en la medida de lo posible la altura de la antena receptora (Nunca en exceso, y buscando siempre el compromiso entre distancia óptima y potencia recibida, ya que como ya hemos visto, a menor altura de antena receptora menor es la potencia recibida). También, al disminuir la altura de la antena receptora hacemos la distancia óptima de medida más cercana, lo cual es positivo para este tipo de medidas.

Para el caso de aplicaciones en donde la recepción de potencia sea crítica (como las antenas de telefonía móvil), lo ideal es elevar las antenas todo lo que se pueda, ya que así se reducen las pérdidas de propagación y por lo tanto se maximiza la potencia recibida. Además, elevar las antenas aumenta la visibilidad y el área de cobertura de las mismas.

Agradecimientos

Este trabajo nunca se habría podido desarrollar sin los medios proporcionados por parte de la Armada Española, especial agradecimiento a la dotación del Centro de Estudios y Medidas Electromagnéticas (CEMEDEM) ubicado en la Escuela Naval militar, a su Jefatura, y a su dotación la cual realizó con gran eficacia el proceso de medida. También se agradece la colaboración y la gran disposición prestada por el Patrullero “Serviola” en la realización de las medidas.

Referencias

1. Sierra Castañer, M.; Besada, J.L.; de Haro Ariet, L. Propagación por onda de espacio. In *Radiación y propagación*; Fundación Rogelio Segovia para el Desarrollo de las Telecomunicaciones: Madrid, Spain, 2004.

Sistema avanzado de fusión de información procedente tanto de sensores físicos como de redes sociales en internet

Santos de la Cámara, Raul[1]; Del Peso Quiroga, Jesús[1]; Rábade Roca, José M[2]; Luengo López, Inmaculada[1]; Fuentes Moro, Diego[1]; Jimeno Sánchez-Patón, Paloma[1]; Muelas Cano, Elena[1]; Uría Vidal, Federico[2].

[1] HI Iberia Ingeniería y proyectos, S.L., Emails: {rsantos, jdelpeso, iluengo, dfuentes, pjimeno, emuelas}@hi-iberia.es (RSC, JDPQ, IL, DF, PJSP, EM)

[2] División de Relaciones Internacionales, Área de Gobierno de Seguridad y Emergencias, Policía Municipal de Madrid, Emails: dri.pm@madrid.es (FUV, JMRR)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: rsantos@hi-iberia.es (RSC);

Abstract:

Este artículo presenta el sistema de fusión de información que aúna la información procedente de sensores y dispositivos físicos con información capturada en internet y redes sociales con el fin de ser capaz de prevenir y detectar posibles amenazas mediante la capacidad para entender el mundo físico y aprender de las interacciones que se producen en él. Con este fin, se presenta la arquitectura general del sistema propuesto así como la arquitectura particular de sus dos módulos principales: el módulo de análisis semántico, encargado de procesar la información capturada de las redes sociales, y el módulo de fusión de información, centrado en generar conocimiento avanzado de la situación a partir de la información obtenida tanto de sensores físicos como de redes sociales e internet. Estos dos módulos utilizados para la captura de información relevante son fruto del trabajo realizado en el contexto de dos proyectos europeos SAMi2 (HOME/2012/ISEC/AG) y ARGOS (FP7-GA 13217). Finalmente, y con el objetivo de dotar al sistema de una aproximación más realista, se presentarán una serie de resultados y conclusiones parciales consecuencia del trabajo realizado en los proyectos europeos, SAMi2 y ARGOS.

Keywords: redes sociales, fusión de información, infraestructuras críticas, monitorización, semántica, seguridad, procesamiento del lenguaje natural

---

1. Introducción

Dentro del compromiso estratégico de la Unión Europea para la creación de una Europa más segura que permita a los ciudadanos vivir en un espacio de libertad, seguridad y justicia se enmarca la prevención y protección de infraestructuras críticas, transporte y fronteras. En consecuencia, los Estados miembros se hallan en la obligación de determinar nuevas prácticas e ideas que permitan hacer frente a la multitud de desafíos que actualmente afectan a la seguridad. En este sentido, por ejemplo la Estrategia de Seguridad Nacional (ESN) española de 2013 identifica los siguientes riesgos: el terrorismo, los conflictos armados, el crimen organizado, la inseguridad económica y financiera, las ciberamenazas, los flujos migratorios no controlados, las armas de destrucción masiva, la vulnerabilidad energética y de los servicios e infraestructuras críticas o las emergencias y catástrofes naturales.

Son numerosos los proyectos europeos en los que, basándose en elementos físicos como videocámaras y sensores, se intenta garantizar el mantenimiento de la seguridad en estas infraestructuras y objetivos clave. Algunos son: ADABTS [1] para la detección de comportamientos anormales en lugares públicos a través de sensores de audio, vídeo e información del contexto, y ARGOS [2] [3], que se basa en la utilización de sensores físicos para la predicción de amenazas en Infraestructuras Críticas, y, del cual se han utilizado parte de sus resultados para el sistema propuesto en el presente artículo.

Un ejemplo de utilización de estos sistemas basados en sensores y otros dispositivos físicos fue la detección de drones sobrevolando varias estaciones de energía nuclear en Francia en noviembre de 2014 [4]. Aunque supuestamente esta actividad no se debía a acciones criminales sino a acciones de protesta de activistas en contra de energía nuclear, su origen e intención es todavía difusa. Un sistema que además de proporcionar la información cruda de estos sensores y dispositivos físicos fuese capaz de analizar información de redes sociales e Internet, posiblemente podría haber determinado con mayor grado de certeza el origen de estas actividades indicando si, únicamente se trataba de acciones llevadas a cabo por activistas en contra de la energía nuclear o si, por el contrario, tenía una connotación más seria.

De este modo, se pone de manifiesto la necesidad de monitorizar redes sociales e internet de cara a obtener una mayor certeza para la prevención y protección de acciones que podrían comprometer la seguridad pública. En la actualidad, han surgido muchos proyectos que llevan a cabo un rastreo de la red con distintos objetivos: BigDataScore [5] determina, basándose en la información de internet y redes sociales, si es viable conceder un crédito a una persona, y SAMi2 [6] [7], que intenta prevenir y detectar contenido o actividades ilegales haciendo uso de la información disponible en las redes sociales. Gran parte de los resultados obtenidos en este último proyecto se incluirán en el sistema propuesto.

Considerando las ventajas de aunar información procedente de sensores y dispositivos físicos con información capturada en internet y redes sociales, se presenta un sistema capaz de fusionar ambos tipos de información con el objetivo de prevenir y detectar posibles amenazas mediante la capacidad para entender el mundo físico y aprender de las interacciones que se producen en él.

Así, en este artículo se detallará tanto la arquitectura general del sistema como la arquitectura particular de sus dos módulos principales: el módulo de análisis semántico, encargado de procesar la información capturada de las redes sociales, y el módulo de fusión de información, centrado en generar conocimiento avanzado de la situación a partir de la información obtenida tanto de sensores físicos como de redes sociales e internet. Finalmente, y con el objetivo de dotar al sistema de una aproximación más

realista, se presentarán una serie de resultados y conclusiones parciales consecuencia del trabajo realizado en los proyectos europeos, SAMi2 y ARGOS.

2. Arquitectura general del sistema de fusión de información

En esta sección se presenta la arquitectura general del sistema de fusión de información que proporciona un conocimiento más preciso a los cuerpos de seguridad en situaciones donde la seguridad queda comprometida o se pretende poner en marcha acciones preventivas.

Este sistema surge tras la integración del trabajo realizado en los proyectos SAMi2 y ARGOS. Así en la siguiente figura se muestra el sistema completo donde los módulos en color azul son los desarrollados en SAMi2; los módulos en color verde en ARGOS, y los comunes a ambos proyectos en azul y verde. Por su parte, el color gris denota las fuentes externas al sistema y el naranja representa el sistema de visualización para la interacción con el usuario:

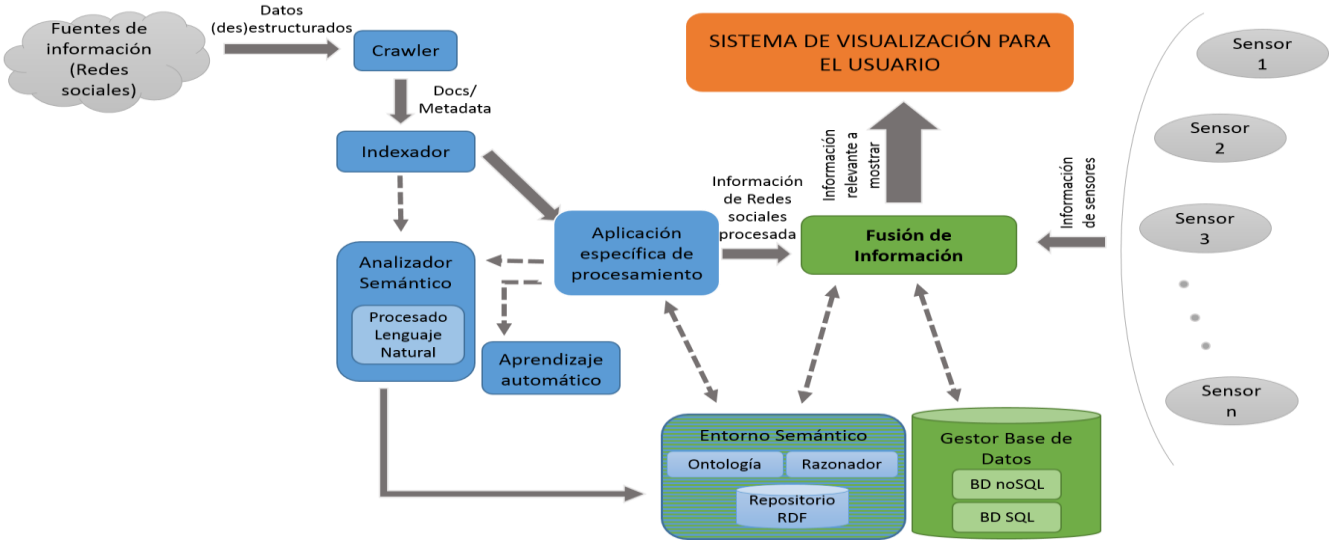


Figura 1. Arquitectura general del sistema

Como se puede observar en la figura, el sistema cuenta con dos fuentes de información. Por un lado, la información procedente de redes sociales, que es procesada por los módulos desarrollados en SAMi2 y que posteriormente es inyectada al módulo de fusión de información para posibilitar la detección de acciones ilegales organizadas a través de ellas, y, por otro lado, la información procedente de los sensores físicos, que es inyectada directamente al módulo de fusión de datos. Dicha información es procesada y fusionada por el módulo de fusión de información dando lugar a una información de alto nivel que será útil para los cuerpos de seguridad.

3. Arquitectura específica de los módulos

El sistema de fusión de información surge a partir del trabajo realizado en los proyectos europeos SAMi2 y ARGOS. A continuación se describe el módulo de monitorización de redes sociales (implementado en SAMi2), así como el módulo de fusión de información (implementado en ARGOS) en el contexto de dichos proyectos.

3.1. Arquitectura del módulo de monitorización de redes sociales

Este módulo proporcionará una solución técnica genérica para la monitorización de redes sociales y la extracción de información relevante de ellas haciendo uso del actual estado del arte de tecnologías de procesamiento del lenguaje natural (PLN).

Los elementos principales de esta rama de la arquitectura se encargarán del procesamiento de la información obtenida de las redes sociales así como del aprendizaje automático para que, a través de refuerzo humano, se pueda refinar el funcionamiento del sistema. La siguiente figura muestra el conjunto de módulos encargados del análisis de información disponible en la red y sus relaciones:

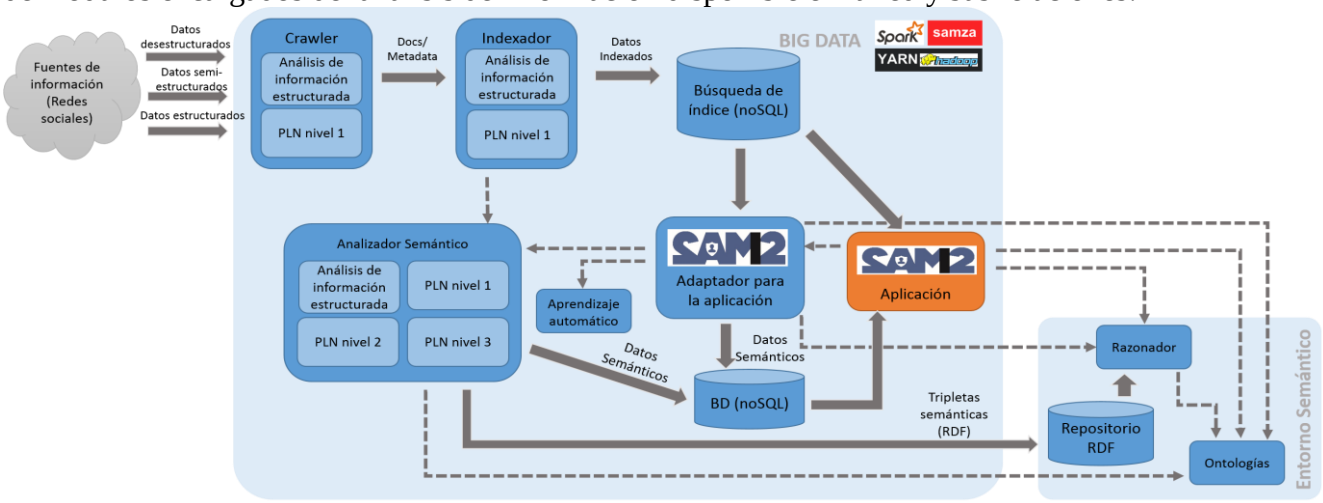


Figura 2. Arquitectura de la monitorización de redes sociales

Entrando en más detalle, la arquitectura de la figura anterior estará compuesta por:

- *Crawler*. Es un módulo encargado de recoger la información que ha de ser procesada por el sistema. Realiza un procesamiento de primer nivel de estos documentos, filtrando cualquier elemento que no sea necesario con el fin de incrementar la eficiencia.
- *Indexador*. Es el responsable de la construcción de un índice con los contenidos de los documentos analizados de forma que el sistema pueda buscarlos y recuperarlos fácilmente.

En cuanto al conjunto de módulos semánticos para procesamiento de la información, se requiere:

- *Analizador semántico*. Este módulo es responsable del PLN, incluyendo análisis sintáctico y pragmático, a fin de identificar los principales conceptos así como personas, lugares o información temporal relevante.
- *Entorno semántico*. Este módulo proporciona servicios de razonamiento semántico para otros elementos de la arquitectura (especialmente para el analizador semántico y los módulos específicos a nivel de aplicación) partiendo de una serie de modelos ontológicos.
- *Adaptador para la aplicación*. Este módulo se encarga de las tareas de procesamiento a alto nivel para cada dominio de aplicación. Se encarga de decidir qué documentos necesitan ser enviados a los usuarios finales como resultado y de ajustar el sistema al comportamiento esperado por el usuario, mediante el uso de aprendizaje automático.
- *Módulo de aprendizaje automático*. Proporciona capacidades de aprendizaje a otros módulos. Este módulo está basado en el uso de redes neuronales y SVMs (máquinas de soporte vectorial).
- *Aplicación*. Este módulo involucra todas las interfaces y componentes de interacción humana como, p.ej. la capacidad para entrenar el sistema y evaluar resultados.

Dado que el sistema y los pasos de procesado de datos descritos para este proyecto requieren una carga computacional muy alta (especialmente el procesado de la información semántica y los procedimientos de aprendizaje) es conveniente utilizar un entorno de procesamiento en paralelo como base para el sistema.

3.2. Arquitectura del módulo de fusión de información

El módulo de fusión de información trata de analizar la gran cantidad de información heterogénea que generan tanto los diferentes sensores físicos como las redes sociales, y así, extraer su significado con el fin de inferir información de más alto nivel fácilmente entendible por el usuario, permitiendo tomar decisiones más precisas y minimizar el número de falsas alarmas.

En el contexto del proyecto ARGOS, dicho módulo (en color verde) únicamente analiza la información heterogénea que generan los diferentes sensores y produce información de alto nivel entendible por el resto de subsistemas. En la siguiente figura, se puede observar junto con el resto de subsistemas (en color gris) que componen el primer prototipo del sistema ARGOS.

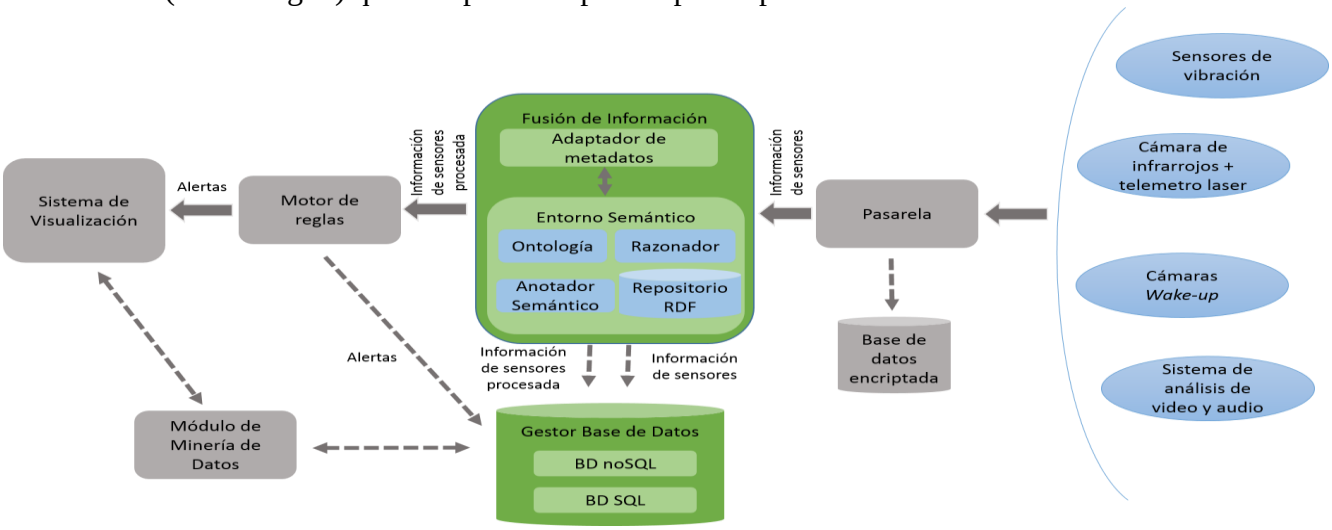


Figura 3. Arquitectura del módulo de fusión de información en el contexto del proyecto ARGOS

De derecha a izquierda se observa en la figura una red de sensores heterogéneos con sensores de vibración, cámara de infrarrojos y telémetro láser, cámaras *wake-up* y un sistema de análisis de video y audio, que permite extender la "zona de seguridad" más allá del perímetro crítico con el fin de cubrir tanto amenazas aéreas como terrestres en cualquier infraestructura crítica. La red de sensores se conecta mediante una *Red de Acceso de Banda Ancha* a la *Pasarela*, que realiza un procesado local de la información para enviarla en forma de metadatos al *Módulo de Fusión de Información*.

En detalle, dicho *Módulo de Fusión de Información* trata de analizar la información que generan los sensores en cualquier escenario de aplicación del sistema ARGOS y producir nueva información fácilmente entendible por el resto de subsistemas. Para ello, se introduce un *Entorno Semántico* específico, el cual se detalla a continuación:

- *Ontología* o modelo de datos semántico, adaptada a los diferentes escenarios de ARGOS, la cual permite homogeneizar toda la información que entra al sistema y así, almacenarla de forma estructurada y al mismo nivel.
- *Anotador semántico*, asocia la información de entrada a etiquetas definidas en la ontología.
- *Repositorio RDF*, que almacena en ternas RDF las anotaciones realizadas.

- *Razonador*, extrae nueva información del dominio de conocimiento de ARGOS a partir de la ontología y de las ternas RDF infiriendo así automáticamente nueva información de alto nivel.

Además del conjunto de módulos semánticos, un *Adaptador de Metadatos*, en primera instancia, adapta la información procedente de los sensores al formato específico del *Entorno Semántico*, y en segunda instancia, proporciona al resto de subsistemas la información de alto nivel generada por el *Módulo de Fusión de Información*.

A continuación, el *Motor de Reglas* recibe dicha información y genera alertas en función de determinadas reglas (combinación de eventos y/o condiciones) definidas por el operador del sistema. Dichas alertas son enviadas al *Sistema de Visualización* con el fin de proporcionar al operador una temprana conciencia de la situación y posibilitar una rápida toma de decisiones.

Finalmente, a lo largo de todo el flujo de información, el *Gestor de Bases de Datos* almacena la información generada por todos los subsistemas; y en paralelo al flujo principal de información, el *Módulo para la Minería de Datos* trata de extraer conocimiento útil pero oculto en la información proporcionada por el sistema con el fin de ayudar al operador en la toma de decisiones.

4. Resultados

4.1. Resultados de SAMi2

El escenario evaluado en las pruebas del primer prototipo de SAMi2 consiste en la detección de eventos masivos organizados de manera ilegal a través de redes sociales. En esta evaluación se pretende detectar tanto detalles sobre la organización del evento (fecha, hora, localización), como conversaciones relacionadas con el mismo o el nivel de afluencia de público. Como indicadores de evaluación se ha utilizado la proporción entre falsos positivos y falsos negativos. En SAMi2 se consideran falsos positivos[1] aquellos resultados clasificados como válidos pero que resultan ser una falsa alarma; los falsos negativos[2] son los que se clasifican como negativos pero que contienen información relevante. En la siguiente tabla se detallan estadísticas en la clasificación de mensajes sobre fiestas ilegales:

	Falsos positivos	Falsos negativos	Tasa de error total	Comentarios
Modelo entrenado sin utilizar semántica	16.00 %	56.96 %	44.39 %	El modelo está entrado utilizando sólo un conjunto de palabras clave relevantes, esto es, aquellas que tienen mayor nivel TF-IDF (frecuencia de término – frecuencia inversa de documento) en ejemplos positivos de entrenamiento.
Modelo entrenado usando semántica	7.07 %	9.04 %	7.72 %	Además de conjunto de palabras clave utilizados en el modelo anterior, se ha hecho uso de las siguientes funcionalidades semánticas: - Información temporal: el mensaje hace referencia al pasado, presente o futuro. - Conceptos incluidos que tengan relación con la planes y movimientos - Lugares mencionados explícitamente en los mensajes

Tabla 1. Resultados del primer prototipo de SAMi2

Analizando los resultados obtenidos durante la evaluación del primer prototipo se puede ver que hay una mejora significativa en el procesado de mensajes utilizando semántica. En este caso de prueba se

[1] $\%\text{Falsos positivos} = \frac{Número\ de\ resultados\ clasificados\ como\ positivos\ de\ manera\ incorrecta}{Número\ total\ de\ resultados\ clasificados\ como\ positivos} \times 100$

[2] $\%\text{Falsos negativos} = \frac{Número\ de\ resultados\ clasificados\ como\ negarivos\ de\ manera\ incorrecta}{Número\ total\ de\ resultados\ clasificados\ como\ negativos} \times 100$

han procesado un total de 7.260.865 mensajes de los cuales en el primer nivel de filtrado se han devuelto un total de 1.937 mensajes para ser procesados semánticamente. El número final de mensajes identificados como válidos por el sistema SAMi2 tras el segundo nivel de filtrado, una vez finalizado el entrenamiento, es de 382 mensajes. Como clasificadores de estos mensajes se han utilizado redes neuronales y SVMs (máquinas de soporte vectorial). El entrenamiento del sistema se basó en la clasificación manual del 20% de los 1937 mensajes obtenidos en el primer filtrado. El aumento en la precisión de filtrado es especialmente relevante para la reducción de la proporción de falsos negativos. La mayor precisión además, acentúa el hecho de que algunas características semánticas que parecen genéricas ayuden a descubrir patrones de clasificación implícitos que de otro modo quedarían ocultos.

4.2. Resultados de ARGOS

El sistema ARGOS fue puesto a prueba en un escenario real el 26 de Junio de 2015 en Bucarest. Se consideró la protección perimetral de una infraestructura crítica extendida (gasoducto) y la de una confinada (estación de distribución de gas).El objetivo principal de esta primera prueba de concepto fue comprobar el rendimiento del sistema en un entorno operativo real, así como realizar una validación previa a la comercialización del sistema con los usuarios finales. De este modo, dos casos de uso fueron llevados a cabo para demostrar a los usuarios finales la viabilidad del sistema.

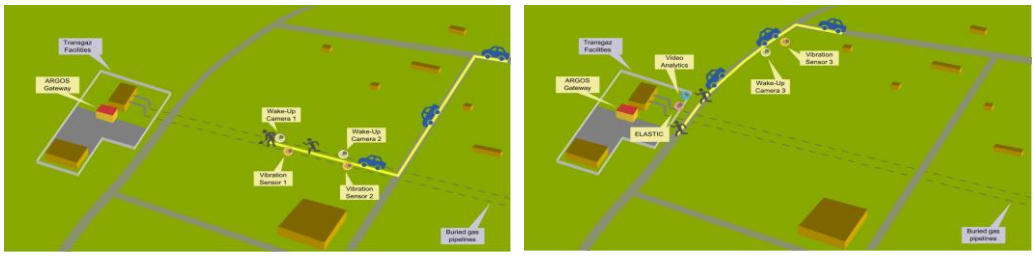


Figura 4. (a) Primer caso de uso: Posible ataque a un gasoducto a pie/en coche, (b) Segundo caso de uso: Posible ataque a la estación de distribución de gas

El primero de los casos de uso tuvo por objetivo demostrar que el sistema ARGOS es capaz de operar a largas distancias, lejos de las fuentes de energía, y proteger el gasoducto de forma eficiente detectando cualquier situación anómala y proporcionando el tiempo suficiente para prevenir el accidente. Por su parte, el segundo tuvo por objetivo demostrar que el sistema ARGOS es capaz de activar alarmas antes de que ocurra un ataque en una zona de alerta temprana definida más allá del perímetro físico de la estación de distribución, detectando la presencia sospechosa de vehículos e individuos.

En la ejecución de la prueba de concepto todos los subsistemas funcionaron a la perfección. El *Módulo de Fusión de Información* generó información de alto nivel a partir de la información de los sensores, siendo un ejemplo de esto la conclusión de que un vehículo se acercaba a la estación de gas a partir de las posiciones del coche proporcionadas por dos de los sensores. Tras la realización de un cuestionario, el 100% de los usuarios finales asistentes consideraba que el sistema incrementaría la seguridad en la infraestructura y el 91% que el sistema proporcionaría alertas anticipadas.

4. Conclusiones

El compromiso europeo para la creación de una Europa más segura, requiere la existencia de sistemas para la prevención y detección de amenazas que sean capaces de (a) detectar amenazas con suficiente

antelación y precisión y (b) operar a largas distancias, lejos de fuentes de energía. Las fuerzas y cuerpos de seguridad tienen en las redes sociales una herramienta con múltiples posibilidades, tanto a nivel estratégico como operativo [8]. En este sentido, es destacable su uso como herramienta de inteligencia, como herramienta de apoyo o colaboración policial en situaciones de emergencia o catástrofe - tsunami de Japón de 2011-, hasta su uso como futura técnicas de carácter predictivo (preventivo) del delito [9].

El primer desafío se ha resuelto mediante el desarrollo de un módulo de fusión de información que aplica técnicas de fusión y minería de datos a la información procedente tanto de sensores y dispositivos físicos como de redes sociales. Esta información junto con un motor de reglas gestionado por el operador, proporciona capacidad para prevenir amenazas con antelación y de un modo realista y preciso. El segundo desafío resuelve mediante la utilización de una red de sensores y dispositivos físicos que transfieren toda la información en forma de metadatos; y el desarrollo de algoritmos energéticamente eficientes para el procesado de la información.

Agradecimientos

Este artículo ha contado con el apoyo en parte del 7º Programa Marco de la UE (FP7) bajo los términos del Grant Agreement número 313217 (ARGOS) y por el Directorado General Europeo para Asuntos Internos en el marco del Programa para la Prevención de/y Lucha contra el Crimen en 2012 de DG-HOME (HOME/2012/ISEC/AG) (SAMi2). Los autores agradecen a los consorcios de ARGOS y SAMi2 su colaboración a lo largo del desarrollo de ambos proyectos.

Referencias

1. [Online] Web oficial del proyecto ADABTS: www.adabts-fp7.eu
2. [Online] Web oficial del proyecto ARGOS: http://www.argos-project.eu/
3. Luengo López, I.; Santos de la Cámara, R.; Fuentes Moro, D. ARGOS: Protección avanzada de infraestructuras críticas mediante un sistema global preventivo. *II Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad.* Zaragoza, España, 2014
4. Lichfield, J. French government on high alert after unexplained drone flights over nuclear power stations. *The Independent*, 2014.
5. [Online] Proyecto europeo BigDataScore: http://cordis.europa.eu/project/rcn/196189_en.html
6. [Online] Web oficial del proyecto SAMi2: **http://sami2-project.eu/**
7. Del Peso J.; Santos R.; Jimeno P. SAMi2; a Semantic and Big Data Lever to Enhance Public Safety Using Social Media. *ECSM 2015*. Oporto, Portugal, 2015.
8. Ignacio Criado y Francisco Rojas Martín (eds.) "Casos de éxito en redes sociales digitales de las administraciones públicas 2015. Redes sociales y seguridad ciudadana." Eva Moya Losada y José María Blanco Navarro (pp. 130-154) http://eapc.gencat.cat/web/.content/home/publicacions/col_leccio_obres_digitals/20_casos_exito_redes_sociales/Casos-de-exito-en-RSD-de-las-AA-PP.pdf
9. Predictive POLICING The Role of Crime Forecasting in Law Enforcement Operations. By: Walter L. Perry, Brian McInnis, Carter C. Price, Susan C. Smith, John S. Hollywood . http://www.rand.org/pubs/research_reports/RR233.html

Prueba de concepto de software espía para el acceso a interacciones vía teclado en dispositivos móviles

Juncal Martínez, Jonathan [1]*, Costa Montenegro, Enrique [1], Sotelo Seguín, Gonzalo [2], Torres Meira, José [2], Barragáns Martínez, A. Belén [3] y Burguillo Rial, Juan Carlos[1]

[1] Departamento de Ingeniería Telemática, Escuela de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad de Vigo. Campus Universitario Lagoas-Marcosende. 36310 Vigo, Pontevedra; Emails: jonijm@gti.uvigo.es (JJM), kike@gti.uvigo.es (ECM), jrial@det.uvigo.es (JCBR)

[2] Equipo de Investigación Tecnológica, Comandancia de la Guardia Civil, Pontevedra

[3] Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar. Plaza de España, 2. 36920 Marín, Pontevedra; Email: belen@cud.uvigo.es (ABBM)

* Autor responsable del trabajo: jonijm@gti.uvigo.es

Abstract: El auge de Internet, los ordenadores, los dispositivos móviles, etc., hace que sean empleados a diario, pero no únicamente para fines laborales o de ocio, sino también para la comisión de delitos. En España, era considerado un delito acceder a la información contenida en dichos dispositivos sin autorización judicial, a través de la instalación de software espía, dado que atentaba contra los derechos fundamentales. Sin embargo, la recientemente aprobación de una modificación en la Ley de Enjuiciamiento Criminal permite la instalación de este tipo de software. Se considera necesario poder investigar dichos dispositivos, con unos límites establecidos y según la categoría del delito. En este artículo se propone una prueba de concepto para capturar interacciones a través del teclado en tiempo casi real en dispositivos móviles y enviarlas a un servidor externo, permitiendo a los investigadores acceder a ellas vía web. Este sistema sería transparente al infractor y permitiría obtener información muy valiosa para la resolución de múltiples casos.

Keywords: nuevas tecnologías, dispositivos móviles, investigación criminal, derechos fundamentales, legislación, software espía

---

1. Introducción

Últimamente, las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), tanto a nivel social como cultural y económico, han ido en aumento, creando vínculos digitales [1] en la vida de las personas.

Esa transformación supone la presencia de Internet en la vida cotidiana, a causa del empleo de gran cantidad de dispositivos (ordenadores de sobremesa o portátiles, smartphones y tablets, videoconsolas, etc.) en múltiples ámbitos (con fines laborales, educativos, administrativos y legales, y de ocio) y, en la actualidad, la mayoría de la población posee alguno. Cada individuo genera una gran cantidad de información tanto de forma voluntaria como involuntaria. Cada vez que una persona hace una llamada telefónica o la recibe, compra algún producto a través de la red, accede a una red social, descarga un fichero, etc., se está generando mucha información. Realizando una búsqueda en Internet, se puede visualizar la multitud de datos existentes hoy en día acerca de cualquier tema, incluyendo información de individuos.

1.1. El acceso policial a la tecnología en el ámbito penal

Cuando se produce una investigación criminal, existen tres puntos a tener en cuenta: qué sucedió; quién o quiénes intervinieron en el delito; y dónde se produjo el mismo. La presencia de Internet en la vida cotidiana de las personas y la gran cantidad de dispositivos existentes, hace que las autoridades deseen acceder a toda la información generada. La misma puede dar lugar a la resolución de un delito. La importancia de poder emplear las tecnologías como medida de investigación recae en que son el pilar fundamental a la hora de realizar cualquier estudio criminal en la sociedad informatizada actual. Una de las principales ventajas del acceso a esa información sería la eficacia para obtener evidencias del delito, de cualquier tipología, resultando ser una fuente de pruebas muy valiosa [2]. La capacidad actual de almacenamiento de información y el empleo en comunicaciones hace que sea realmente importante.

El empleo de la tecnología en tareas de investigación por parte del ámbito policial no es algo novedoso, sino que ha ido evolucionando hasta la sociedad digital en la que nos encontramos. Su empleo ha ayudado a resolver los delitos de forma más rápida, eficaz y segura. Existen múltiples ejemplos, como son: el ciberpatrullaje y la búsqueda en Internet, el rastreo de imágenes y vídeos de carácter pedófilo, programas informáticos para lectura automática de matrículas, la videovigilancia mediante cámaras IP con activación remota, los equipos de reconocimiento biométrico, el empleo de pulseras electrónicas de localización permanente, el uso de la tecnología GPS para conocer la ubicación geográfica, etc.

1.2. Los teléfonos inteligentes o smartphones y el acceso policial

En este artículo nos centraremos en los teléfonos inteligentes o smartphones, ya que son el origen de nuestra prueba de concepto. Estos no son dispositivos únicamente diseñados para llamadas telefónicas o su recepción, sino que se permiten realizar múltiples actividades a través de ellos: la mensajería instantánea [3]; la reproducción de música y archivos multimedia, y la grabación de los mismos; la captura de imágenes a través de la cámara; la grabación de voz; la localización geográfica mediante el GPS; o la propia navegación por la red y el acceso a múltiples aplicaciones.

Un smartphone dispone de elementos físicos (hardware) y lógicos (software). Los elementos físicos son el microprocesador, la memoria RAM, el almacenamiento interno, los aceleradores de vídeo, la pantalla, etc.; entre los elementos lógicos se encuentran el sistema operativo y diferentes aplicaciones instaladas (juegos, mensajería instantánea, multimedia, etc.). El punto más importante en cuanto a

investigación criminal es la memoria física del smartphone, interna o externa [4]. Los archivos internos del sistema, los archivos de las aplicaciones y los archivos del propio individuo son los más relevantes.

Actualmente, las fuerzas de seguridad del estado tienen a su disposición el sistema SITEL. Dicho sistema permite la interceptación de comunicaciones, como escuchas telefónicas y acceso a los SMS/MMS, siempre bajo autorización judicial. El problema surge debido a que, con el auge de los smartphones, han aparecido nuevas formas de comunicación, principalmente las diferentes aplicaciones de mensajería instantánea. Dichas aplicaciones suelen enviar los datos a través de Internet de forma cifrada, incluso eliminan los datos a los pocos segundos de ser leídos, por lo cual las fuerzas de seguridad del estado no tienen acceso a ellos.

1.3. Legislación en cuanto a software espía en Enjuiciamiento Criminal

En España, la violación de los derechos fundamentales [5] de los ciudadanos está penada legalmente, por lo cual, hasta hace poco, no se permitía la instalación de software espía en diferentes dispositivos sin orden judicial. Sin embargo, en la iniciativa legislativa Proyecto de Ley Orgánica de modificación de la Ley de Enjuiciamiento Criminal para el fortalecimiento de las garantías procesales y la regulación de las medidas de investigación tecnológica (BOCG 20 de marzo de 2015), se ha propuesto una Modificación de la Ley de Enjuiciamiento Criminal de 14 de septiembre de 1882, aprobada el día 13 de marzo de 2015. Este modificación trata el punto llamado “Registros remotos sobre equipos informáticos” [6].

Se podrá instalar software espía a distancia y sin conocimiento del titular, así como otras acciones, a través de una orden judicial y en el seguimiento de delitos de grado medio/alto (cometidos por organizaciones criminales, terrorismo, contra la Constitución, etc.). Se debe especificar el dispositivo o dispositivos empleados, el alcance del registro, los agentes autorizados, la autorización para realizar y conservar copias de los datos, y otros detalles. Además, se podrá ampliar la búsqueda a nuevos dispositivos, los agentes podrán solicitar ayuda a los prestadores de servicios para el acceso a los datos (los cuáles deberán guardar en secreto) y los mismos quedarán sujetos a la responsabilidad regulada. La duración será de un mes, prorrogable a un máximo de tres.

La prueba de concepto propuesta en este artículo podría ser aplicada en la investigación criminal gracias a la aprobación de esta nueva ley. En la Sección 2 se detallará de forma técnica nuestra prueba de concepto, en la Sección 3 se explicará una prueba llevada a cabo así como la comparativa de nuestra prueba de concepto con otras herramientas, y en la Sección 4 se presentarán las conclusiones.

2. Materiales y métodos. Sección experimental

En esta sección se presentará nuestra prueba de concepto desde el punto de vista técnico. Está dividida en dos partes, arquitectura cliente y arquitectura servidor. Cabe destacar que la prueba de concepto realizada fue diseñada por el lado del cliente para el SO Android [7], empleando Java y SQLite; por el lado del servidor, se emplea el SO Ubuntu [8] y LAMP (Linux, Apache, MySQL y PHP [9]).

2.1. Arquitectura cliente

La propuesta de cliente es un *keylogger*, es decir, un teclado modificado internamente para capturar las interacciones del usuario cliente (infractor) con sus diferentes letras, números o símbolos, en cualquier aplicación de un dispositivo móvil, y almacenarlas en una base de datos SQLite interna. Ésta posee una tabla con cuatro campos: el campo "time", que almacenaría la fecha y hora en milisegundos; el campo "app", que almacenaría el nombre del paquete de la aplicación donde el usuario cliente interactuó; el campo "log", que almacenaría la propia interacción; y el campo "sent" para saber si el log ya fue enviado al servidor (valor 1) o no (valor 0).

El almacenamiento en la base de datos interna se produciría en dos casos diferentes: o cuando se produce un cambio de aplicación (el infractor se encontraba interactuando con el teclado en una aplicación concreta y, en determinado momento, accedió a otra aplicación diferente) o si transcurrió el periodo de tiempo de un minuto entre el anterior almacenamiento y el instante actual.

Al mismo tiempo, cuando el infractor enciende su dispositivo móvil, se ejecutará en segundo plano un servicio, sin su conocimiento, que comprueba cada minuto si el infractor realizó alguna interacción con el teclado. En caso afirmativo, comprobará si hay disponible una conexión a Internet, en cuyo caso enviará la información almacenada en la base de datos interna al servidor.

2.2. Arquitectura servidor

La propuesta de servidor es un servicio web dividido en dos partes: por un lado, la parte en la que se reciben los datos introducidos en la base de datos interna comentada en la arquitectura cliente, y son insertados en la base de datos externa que reside en el servidor; por otro lado, cuatro formas de visualización de esos datos a través de acceso web: la totalidad de los mismos, mediante filtrado por fecha, por identificador de dispositivo y mediante ambas al mismo tiempo. A ese servicio web se puede acceder desde cualquier navegador.

La base de datos externa está gestionada por MySQL. La misma posee una tabla con los mismos campos que en el caso de la base de datos interna comentada excepto el "sent", y añadiendo un nuevo campo: "device_id", que almacenaría el identificador del dispositivo desde el que se realizaron las interacciones.

Los filtrados por fecha, identificador de dispositivo o ambos a la vez se realizan mediante desplegables, de forma que resulta intuitivo para el usuario investigador a la hora de visualizar los datos.

3. Resultados y discusión

En esta sección, se comentarán los resultados obtenidos al realizar una pequeña interacción con nuestra prueba de concepto y el acceso a esos datos en el servidor. También se discutirán tecnologías existentes en el ámbito penal para el seguimiento y la obtención de datos, destacando sus características principales y comentando los puntos fuertes de nuestra prueba de concepto con respecto a ellas.

3.1. Datos obtenidos a través de nuestra prueba de concepto

Para evaluar el funcionamiento de nuestra prueba de concepto, se realizó la instalación del teclado modificado en un dispositivo móvil HTC Google Nexus One con versión de SO Android 2.3.6. Una vez realizada, se procedió a su elección como teclado por defecto (en vez del teclado que Google posee en todos sus dispositivos móviles con SO Android). Una vez instalado y configurado, el servicio de detección de interacciones ya estaría lanzado en segundo plano, algo totalmente transparente al usuario. El almacenamiento de esas interacciones cada minuto se fue realizando en la base de datos interna. Para que esas interacciones almacenadas se pudiesen enviar al servidor externo, debía existir conexión a Internet; de lo contrario, las interacciones no enviadas todavía no serían dirigidas al servidor externo hasta que no existiese la misma. En nuestro caso, se dispone de conexión a Internet de forma continua. En la Figura 1, se puede visualizar una captura de la interfaz del teclado modificado.

Figura 1. Interfaz del teclado modificado



Como servidor, se utilizó un SO Ubuntu 12.04 en una máquina virtual en VirtualBox, en el cuál se instaló LAMP para poder acceder vía web posteriormente a la visualización del contenido de la base de datos externa. Se crearon una serie de clases en PHP tanto para poder insertar las interacciones enviadas desde la base de datos interna en la base de datos externa, como para poder visualizar las interacciones. Esas clases fueron introducidas en la ruta "/var/www/keylogger/" del SO. Para crear la base de datos externa del servidor, se accedió a la herramientas phpMyAdmin contenida en LAMP, mediante la url "ip:puerto/phpmyadmin/".

Posteriormente, se procedió a realizar la prueba. Se interactuó con el teclado en dos aplicaciones diferentes, una de correo electrónico y otra de mensajería (SMS/MMS). Se fueron almacenando las diferentes interacciones en la base de datos interna, como se puede ver en la Figura 2. El campo "sent", antes de enviar determinada interacción al servidor externo, tiene el valor 0, que cambia a 1 una vez que fue enviada. Cada minuto, además de ser almacenadas en la base de datos interna, son enviadas al servidor externo, y se almacenaron con el identificador de dispositivo correspondiente en la base de datos externa, como se puede ver en la Figura 3.

Finalmente, vía web, se pudieron visualizar esos contenidos mediante la url "ip:puerto/keylogger/query.php", filtrado por fecha con la url "ip:puerto/keylogger/dquery.php", filtrado por identificador de dispositivo con la url "ip:puerto/keylogger/iquery.php", y finalmente,

Figura 2. Ejemplo de base de datos interna en dispositivo cliente

TABLE logs

_id	time	app	log	sent
7	1428601243978	com.google.android.gm	pepediaz@gmail.com	1
8	1428601298894	com.google.android.gm	quedamos en el parque	1
9	1428601347078	com.google.android.gm	a medianoche donde esta la fuente	1
10	1428601411134	com.google.android.gm	ven tu solo	1
11	1428601472386	com.google.android.gm	que nadie te siga, sino tendremos problemas	1
12	1428601532925	com.google.android.gm	trae el dinero acordado, adios.	1
14	1428601680566	com.android.mms	685123485627	1
15	1428601719856	com.android.mms	ya quede con el individuo en el parque a medianoche	1
16	1428601779624	com.android.mms	le dije que tuviese cuidado para que nadie lo siga	1
17	1428601837773	com.android.mms	nos vemos alli	1

Figura 3. Ejemplo de base de datos externa en servidor web

localhost » keylogger » logs

_id	device_id	time	app	log
233	8a0575e1a9c5b40f	1428601837773	com.android.mms	nos vemos alli.
232	8a0575e1a9c5b40f	1428601779624	com.android.mms	le dije que tuviese cuidado para que nadie lo siga
231	8a0575e1a9c5b40f	1428601719856	com.android.mms	ya quede con el individuo en el parque a medianoch...
230	8a0575e1a9c5b40f	1428601680566	com.android.mms	685123485627
228	8a0575e1a9c5b40f	1428601532925	com.google.android.gm	trae el dinero acordado, adios.
227	8a0575e1a9c5b40f	1428601472386	com.google.android.gm	que nadie te siga, sino tendremos problemas
226	8a0575e1a9c5b40f	1428601411134	com.google.android.gm	ven tu solo
225	8a0575e1a9c5b40f	1428601347078	com.google.android.gm	a medianoche donde esta la fuente
224	8a0575e1a9c5b40f	1428601298894	com.google.android.gm	quedamos en el parque
223	8a0575e1a9c5b40f	1428601243978	com.google.android.gm	pepediaz@gmail.com

filtrado por fecha e identificador de dispositivo al mismo tiempo, "ip:puerto/keylogger/diquery.php", que se puede ver en la Figura 4 (las otras interfaces son similares). Por lo tanto, se puede observar que el investigador tendría acceso a toda la interacción realizada, cumpliendo el objetivo propuesto.

Figura 4. Interfaz web de acceso a datos mediante filtrado por fecha e identificador

MENÚ PRINCIPAL

Consulta de logs por identificador de dispositivo y fecha

8a0575e1a9c5b40f ÷ 09-04-2015 ÷ Buscar

Hora	Aplicación	Log
19:50:37	com.android.mms	nos vemos alli.
19:49:39	com.android.mms	le dije que tuviese cuidado para que nadie lo siga
19:48:39	com.android.mms	ya quede con el individuo en el parque a medianoche
19:48:00	com.android.mms	685123485627
19:45:32	com.google.android.gm	trae el dinero acordado, adios.
19:44:32	com.google.android.gm	que nadie te siga, sino tendremos problemas
19:43:31	com.google.android.gm	ven tu solo
19:42:27	com.google.android.gm	a medianoche donde esta la fuente
19:41:38	com.google.android.gm	quedamos en el parque
19:40:43	com.google.android.gm	pepediaz@gmail.com

3.2. Estado del arte

Actualmente hay numerosas herramientas para investigación criminal, de las cuales detallaremos algunas a continuación.

Una herramienta es AFLogical [11]. Es de código abierto y permite extraer llamadas, SMS, MMS y contactos. Crea un directorio que tiene por nombre el tiempo y fecha de extracción. Se emplea en

análisis forense y en la presentación de evidencias. Otra utilidad es Andriller [12]. Posee un grupo de herramientas forenses para smartphones. Adquiere datos de sólo lectura, de tipo no destructivo. Además permite descifrar el patrón de bloqueo de la pantalla, el código PIN o contraseña, o decodificadores personalizados para aplicaciones. Es empleada en análisis forense y en la presentación de evidencias.

En cuanto a herramientas comerciales, existen múltiples. Cellebrite UFED [13] es un dispositivo autónomo capaz de obtener datos desde dispositivos móviles y almacenar la información en una unidad USB, tarjeta SD o PC. Posee un lector y generador de copias de tarjetas SIM. Puede crear e insertar un clon de la tarjeta SIM original y el teléfono funcionará con normalidad, sin registrarse en el operador de la red. Incluyen protocolos de conexión serie, USB, infrarrojos y Bluetooth. Extrae información de contactos, mensajes de texto, llamadas, mensajes de texto eliminados, grabaciones, videos, fotos, etc.

Encase [14] es una herramienta para técnicas de investigación cibernética. Realiza una imagen duplicada del disco duro que será empleada como evidencia ante la justicia. Incluye mecanismos que protegen la integridad del contenido original del disco. Efectúa búsquedas en espacios vacíos, espacios no asignados o archivos "swap" donde se almacenan documentos borrados y otras posibles pruebas.

Oxygen Forensic Suite (OFS) [15] ejecuta un agente que ofrece algoritmos de hash, pudiendo seleccionar el adecuado para cada investigación. Proporciona información sobre el dispositivo y la red a la que estaba conectado. Recupera contactos, SMS y MMS, archivos del usuario, información del calendario y mensajes de correo electrónico. Los datos obtenidos son organizados por fecha y hora. Es capaz de recuperar SMS y registros de eventos eliminados en los últimos 30 días.

Por último, NowSecure [16] (anteriormente viaForensics) analiza artefactos clave de dispositivos. Posee la capacidad de adquisición de datos. Mediante un botón, se accede al sistema de archivos interno del SO temporalmente, para obtener una adquisición física, lógica, los archivos del propio sistema, así como una copia de seguridad de la misma. Además, permite saltarse el bloqueo de pantalla y otras características. Se pueden generar informes dinámicos en múltiples formatos (HTML, PDF o XML).

Nuestra prueba de concepto proporciona el acceso a las interacciones en un teclado modificado. Queda fuera del ámbito de este artículo la forma de instalación de la aplicación en el dispositivo del infractor, pero se sugiere que se haga mediante ingeniería social o se realice por operativos de los cuerpos de seguridad del estado. Con este sistema, serían capturadas todas las pulsaciones en el dispositivo, en cualquier aplicación que emplee el teclado. Esa información sería enviada a un servidor remoto cada minuto, manteniendo un acceso casi en tiempo real a la misma a través del propio servidor. De esta forma, se lograría realizar un análisis muy preciso así como un seguimiento instantáneo de todas las acciones que pueda llevar a cabo el usuario investigado en un periodo temporal medio-bajo. Además, se podrían interceptar conversaciones con otros usuarios implicados en la comisión de un delito, así como diferentes tipos de interacciones entre el dispositivo y el usuario, facilitando la acción policial.

4. Conclusiones

En los últimos años, las nuevas tecnologías son el origen de muchas conductas ilícitas. Estas tecnologías facilitan la comisión de delitos, archivando datos y registros que pueden ayudar a formular imputaciones y acusaciones penales. El acceso a estos dispositivos sin autorización judicial previa se consideraba atentar contra los derechos fundamentales. La modificación de la Ley de Enjuiciamiento

Criminal permite a los jueces dar autorización a los cuerpos de seguridad del estado para la instalación de software espía en las tecnologías de los investigados para obtener la información que contienen, así como acceder a comunicaciones encriptadas. En este estudio se propuso una prueba de concepto que se encarga de registrar las interacciones que se realizan en un teclado modificado, para posteriormente memorizarlas en una base de datos interna. Además, se propuso también el envío de estos datos a un servidor externo cada cierto tiempo, para tener constancia de los mismos en el ámbito policial. Gracias a ella, se logran interceptar datos casi en tiempo real entre usuarios implicados en un delito, lo que facilita la actuación policial con consecuencias penales para los infractores.

Referencias

1. Jaramillo, G. Técnicas de análisis forense digital aplicadas a dispositivos y sistemas móviles. *Apuntes de Ciencia & Sociedad* **2011**, *1(2)*, 167-171.
2. Ortiz, J.C. Los derechos fundamentales frente a las nuevas medidas tecnológicas de investigación. En *La investigación del delito en la era digital*; Fundación Alternativas; Madrid, **2013**.
3. Vázquez, A. J. La figura del agente encubierto: aplicación práctica al delito de tráfico de drogas minorista y mediano tráfico. *Ciencia policial* **2013**, *121*, 63-82.
4. Zayas, H. El análisis de teléfonos móviles como técnica de investigación criminal. *Judicatus* **2014**, *3*, 54-92.
5. Rubio, E. Amenazas para la intimidad derivadas de las Nuevas Tecnologías. En *UVaDOC Repositorio Documental de la Universidad de Valladolid*; Universidad de Valladolid. Facultad de Ciencias Sociales, Jurídicas y de la Comunicación; Segovia, 2014.
6. Gobierno. Proyecto de Ley Orgánica de modificación de la Ley de Enjuiciamiento Criminal para el fortalecimiento de las garantías procesales y la regulación de las medidas de investigación tecnológica. En *Boletín Oficial de las Cortes Generales*. Madrid, 2015. http://pdfs.wke.es/3/0/3/2/pd0000103032.pdf. Accedido el 14 de Abril de 2015.
7. Android (2015). http://www.android.com/. Accedido el 14 de Abril de 2015.
8. Ubuntu (2015). http://www.ubuntu.com/desktop. Accedido el 14 de Abril de 2015.
9. LAMP (2015). http://linuxsolutions.org.in/lamp.html. Accedido el 14 de Abril de 2015.
10. Alamin, A.A.M., Mustafa, A.B.A. A survey on mobile forensic for Android smartphones. *IOSR Journal of Computer Engineering* **2015**, *17(2)*, 15-19.
11. Laub, J. Test results for mobile device acquisition tool: AFLogical 1.4. En *National Institute of Justice*; Washington, USA, 2011.
12. Andriller (2015). https://andriller.com/. Accedido el 14 de Abril de 2015.
13. Ariza, A., Ruiz, J., Cano, J. iPhone 3G: Un nuevo reto para la Informática Forense. *Congreso Iberoamericano de Seguridad Informática (CIBSI)* **2009**.
14. Arias, M. Panorama general de la Informática Forense y de los delitos informáticos en Costa Rica. *InterSedes* **2006**, *7(12)*, 141-154.
15. Mohtasebi, S., Dehghantanha, A., Broujerdi, H. G. Smartphone forensics: A case study with Nokia E5-00 mobile phone. *International Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDIWC)* **2011**, *1(3)*, 651-655.
16. NowSecure (2015). https://www.nowsecure.com/forensics/. Accedido el 14 de Abril de 2015.

Sobre el impacto de la limitación sensorial y de comunicaciones en dos algoritmos de consenso para asignación de tareas

Mosteo, Alejandro R. [1,*], **Tardioli, Danilo** [1] **y Montijano, Eduardo** [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza; {amosteo,dantard,emonti}@unizar.es

* Autor responsable del trabajo; amosteo@unizar.es

Abstract: El despliegue real de equipos de robots se encuentra a menudo con problemas que no han sido considerados durante el estudio teórico. En el pasado era común asumir que los robots podían comunicarse siempre, sin contemplar la necesidad de algoritmos de encaminamiento o limitaciones de ancho de banda. Hoy en día es habitual encontrar propuestas de algoritmos distribuidos o de consenso que explícitamente consideran que las comunicaciones sólo son posibles entre vecinos, aprovechando así la localidad para garantizar escalabilidad. También es común que los algoritmos que ofrecen garantías acerca de sus prestaciones asuman que toda la información acerca de las tareas a llevar a cabo por parte del equipo es conocida de antemano en el momento de arrancar la ejecución. En este trabajo nos proponemos comparar dos algoritmos de asignación que resuelven el Problema de la Asignación bajo asunciones realistas: no todas las tareas son conocidas por todos los robots, sino sólo por aquéllos que las tienen dentro de su alcance sensorial; y los robots se comunican mediante una red multi-salto dado que el rango de comunicación no abarca a todo el equipo. Nuestras contribuciones son, por una parte, modificaciones a los algoritmos —uno de consenso de tipo voraz y otro un simplex distribuido— para que puedan trabajar bajo las condiciones citadas; y, por otra, unas simulaciones que evalúan la calidad de la soluciones, la velocidad de convergencia y el uso de ancho de banda.

Keywords: sistemas multi-robot, consenso, comunicaciones limitadas

1. Introducción

La asignación de tareas en equipos de robots es un tema que ha sido tratado abundantemente, con muchas propuestas en la literatura [1]. La navegación multi-robot [2] es uno de los problemas básicos que deben ser solucionados en un equipo móvil, y concretamente el decidir adónde se debe dirigir cada

robot para completar la tarea que le ha sido asignada. Este problema se puede modelar como una instancia del problema de los múltiples viajantes (mTSP) sin restricciones entre robots y tareas. Su naturaleza NP ha llevado a adoptar un gran número de soluciones aproximadas como metaheuristicas [3] o algoritmos basados en subastas.

Un modelo más simple que puede ser adecuado para tareas como el despliegue inicial, respuesta a alertas o asignación de roles [4] es el conocido como Problema de Asignación, en el que se asigna a cada robot una única tarea. Este problema se puede resolver de forma óptima en tiempo cúbico con algoritmos centralizados [5].

El modelado del alcance de las comunicaciones ha ido ganando importancia en robótica móvil debido a su impacto en los despliegues reales [7], impulsando el desarrollo de algoritmos de consenso que son escalables y están bien caracterizados en términos de rendimiento, aprovechando únicamente las comunicaciones con vecinos que se hallan directamente conectados. Otro factor que puede afectar a la calidad de las asignaciones es la información disponible al inicio de la misión. Para algunos algoritmos, las cotas sólo son válidas si desde el principio todos los robots son conscientes de todas las tareas que se deben realizar. Sin embargo, dependiendo del contexto, ésta puede ser una suposición demasiado optimista [6].

En este trabajo se pretende estudiar el impacto de estos dos fenómenos: conectividad limitada y conocimiento parcial de las tareas, comparando el impacto de estas condiciones en dos algoritmos representativos: Un algoritmo de consenso distribuido con un rendimiento equivalente al algoritmo voraz centralizado [8] y un simplex distribuido capaz de encontrar soluciones óptimas bajo topologías cambiantes [9] y condiciones dinámicas [10].

El resultado de este estudio es un análisis de varias métricas comúnmente utilizadas para la evaluación de prestaciones desde varios enfoques: coste de las soluciones, velocidad de convergencia y cantidad de datos transmitidos. Con esta información, una implementación concreta puede decantarse conscientemente por una u otra solución. Además, nuestra contribución incluye la adaptación de los algoritmos a los supuestos de restricciones en rango sensorial y de conectividad, paso necesario para hacer frente a la propagación de las tareas que se van descubriendo a través de la red.

A continuación se describe el modelo teórico para el problema de asignación; los algoritmos estudiados se detallan y se presentan sus modificaciones en la Sección 3, mientras que su evaluación se discute en la Sección 4. Observaciones finales y planes de futuro cierran el artículo en la Sección 5.

2. Contexto teórico

Sea un equipo de N robots, $\mathcal{V} = \{1, \ldots, N\}$. La posición del robot i, expresada en coordenadas globales, es $\mathbf{r}_i \in \mathbb{R}^2$. Las interacciones entre robots se modelan con un grafo, $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$. Cada robot es un vértice, mientras que un arco, $(i, j) \in \mathcal{E}$, representa la posibilidad de que los robots i y j intercambien información. Este intercambio es posibilitado por el radio de comunicaciones, R_c. Sólo aquellos robots a una distancia inferior a R_c están conectados en el grafo. Denominamos con $\mathcal{N}_i$ a los vecinos del robot i, esto es, $\mathcal{N}_i = \{j \in \mathcal{V} \mid \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|_2 \leq R_c\}$, y con $|\mathcal{N}_i|$ su cardinalidad.

Suposición 2.1. (Grafo conexo no dirigido). *El grafo de interacción, $\mathcal{G}$, es conexo y no dirigido; esto es, existe un camino entre dos nodos cualesquiera y $(i, j) \in \mathcal{E} \Leftrightarrow (j, i) \in \mathcal{E}$.* ■

En el Problema de Asignación hay N tareas a asignar a N robots. En este trabajo definimos las tareas por su ubicación, $\mathbf{t}_i \in \mathbb{R}^2$, for $i = 1, \ldots, N$. El objetivo es asignar una tarea a cada robot, de tal modo que no queden tareas sin asignar y sin que un robot reciba más de una tarea. Describimos la asignación con un conjunto de N^2 variables, $x_{ij}, i, j \in \{1, \ldots, N\}$. En esencia, $x_{ij} = 1$ implica que el robot i recibe la tarea j, o de lo contrario $x_{ij} = 0$. Tomamos la distancia entre robot y tarea como el coste de cada asignación individual: $c_{ij} = \|\mathbf{r}_i - \mathbf{t}_j\|_2$. El objetivo de optimización es minimizar la suma total de costes. Por lo tanto, el Problema de Asignación queda formalmente dado por:

$$\begin{aligned} \underset{\mathbf{x}}{\text{minimizar}} \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} x_{ij}\|\mathbf{r}_i - \mathbf{t}_j\|_2^2, \qquad & \text{sujeto a } x_{ij} \in \{0,1\},\ \forall i,j \in \{1,\ldots,N\}, \\ \sum_{i=1}^{N} x_{ij} = 1,\ \forall j \in \{1,\ldots,N\} \qquad & \text{y } \sum_{j=1}^{N} x_{ij} = 1,\ \forall i \in \{1,\ldots,N\}. \end{aligned} \tag{1}$$

$\mathcal{T}_i$ denota el conjunto inicial de tareas detectadas por el robot i: $\mathcal{T}_i = \{\mathbf{t}_j \mid \|\mathbf{r}_i - \mathbf{t}_j\|_2 \leq R_s\}$, donde R_s representa el rango sensorial, distancia a la cual un robot puede detectar una tarea.

3. Algoritmos

Los algoritmos han sido seleccionados por ofrecer características relevantes en cuanto a calidad de las soluciones y escalabilidad.

3.1. Subastas descentralizadas mediante consenso

En [8] se presentan dos algoritmos basados en subastas descentralizadas, de los cuales el denominado *Consensus-Based Auction Algorithm* (CBAA) aborda el Problema de Asignación.

En este algoritmo, cada robot i gestiona su asignación mediante un vector $\mathbf{x}_i(n) = [x_{i1}, \ldots, x_{iN}]$, que contiene todas las asignaciones en la iteración n. Otro vector, $\mathbf{y}_i(n) = [y_{i1}, \ldots, y_{iN}]$, se usa para mantener la estimación actual del coste mínimo entre los robots que podrían ser asignados a cada tarea. Inicialmente cada robot determina su propia asignación individual óptima, $j_i = \arg\min_j c_{ij}$, haciendo $x_{ij_i}(0) = 1$ y $y_{ij_i}(0) = c_{ij_i}$. El resto de elementos $\mathbf{x}_i(0)$ son cero para tener una asignación válida, mientras que los restantes $\mathbf{y}_i(0)$ toman un valor infinito para permitir cualquier puja de otro robot.

A continuación el algoritmo comienza un proceso iterativo dividido en dos etapas. Una primera etapa de consenso es la que requiere comunicaciones. En esta etapa los robots que son vecinos intercambian sus $\mathbf{y}_i(n)$ y los actualizan mediante un consenso de minimización: $\mathbf{y}_i(n) = \min_{j \in N_i \cup i} \mathbf{y}_j(n-1)$, donde el mínimo se toma componente a componente.

La segunda etapa rectifica la asignación. Cuando dos o más robots se disputan la misma tarea, el consenso de minimización hará que eventualmente el coste mínimo prevalezca en todos los vectores $\mathbf{y}_i$. Cuando el robot i detecta que $y_{ij_i}(n) < c_{ij_i}$ esto implica que algún otro robot tiene un coste menor. En tal caso, el robot i hace que $x_{ij_i}(n)$ valga cero y busca la tarea: $j_i = \arg\min_j c_{ij}\ s.t.\ c_{ij} < y_{ij}(n)$, con la que luego asigna $x_{ij_i}(n) = 1$ y $y_{ij_i}(n) = c_{ij_i}$. A continuación el algoritmo vuelve a la fase de consenso y el proceso se repite hasta que $\mathbf{y}_i$ permanece constante durante tantas iteraciones como el diámetro del grafo.

3.1.1 . Análisis

En [8] se demuestra que CBAA calcula la misma solución que el algoritmo voraz centralizado. En consecuencia, el algoritmo es subóptimo. Sin embargo, tiene las ventajas de ser conceptual y computacionalmente sencillo. Además elimina la necesidad de un subastador centralizado, propiedad deseable en redes multi-salto dinámicas.

El tamaño de los mensajes enviados por cada robot e iteración es constante, siendo los N valores reales del vector $\mathbf{y}_i(n)$. Como en cada iteración sólo unos pocos de esos valores cambian, en nuestra implementación se envían solo dichos valores y su índice. El número de rondas de comunicaciones coincide con las iteraciones del algoritmo. El algoritmo termina, pues, cuando ningún robot necesita enviar ningún mensaje.

3.1.2 . Descubrimiento de tareas

A partir de las tareas inicialmente conocidas por cada robot, el conjunto de tareas disponibles para el robot i en cada iteración es dado por: $\mathcal{T}_i(n) = \mathcal{T}_i(n-1) \bigcup_{j \in N_i} \mathcal{T}_j(n-1)$. Para transmitir esta información, a los mensajes propios del algoritmo original se añade $\mathcal{T}_i(n) \setminus \mathcal{T}_i(n-1)$.

Dado que N es conocido por todos los robots, el desconocimiento de algunas tareas no requiere modificaciones al funcionamiento del algoritmo, siendo suficiente inicializar el coste de las tareas desconocidas con valor infinito para que no sean tomadas en cuenta hasta que sean descubiertas. Aunque esto no afecta a la convergencia del algoritmo, el número de iteraciones puede incrementarse ya que en el peor caso la propagación puede tardar tantas rondas como el diámetro de la red. Además, esto puede causar que la solución encontrada sea peor que la solución voraz centralizada.

3.2. Simplex distribuido

El otro algoritmo estudiado es una implementación distribuida del método simplex [9]. El trabajo original implementa el método descrito en [12], basado en la perturbación lexicográfica de vectores. Este método simplex no estándar garantiza que no se produzcan ciclos en problemas degenerados, y que para aquéllos duales degenerados la misma base óptima sea elegida por todos los participantes.

El problema dado en (1) se puede expresar como el programa lineal

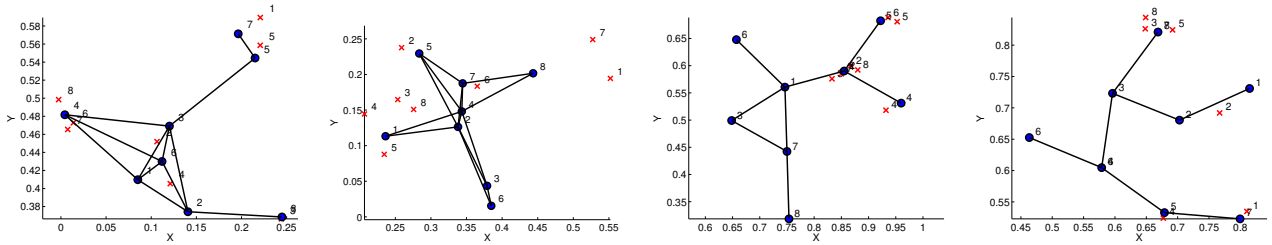
$$\underset{\mathbf{x}}{\text{minimizar}} \quad \mathbf{c}^T\mathbf{x}, \quad \text{sujeto a} \quad \mathbf{A}_x\mathbf{x} = \mathbf{b}_x. \tag{2}$$

con $\mathbf{c}$ y $\mathbf{x}$ los costes y asignación puestos en forma vectorial, $\mathbf{b}_x = \mathbf{1}_{2N-1}$ y $\mathbf{A}_x$ la matriz de unos y ceros que codifica las restricciones del problema.

En el caso centralizado con información completa, el método simplex encuentra la solución óptima para $\mathbf{x}$ dadas las restricciones del problema. La versión distribuida define una partición inicial $\mathcal{P} = \{\mathbb{P}^{[1]}, \ldots, \mathbb{P}^{[N]}\}$ de todas las columnas del problema, de modo que cada robot conoce inicialmente sólo las columnas relativas a sus propios costes para cada tarea, utilizando columnas artificiales con coste infinito para formar una base lexicográficamente válida $\mathbb{B}_M$ inicial [11].

En cada iteración, los robots vecinos se comunican sus bases óptimas, $\mathbb{B}^{[i]}$. A partir de las columnas actuales, $\mathbb{P}^{[i]}$ y de las bases enviadas por los vecinos, $\mathbb{B}^{[j]}$ para $j \in \mathcal{N}_i$, el algoritmo resuelve una instancia

Figura 1. Ejemplos de simulación con $N = 8$. Los círculos representan robots, las cruces objetivos y las líneas enlaces de red. (a) Vecindario denso, alcance sensorial corto. (b) Alta densidad, largo alcance. (c) Baja densidad, corto alcance. (d) Baja densidad, largo alcance.



(a) HD-SR (b) HD-LR (c) LD-SR (d) LD-LR

local del simplex, obteniendo una nueva base óptima. El proceso se repite hasta que todos los robots convergen a una misma solución, que corresponde a la asignación óptima.

3.2.1 . Análisis

La propiedad más importante del algoritmo es que garantiza encontrar la solución óptima. Su naturaleza de consenso hace que el número de rondas de comunicación coincida con las iteraciones del algoritmo. El proceso concluye cuando ningún robot comunica cambios en su base óptima.

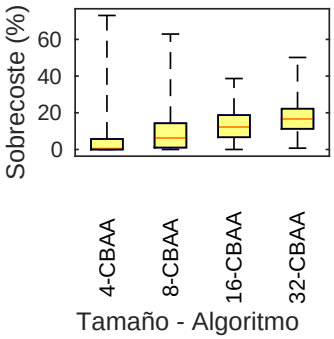
Sin embargo, este algoritmo tiene mayores demandas de comunicación. En cada iteración, cada robot necesita enviar su base óptima actual, $\mathbb{B}^{[i]}$. Nuestra implementación reduce la sobrecarga no enviando columnas que se han enviado en iteraciones anteriores. Por lo tanto, un mensaje está compuesto por los índices de la tarea y robot que definen una nueva columna en $\mathbb{B}^{[i]}$, además del coste asociado.

3.2.2 . Descubrimiento de tareas

El descubrimiento de tareas se realiza de la misma forma descrita en la Sección 3.1.2 , y por lo tanto la carga de red añadida para comunicarlas es la misma en este algoritmo.

Las tareas desconocidas se manejan inicializando sus correspondientes columnas con coste infinito. Esto previene que sean utilizadas en lugar de una columna con un coste real en la base óptima. Dado que, eventualmente, todas los costes reales se propagan a todos los robots, el algoritmo finalmente determina la base óptima sin modificaciones adicionales, aunque necesite más iteraciones.

Figura 2. Coste vs. tamaño de problema.

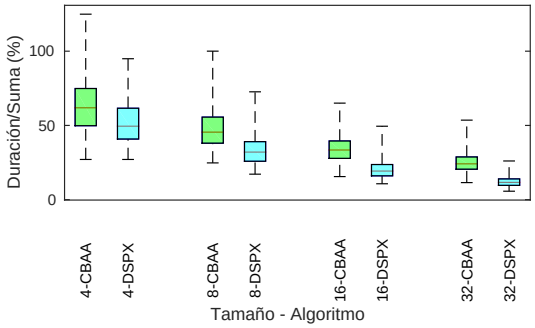


4. Evaluación

Esta sección describe la evaluación empírica de los algoritmos en diferentes escenarios. Por claridad, cada algoritmos recibe una etiqueta; concretamente nos referimos a las subastas por consenso con el nombre en su artículo original, CBAA, y al simplex distribuido como DSPX.

Para la evaluación se han ejecutado instancias del Problema de Asignación que pueden representar misiones de ese tipo, como la adopción de unas posiciones iniciales. Los robots se hallan inicialmente en posiciones al azar dentro de un cuadrado de lado unidad, garantizando la Suposición 2.1. Los objetivos se han posicionado similarmente al azar, pero asegurando que son detectables por algún robot. El alcance de comunicación se ha fijado a un único valor de $R_c = 0{,}125$ unidades. El resto de parámetros que definen un experimento se han ajustado para obtener pruebas representativas e identificar propiedades de los algoritmos. Las variables son tres: el tamaño del problema, N, desde 4 robots/tareas hasta 32, en potencias de 2 crecientes; el alcance del sensor, R_s, se ha fijado respecto del alcance de red, siendo o bien $R_s = R_c/4$ (corto alcance) or $R_s = R_c$ (largo alcance). Finalmente, la topología completa se ha garantizado forzando una distancia mínima entre robots, ya sea $10\,\%$ del radio de comunicación, permitiendo a los robots estar próximos entre sí (vecindad densa), o $90\,\%$ del radio, forzando a los robots a estar suficientemente distanciados (baja densidad).

Figura 3. Peor emparejamiento vs. tamaño de problema.



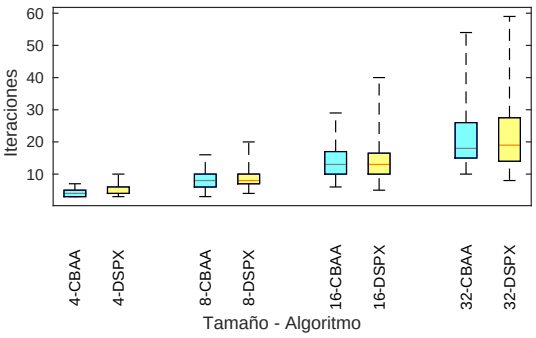
En consecuencia, para cada tamaño de problema se consideran cuatro escenarios resultado de combinar baja/alta densidad y corto/largo alcance. La Fig. 1 muestra un ejemplo de cada caso para el tamaño $N = 8$.

Para cada combinación se han ejecutado un centenar de casos con diferentes semillas aleatorias, pero los mismos con cada algoritmo de modo que la evaluación fuera justa. A continuación se comentan los resultados observados.

4.1. Calidad de las soluciones

El primer punto es el que atañe al objetivo intrínseco de los algoritmos; esto es, obtener la mejor asignación posbile. La Fig. 2 muestra la penalización del algoritmo subóptimo (CBAA) sobre el coste óptimo obtenido por el DSPX. La penalización se incrementa ligeramente con el tamaño del problema, siendo típicamente de un valor no despreciable entre el 20 % y el 50 %. El tiempo de misión (correspondiente al peor emparejamiento) es de interés aunque no sea el objetivo de la minimización de estos algoritmos; además se suele tratar menos a menudo por no ser un problema lineal. La Fig. 3 muestra dicho valor normalizado sobre la suma de costes de la solución óptima correspondiente, poniendo de relieve la gran penalización en que pueden incurrir los algoritmos voraces.

Figura 4. Iteraciones vs. tamaño de problema.



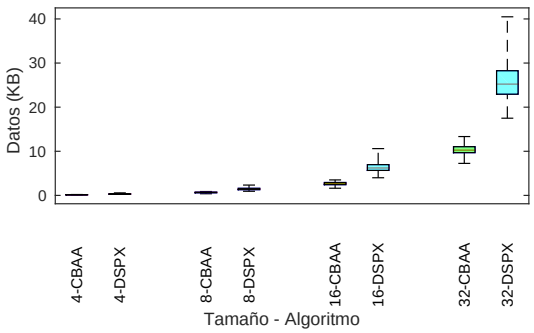
4.2. Velocidad de convergencia

Después de la calidad de la solución, el tiempo que se tarda en obtenerla es de gran interés. La Fig. 4 compara las iteraciones necesarias de cada algoritmo para cada tamaño de problema. El ganador en este caso es también el algoritmo óptimo, poniendo en entredicho la utilidad del algoritmo voraz.

4.3. Uso de ancho de banda

La última evaluación corresponde a la necesidad de intercambio de datos de cada algoritmo. La Fig. 5 sumariza los resultados, observándose una tendencia cuadrática, dado que el tamaño del problema también aumenta con el cuadrado de N. Esto podría convertirse en un cuello de botella, aunque todavía no es problemático para los tamaños aquí estudiados, estando dentro de los anchos de banda ofrecidos hoy en día por las comunicaciones inalámbricas más comunes. En este caso se observa un menor consumo por parte del algoritmo voraz CBAA, lo cual podría ser una razón para utilizarlo en situaciones de ancho de banda limitado.

Figura 5. Ancho de banda vs. tamaño de problema.



5. Conclusiones

En este trabajo se han estudiado dos algoritmos de consenso, uno de ellos capaz de comportarse como el algoritmo centralizado voraz en redes multi-salto conexas, siendo el otro un simplex distribuido que proporciona asignaciones óptimas para el problema estudiado. Hemos presentado las modificaciones necesarias para permitir su uso bajo el supuesto de que las tareas no son conocidas a priori, sino que son los propios robots los que las descubren cuando se encuentran en su proximidad y la comparten con el equipo. Hemos también estudiado sus prestaciones utilizando varias métricas de interés.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en términos de ancho de banda e iteraciones, es difícil argumentar en contra de la utilización del algoritmo óptimo estudiado. Si bien el algoritmo óptimo es algo más lento, la garantía de optimalidad dadas las latencias de una red típica lo hacen más recomendable.

Esto es especialmente cierto cuando la métrica observada no es la minimización de la suma de costes, sino el coste del peor emparejamiento, es decir, la duración de la misión. En este caso, el algoritmo voraz puede incurrir en grandes sobrecostes, mientras que la solución óptima conserva buenas cualidades en términos de tiempo total de convergencia, incluso si este no es el objetivo explícito de optimización del algoritmo.

Estamos en el proceso de extender estos resultados a escenarios dinámicos en los que los robots se mueven hacia sus objetivos, y de estudiar planes asignados de forma más general siguiendo el modelo de los múltiples viajantes.

Agradecimientos

Investigación financiada por los proyectos TELOMAN (DPI2012-32100) y SIRENA (CUD2013-05).

Referencias

1. A. R. Mosteo and L. Montano, "A survey of multi-robot task allocation," Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), Tech. Rep. AMI-009-10-TEC, 2010.
2. M. G. Lagoudakis, E. Markakis, D. Kempe, P. Keskinocak, A. J. Kleywegt, S. Koenig, C. A. Tovey, A. Meyerson, and S. Jain, "Auction-based multi-robot routing." in *Robotics: Science and Systems*, vol. 5, 2005.
3. T. Bektas, "The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures," *Omega*, vol. 34, no. 3, pp. 209 – 219, 2006. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048304001550
4. B. P. Gerkey and M. J. Matarić, "A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 9, pp. 939–954, 2004.
5. H. W. Kuhn, "The hungarian method for the assignment problem," *Naval research logistics quarterly*, vol. 2, no. 1-2, pp. 83–97, 1955.
6. M. G. Lagoudakis, M. Berhault, S. Koenig, P. Keskinocak, and A. J. Kleywegt, "Simple auctions with performance guarantees for multi-robot task allocation," in *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 1. IEEE, pp. 698–705.
7. D. Tardioli, A. R. Mosteo, L. Riazuelo, J. L. Villarroel, and L. Montano, "Enforcing network connectivity in robot team missions," *The International Journal of Robotics Research*, 2010.
8. H.-L. Choi, L. Brunet, and J. P. How, "Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 4, pp. 912–926, 2009.
9. M. Burger, G. Notarstefano, F. Allgower, and F. Bullo, "A distributed simplex algorithm for degenerate linear programs and multi-agent assignments," *Automatica*, vol. 48, no. 9, pp. 2298–2304, 2012.
10. E. Montijano and A. R. Mosteo, "Efficient multi-robot formations using distributed optimization," in *IEEE 53rd Annual Conference on Decision and Control (CDC)*, Dec 2014.
11. C. Gupta, *Optimization Techniques in Operation Research*. IK International Pvt Ltd, 2008.
12. C. N. Jones, E. C. Kerrigan, and J. M. Maciejowski, "Lexicographic perturbation for multiparametric linear programming with applications to control," *Automatica*, vol. 43, no. 10, pp. 1808–1816, 2007.

Sesión III-B

Adquisición de Información y Procesado

ATRAC: Herramienta automática para la detección y reconocimiento de objetivos en imágenes de satélite SAR

Vaughan Martín-Mateo,Patrick[1]*, López González, Francisco[1] , Jurado Lucena, Antonio[1], Lucas Verdoy, Berta[1], Fuertes Suárez, María José[2], Molero Armenta, Miguel Ángel [3]y Avolio, Corrado[4]

[1] Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)
[2] INDRA
[3] Telespazio Ibérica
[4] e-GEOS

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: vaughanmp@inta.es (INTA);

Abstract:

ATRAC (*Automatic Target Recognition and Classification System*) es una herramienta automática para la detección y reconocimiento de objetivos de interés militar presentes en imágenes de satélite SAR (radar de apertura sintética) en banda X. ATRAC es aún un demostrador, encaminado a permitir a un fotointérprete abrir una imagen SAR y, en un breve espacio de tiempo, tener detectados todos los objetivos en la imagen y posteriormente poder reconocer aquellos objetivos incluidos en la base de datos. ATRAC consta de dos subsistemas que, secuencialmente, son: detección (ATD, *automatic target detection*) y reconocimiento (ATR, *automatic target recognition*). Los objetivos que se exponen en esta comunicación son vehículos de combate y aviones militares. La tasa de detección de objetivos varía según el tipo de escenario, y la tasa de reconocimiento (distinción e identificación entre modelos concretos de objetivos de similares características) varía según el tipo y tamaño de objetivo. Los resultados hasta la fecha son prometedores y se espera superar las cifras de porcentaje de acierto mediante ajustes finales en los algoritmos de la herramienta y ampliando el número/calidad de modelos de objetivos simulados.

Keywords: ATR; automatic target recognition; ATD; automatic target detection; SAR

---

1. Introducción

ATRAC ha sido desarrollado en el proyecto SAR4ip, que se enmarca en la línea de I+D en defensa y seguridad y cuyo objetivo general, en este caso, es la preparación para la explotación de imágenes del futuro satélite radar español PAZ, cuyo lanzamiento está previsto para 2015.
La importancia de la detección y reconocimiento automático de objetivos (ATD y ATR) ha adquirido creciente importancia a nivel estratégico y táctico en escenarios de combate [1]. La aplicación de los clasificadores a imágenes radar de apertura sintética (SAR) presenta dificultades, principalmente en cuanto al *clutter* (señal recibida del entorno del objetivo) y a las diferentes configuraciones y orientaciones de los objetivos [1]. Por otro lado, si bien las referencias en cuanto a detección automática de objetivos son abundantes [2], para el caso del reconocimiento es menos accesible, salvo para el caso concreto de MSTAR [1] [4] [5].
En esta comunicación se expondrá el sistema de procesamiento de ATD y ATR desarrollado en el marco del proyecto SAR4ip y los resultados de la validación con imágenes SAR reales de dos tipos de objetivos: vehículos de combate y aviones militares.

2. Métodos

Tal y como muestra la figura 1, la cadena de procesamiento consta de tres fases principales: recolección de datos e imágenes, entrenamiento y fase operativa. La primera fase consta de productos comerciales (OTS, *off-the-shelf*, en amarillo) cuyos datos de entrada (*input*) son:

- Modelos 3D de los objetivos: se usan como *input* para el simulador SAR, que simula la señal de retorno en orientaciones a cada 1º de azimut.

- Imágenes SAR reales: se usan para detectar objetivos y, a partir de ahí, se obtienen sub-imágenes recortadas (*chips*) que contengan un objetivo. Estos *chips* se usan en la fase de validación para determinar la tasa de acierto del sistema.

- Imágenes ópticas: se adquieren en fechas próximas a las imágenes radar reales y se usan como verdad terreno para saber el modelo concreto de objetivo detectado en las imágenes radar reales.

En segundo lugar, se llevó a cabo la fase de entrenamiento cuyo fin es obtener un reconocedor de objetivos que haya sido entrenado mediante los siguientes subprocesos (figura 2): un pre-procesamiento del *chip* (centrado del objetivo sobre el *chip* y normalización), la extracción de firmas (o vector de características) mediante algoritmos de máscaras de umbrales, que extraiga las siluetas de los objetivos, un remuestreo mediante el operador *max-pooling*, y el consiguiente volcado de dichas firmas en una base de datos. Posteriormente, se aplican clasificadores de imagen a estas firmas. Los clasificadores analizados en más detalle han sido de tipo vecino más próximo, máquinas de soporte vectorial (*support vector machines*, SVM) y redes neuronales artificiales (ANN), concretamente el de perceptrones multicapa (multi-layer perceptron, MLP) [6].

Finalmente, la fase operativa emula cómo se comportaría el sistema una vez esté operativo, dado que ATRAC aún es un demostrador. El *input* en esta fase es una (o varias) imagen SAR real. Se lleva a cabo

un proceso automático de detección de objetivos basado en el algoritmo *constant false alarm rate* (CFAR) [2], que además permite al usuario adaptar ciertos parámetros (tamaño máximo y mínimo de los objetivos) con el fin de reducir tanto la tasa de falso positivo como el sesgo de posibles objetivos. Los objetivos detectados quedan segmentados en *chips* que sirven como *input* a la cadena de pre-procesamiento, extracción de firmas y reconocimiento descrita en la fase anterior.

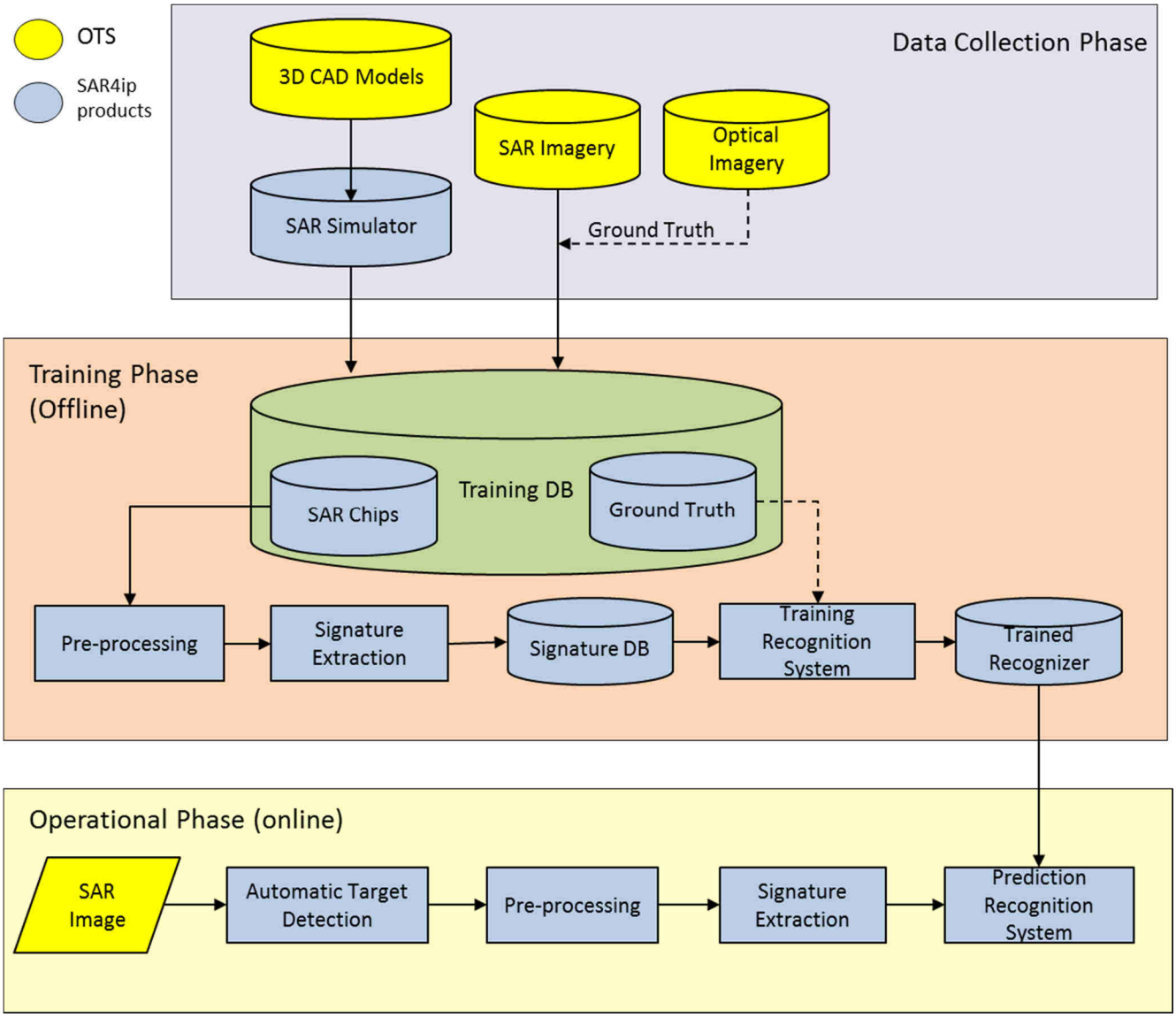


Figura 1. Cadena de procesamiento del sistema, que consta de tres fases (de arriba a abajo): recolección de datos, entrenamiento y fase operativa.

El procesamiento descrito anteriormente, se aplicó a la detección y reconocimiento de dos tipos de objetivos provenientes de dos tipos de productos: a) vehículos de combate soviéticos, obtenidos de la base de datos pública MSTAR [3] y b) aviones militares extraídos de imágenes SAR del satélite COSMO-SkyMed (CSK), en modo Spotlight 2, adquiridas sobre el "cementerio" de aviones (AMARG) de la base Davis-Montham, en Tucson, Arizona.

Se han llevado a cabo dos tipos de pruebas:

Entrenamiento con datos reales. Significa que se divide la base de datos de *chips* de imagen en dos grupos: (a) el que se usa para entrenar el clasificador y (b) el que se usa para llevar a cabo el reconocimiento los objetivos. Este tipo de entrenamiento da porcentajes de acierto bastante elevados puesto que ambos conjuntos de imágenes (a, b) fueron adquiridos por la misma plataforma en el mismo escenario. Esta prueba sólo fue posible realizarla sobre datos MSTAR (vehículos).

Entrenamiento con datos simulados. Significa que los *chips* de imagen usados para entrenar el reconocedor (a) provienen originalmente de simulaciones a partir de modelos 3D de cada objetivo. Por contra, los *chips* usados para validar (b) provienen de imágenes SAR reales. Por tanto, gran parte de la dificultad consiste en que a y b sean (radiométricamente y geométricamente) lo más parecido posible. Debido a las diferencias entre simulaciones y datos reales, el nivel de acierto para este segundo caso de estudio es inferior al del entrenamiento con datos reales. Esta prueba se realizó sobre vehículos de la base de datos MSTAR y sobre aviones militares.

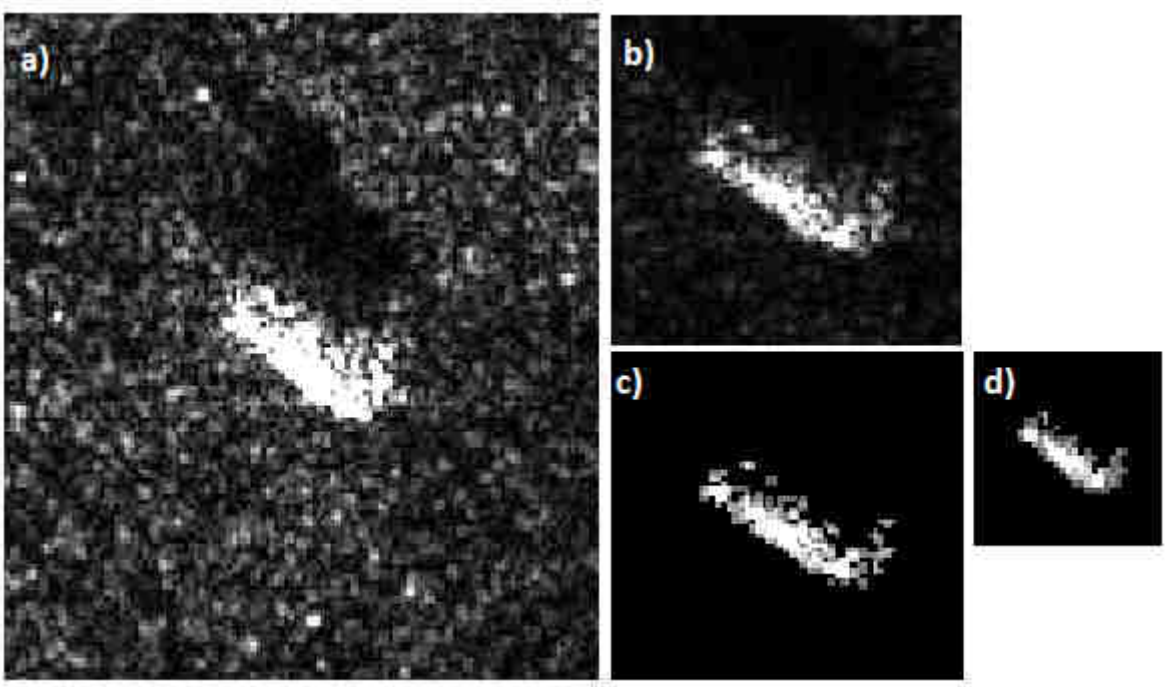


Figura 2. Procesos ejecutados en la fase de entrenamiento para la generación del vector de características, tomando como ejemplo un carro de combate soviético T-62: a) Imagen Original, b) Pre-procesamiento (centrado y normalización), c) Extracción del objetivo mediante un algoritmo de segmentación y umbralizado, d) Re-muestreo del objetivo mediante un operador de "*max-pooling*".

3. Resultados y Discusión

3.1. Entrenamiento con datos reales

Esta sección resume los resultados de reconocimiento de vehículos de combate obtenidos con distintos clasificadores (figura 3). Se toma como referencia comparativa los resultados de la publicación NATO/OTAN [1]. Las barras azules representan las pruebas realizadas con *chips* de objetivos habiendo eliminado la respuesta del *clutter*, mientras que los resultados de las barras verdes corresponden a

pruebas donde los *chips* incluyen la respuesta del objetivo, su "sombra" y el *clutter* del entorno, por tanto el clasificador aprende no sólo la respuesta del objetivo en sí, sino también su efecto sobre su entorno.
Los vehículos de combate soviéticos analizados son diez modelos distintos: dos carros de combate (T62 y T72), un VCI (BMP2), dos APC (BTR60 y BTR70), un obús (2S1), un sistema antiaéreo (ZSU23-4), un VEC (BRDM2), un camión (ZIL-131) y una pala empujadora (D7). Los clasificadores usados son: vecino más próximo (NN), SVM con función polinómica de segundo grado (Poly2) y de base radial (RBF) y MLP.
Los resultados (figura 3) muestran que se puede alcanzar precisiones del 94% usando *chips* con *clutter* en las condiciones concretas descritas. Es importante recordar que se entrena con *chips* reales y que la resolución del SAR aeroportado usado de MSTAR es de 30cmx30cm.

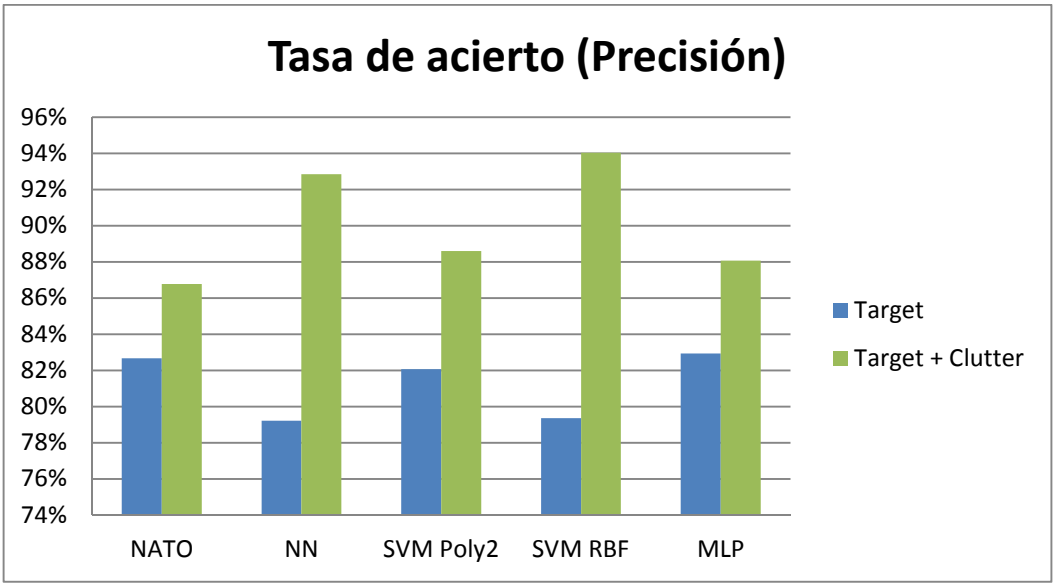


Figura 3 Precisión de reconocimiento automático entre diez vehículos de combate utilizando cinco tipos de clasificadores.

3.2. Entrenamiento con datos simulados en vehículos de combate

Se ha realizado pruebas con tres vehículos terrestres diferentes incluidos en la base de datos MSTAR (BTR70, ZSU, T62). La base de datos de características sirvió para entrenar un reconocedor SVM-RBF.

La figura 4 muestra los resultados de reconocimiento en términos de la métrica F1-Score para dos casos de estudio: reconocimiento entre tres objetivos (figura 4a**),** y diferentes emparejamientos para el reconocimiento de dos objetivos (figura 4b**)**. Se han simulado los objetivos con tres ángulos de incidencia (74º, 75º y 76º) puesto que las imágenes provenientes de la base de datos MSTAR han sido adquiridas alrededor del ángulo de incidencia de 75º, no siendo constantes para todos los objetivos.

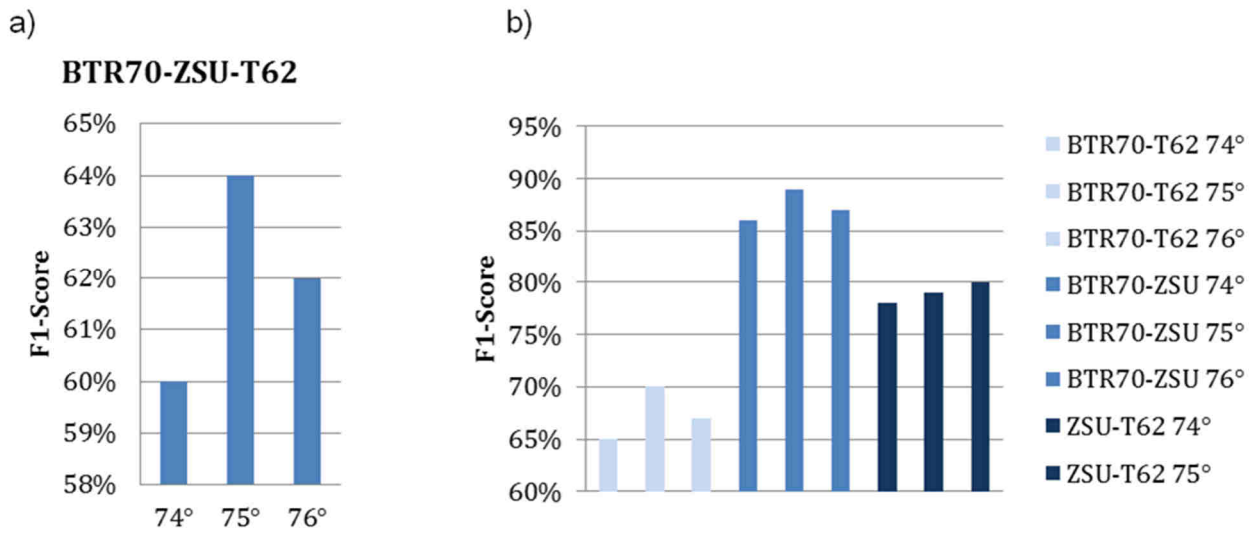


Figura4. Tasa de reconocimiento (F1-Score) de vehículos de combate comparando: a) tres objetivo entre sí (BTR70, ZSU, y T62) y b) emparejando vehículos (BTR70-T62, BTR70-ZSU, y ZSU-T62) para distintos ángulos de incidencia simulados. El ángulo de incidencia de los objetivos reales para la prueba ha sido de 75º.

La figura 4 muestra que el máximo valor de reconocimiento ha sido, salvo en un caso, para el ángulo de incidencia de 75º. El reconocimiento binario de los objetivos BTR70-ZSU ha dado la tasa más alta de reconocimiento (89%). La baja tasa de reconocimiento obtenida en la figura 4a (64%) es debida a que en muchas orientaciones el objetivo T62 ha sido confundido con el objetivo BTR70.

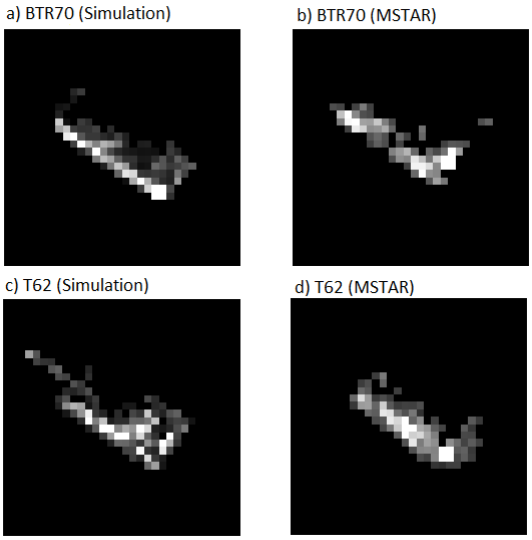


Figura5. Comparación de los objetivos BTR70 y T62 simulados (izda.) reales (dcha.) con una orientación de 235º.

Para ejemplificar la dificultad de lo reconocedores, la figura 5 muestra los objetivos procesados usando el mismo esquema mostrado en la figura 2a,d. En esta figura puede apreciarse que las imágenes reales de los objetivos BTR70 y T62 son muy semejantes en algunas orientaciones (ej. 235º) y, por tanto, la

simulación del BTR70 es más parecida a la imagen real del T62, que el parecido que guarda el T62 simulado con su correspondiente real. Este ejemplo explica las variaciones importantes en los resultados dependiendo de los tipos de objetivos comparados.

3.3. Entrenamiento con datos simulados (aviones militares)

En el caso de aviones militares, se llevaron a cabo pruebas de reconocimiento entre tres modelos: el bombardero B-52, Hercules C-130 y Orion P-3. Para la validación se usaron tres imágenes SAR reales CSK de distintas fechas, cuyos ángulos de incidencia promedio fueron 52º (polarización horizontal, HH) y 58º (polarización HH y vertical, VV). Para cada imagen se simuló los objetivos con ±1º de variación en dichos ángulos. Se seleccionó el reconocedor SVM-RBF con el que se logró una tasa de reconocimiento máxima de 85%.

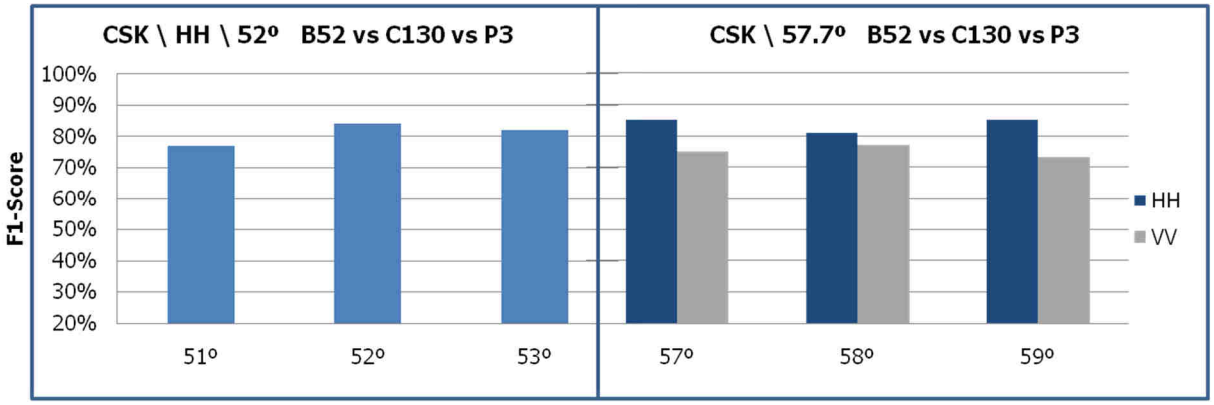


Figura6. Tasas de reconocimiento (F-1 Score) entre tres modelos de aviones (bombardero B-52, Hercules C-130 y Orion P-3) validado con tres imágenes CSK en modo Spotlight 2, una con ángulo de incidencia promedio de 52º (izda.) y dos imágenes con 58º (dcha.). Los restantes ángulos de incidencia se han ensayado sobre los datos simulados para comprobar el efecto de pequeñas variaciones en dichos ángulos.

Los resultados de las pruebas con aviones indican que las pequeñas variaciones entre los ángulos de incidencia simulados y los reales (en este rango) no alteran los resultados de forma sustancial. Por otro lado, la polarización horizontal aporta mayores tasas de reconocimiento en este tipo de objetivos, cuya geometría es predominantemente también horizontal. Destaca además la similitud geométrica entre el C130 y P3, (de similar tamaño y ambos con cuatro turbopropulsores sobre ala recta perpendicular al fuselaje) que dificulta su reconocimiento.

4. Conclusiones

Se ha comprobado que ATRAC forma parte de un sistema que es capaz de detectar y reconocer de forma automática objetivos presentes en imágenes SAR de similares características al futuro satélite español PAZ. Las pruebas realizadas muestran unas tasas de reconocimiento superiores al 85% con variaciones que dependen principalmente de los siguientes factores limitantes: (a) la disponibilidad de modelos 3D

y su adecuada configuración para tareas de simulación, (b) tener un simulador que esté validado para que represente lo más fielmente posible la señal radar real de un objetivo en todas sus orientaciones y (c) el ratio entre la resolución de la imagen SAR frente al tamaño y complejidad del objetivo. Este ratio deberá aumentar cuanto mayor sea la similitud entre los modelos de objetivos a reconocer.
No obstante, ATRAC aún está en estado de demostrador y está integrado en una plataforma sobre la que se pueden (a) integrar herramientas adicionales, (b) ajustar y afinar los algoritmos de clasificación usados e (c) incrementar la base de datos de objetivos, todo ello con el fin de obtener mayor precisión en los resultados de reconocimiento.

Agradecimientos

El trabajo presentado ha sido desarrollado en el marco del proyecto SAR4ip, financiado por la DGAM como actividad de cooperación industrial.

Referencias

1. Schumacher, R.; Rosenbach, K. *ATR of battlefield targets by SAR - classification results using the public MSTAR dataset compared with a dataset by QinetiQ, UK*, RTO-MP-SET-080 AC/323(SET-080)TP/50, **2004**, ISBN 92-837-1145-9.
2. Crisp, D.J. *The State-of-the-Art in Ship Detection in Synthetic Aperture Radar Imagery*, DSTO Information Sciences Laboratory, May, **2004**.
3. *Moving and Stationary Target Acquisition Recognition (MSTAR),* Program Review, Denver, CO, Nov. **1996**.
4. Ross, T.D. and J. Mossing, *MSTAR Evaluation Methodology*, In Proc. of SPIE, Vol. 3721, Algorithms for SAR Imagery VI, p.705, Orlando, USA, **1999**
5. Keydel, E.R., S.W. Lee and J.T. Moore, *MSTAR Extended Operating Conditions*, A Tutorial, In Proc. Of SPIE, Vol. 2757, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery III, p.228-242, **1996**.
6. Kecman, V., *Learning and Soft Computing: Support Vector Machines, Neural Networks, and Fuzzy Logic Models (Complex Adaptive Systems),* A Bradford Book, 1st Edition (**2001**).

Monitorización on-line de señales biomédicas para prevención de accidentes hiperbáricos en actividades subacuáticas

Izquierdo, David [1,*], Gil, Eduardo [2], Aiger, Montserrat [1], Lozano, María Teresa [1], López-Jurado, María Isabel [3], Lázaro, Jesús [2], Gracia, Ángel [1], Garcés, Ignacio [2], Bailón, Raquel [2], Peláez-Coca, María Dolores [1] y Bea, José Antonio [2]

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Zaragoza; d.izquierdo@unizar.es (DI), montsea@unizar.es (MA), maytelo@unizar.es (MTL), agraciar@unizar.es (AG), mdpelaez@unizar.es (MDP)

[2] Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, Universidad de Zaragoza, Zaragoza; edugilh@unizar.es (EG), jlazarop@unizar.es (JL), ngarces@unizar.es (IG), rbailon@unizar.es (RB), jabea@unizar.es (JAB)

[3] Hospital General de la Defensa de Zaragoza, Zaragoza; ilopmar@oc.mde.es (MIL)

***** Autor Principal y responsable del trabajo: d.izquierdo@unizar.es (DI)

Abstract: Actualmente los periodos de descompresión y de exposición máxima en actividades subacuáticas están fijados por tablas de referencia generalistas y no adaptadas a la fisiología de cada submarinista. El uso de señales biomédicas durante la inmersión para la identificación de estados psicofisiológicos y neuropsicológicos disfuncionales puede evitar posibles accidentes subacuáticos. En esta comunicación se presentan los resultados preliminares obtenidos durante el registro de señales biomédicas de buceadores sometidos a situaciones hiperbáricas dentro de una cámara hiperbárica en la que se ha simulado la inmersión hasta una profundidad máxima de 40 metros.

Keywords: Subacuático, Cámara hiperbática, Hiperoxia, PPG, HRV

---

1. Introducción

Actualmente los periodos de descompresión y de exposición máxima en actividades subacuáticas están fijados por tablas de referencia que recogen condiciones de seguridad basadas en la experiencia y recogidas en el manual de buceo de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) [1].

Estas tablas son generalistas y no están adaptadas a la fisiología de cada submarinista, por lo que en esta comunicación se propone la monitorización on-line de distintas señales biomédicas durante la inmersión para la identificación de estados psicofisiológicos y neuropsicológicos disfuncionales que puedan desembocar en accidentes subacuáticos como la intoxicación por oxígeno o hiperoxia con el fin de evitarlos. Para demostrar dicha capacidad de detección y/o prevención de accidentes subacuáticos, en este trabajo comenzaremos por estudiar y cuantificar las modificaciones que se producen en la actividad del sistema nervioso autónomo cuando el sujeto se expone a un entorno hiperbárico. Para ello, a través de la monitorización y análisis de distintas señales biomédicas, se estudiarán los cambios en diferentes variables fisiológicas con el aumento de presión.

2. Hiperoxia en actividades subacuáticas / Accidentes hiperbáricos y posibles indicadores biomédicos

Uno de los accidentes subacuáticos más peligrosos es la hiperoxia o exceso de concentración de oxígeno en sangre. Esta puede tener consecuencias fatales en el buceador, ya que aparece repentinamente y sin síntomas previos [2, 3], causando convulsiones y la pérdida de consciencia, momento en el cual el sujeto puede perder el regulador y ahogarse [4]. Además, la hiperoxia continuada conlleva la reducción parcial del oxígeno hasta formar reactivos que pueden provocar un daño celular por estrés oxidativo irreversible [5].

El riesgo de hiperoxia aumenta con la profundidad y duración de la inmersión, y con la utilización de mezclas enriquecidas con oxígeno. Los riesgos en el buceo se relatan incluso para inmersiones recreativas con aire comprimido (limitado a una profundidad entre 40 y 50 metros) con reducción de la función cognitiva del buzo y aumento de reacciones inadecuadas. A mayores profundidades (de 60 a 70 metros) se deteriora la respiración y se puede llegar a ver afectado el funcionamiento del sistema nervioso.

Estudios previos, muestran que la administración de oxígeno mejora de forma significativa el rendimiento cognitivo (percepción, atención, memoria de trabajo, memoria a largo plazo y memoria retrospectiva) [6, 7]. Rendimiento que se reduce sustancialmente en concentraciones altas de oxígeno como en las situaciones de hiperoxia en ambientes hiperbáticos.

Estos ambientes hiperbáricos también afectan al ritmo cardiaco y, especialmente, a la variabilidad cardiaca (HRV, Heart Rate Variability) que es una de las medidas no invasivas más ampliamente empleada para evaluar la actividad del sistema nervioso autónomo y el balance entre sus dos ramas: simpática y parasimpática. El principal efecto del aumento de la presión es la presencia de bradicardia [8] y el desplazamiento de la HRV hacia las altas frecuencias, identificando la presencia de un aumento en la actividad parasimpática [9]. Así pues, el uso de la HRV como medida de control de la hiperoxia hiperbática parece factible.

3. Variabilidad del Ritmo Cardiaco

La cuantificación de la actividad del sistema simpático y parasimpático de manera no invasiva es posible mediante el análisis de la variabilidad del ritmo cardiaco (HRV), en concreto, mediante la cuantificación de sus componentes de baja y alta frecuencia, LF (Low-Frequency) y HF (High-Frequency) [10]. El análisis clásico de la HRV considera que la potencia en la banda LF, definida entre

0.04 y 0.15 Hz (Hercios), está relacionada con la actividad de ambas ramas simpática y parasimpática, mientras que la potencia en la banda HF (0.15-0.4 Hz) está relacionada con la actividad del sistema parasimpático únicamente. Por esto, se considera que la relación o ratio entre la potencia en las bandas LF y HF está relacionado con el balance entre las dos ramas del sistema nervioso autónomo.

El análisis de la HRV, durante la exposición a condiciones de presión atmosférica variables, requiere la aplicación de métodos frecuenciales que sean capaces de identificar variaciones en las componentes LF y HF respecto a un nivel basal, con el fin de detectar los episodios de hiperoxia que puedan afectar a la seguridad del submarinista. El grupo de investigación *Biomedical Signal Interpretation & Computational Simulation* (BSICoS) tiene experiencia en el análisis de la HRV como medida no invasiva de las variaciones en la actividad del ANS inducidas por: cambios anímicos provocados por la escucha de diferentes estímulos musicales [11], análisis de la señal polisomnográfica para el estudio de alteraciones del sueño [12], e identificación de estados de privación de sueño [13].

Por tanto, el análisis de la HRV proporciona parámetros útiles para detectar un estado alterado del sistema nervioso autónomo y poder predecir o alertar de un posible accidente hiperbárico.

4. Campaña de medidas en cámara hiperbárica

A fin de estudiar las variaciones en la HRV con el aumento de presión atmosférica en el entorno del sujeto, se ha diseñado un protocolo de inmersión en cámara hiperbárica, que expone a los sujetos a una presión que varía entre 1 bar y 5 bares. Se ha seleccionado este rango de presiones por ser presiones similares a las soportadas en inmersiones recreacionales reales. Como puede verse en la Figura 1, el protocolo diseñado establece una profundidad máxima de 40 metros, donde se registran las señales biomédicas de interés. Dichas señales también se registran en sendas paradas a 20 metros que se realizan tanto en el descenso como en el ascenso.

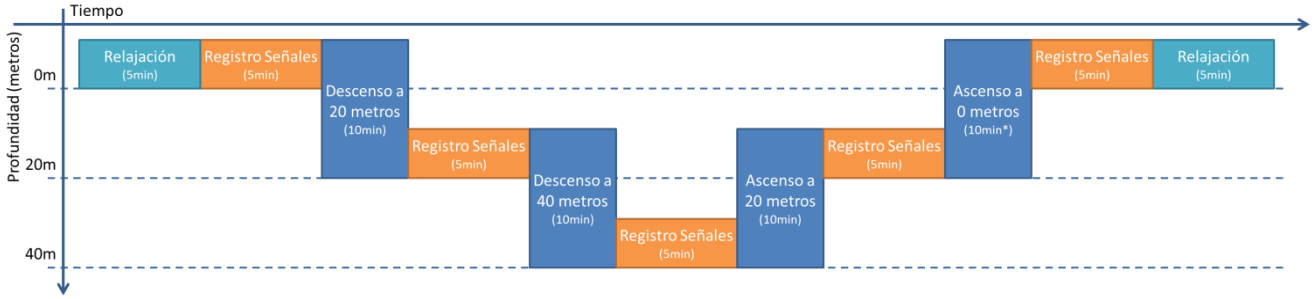


Figura 1. Diagrama temporal con las actividades a realizar y su duración aproximada.

Los sujetos permanecen en el interior de la cámara hiperbárica un tiempo total aproximado de 75 minutos (incluyendo los periodos de adaptación a las distintas profundidades y de recuperación) más el tiempo dedicado al descenso y ascenso. Durante el ascenso, se realizan varias paradas intermedias según marcan las normas de seguridad para el ejercicio de actividades subacuáticas a fin de evitar posibles accidentes hiperbáricos por una rápida descompresión [14]. Los sujetos deben permanecer sentados dentro de la cámara hiperbárica (Figura 2) y sin realizar movimientos bruscos o esfuerzos. Además, durante las cuatro horas previas a la prueba los sujetos no pueden tomar excitantes como café, alcohol o tabaco ya que pueden alterar los registros y la fiabilidad de las medidas.



Figura 2. Fotografía de dos sujetos del estudio en el interior de la cámara hiperbárica durante el registro.

4.1. Señales biomédicas de interés

Para la captura de las señales biomédicas de interés, se usan tres registradores *Nautilus* desarrollados por Kaunas University of Technology (Lithuania) que permiten registrar diversas señales biomédicas de forma sincronizada y en entornos hiperbáricos. Estos registradores, que se sujetan en el brazo de los sujetos como puede verse en la Figura 3, registran un total de siete señales biomédicas: el electrocardiograma (ECG), la fotopletismografía de reflexión en la frente (PPG1) y de transmisión en el dedo corazón de la mano no dominante (PPG2), la actividad electrodérmica a través de la respuesta galvánica de la piel entre el dedo índice y el anular de la misma mano no dominante (GSR), el movimiento de los ojos a través del electrooculograma (EOG), la tensión muscular de la espalda a través del electromiograma (EMG) y la temperatura del cuerpo del sujeto (TMP). Además, el registrador cuenta en su interior con sensores que permiten realizar un seguimiento de las variaciones de temperatura y presión del entorno.

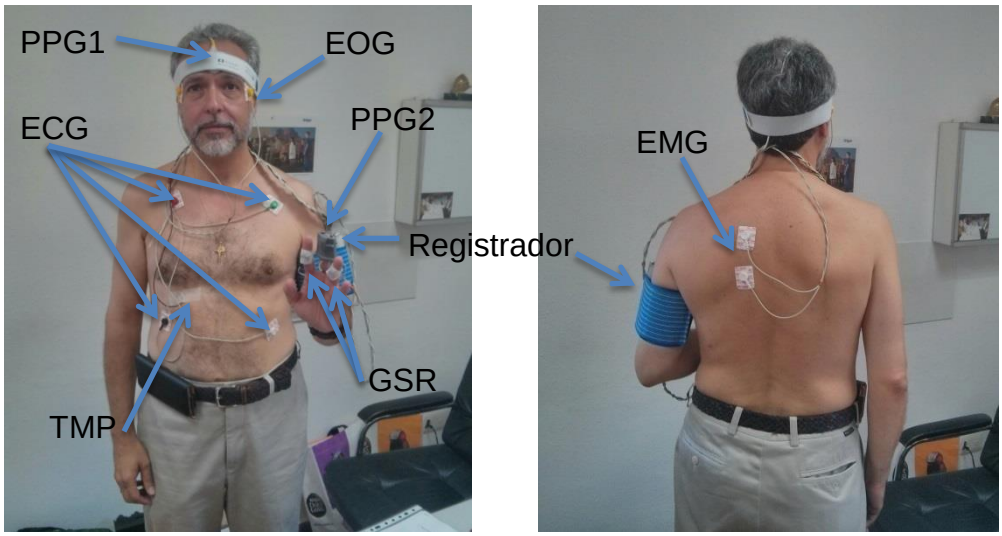


Figura 3. Fotografía de la distribución de las sondas en un sujeto del estudio y esquema de las señales biomédicas de interés registradas.

4.3. Procesado de Señales biomédicas

En este primer estudio nos centramos en el análisis de la señal fotopletismográfica de transmisión registrada en el dedo corazón de los sujetos (PPG2 de la Figura 3). La señal PPG representa el volumen de sangre arterial que llega al dedo de forma continua, por lo que tiene un comportamiento cíclico sincronizado con el pulso cardiaco, pudiendo obtener el ritmo de pulso mediante el seguimiento de los pulsos de la señal. Como el tiempo que tarda el pulso en viajar desde el corazón hasta la periferia no es constante, la variabilidad de ritmo de pulso (PRV, pulso rate variability) no es exactamente igual a la HRV. No obstante, ambas señales están altamente correladas incluso en condiciones no estacionarias [15].

La detección de estos pulsos se realiza mediante un algoritmo robusto que incluye un detector de artefactos que permite identificar los segmentos de señal no útiles. Los artefactos que se producen en la señal pueden ser debidos a movimientos del sensor o del sujeto, flexiones del dedo, presiones en las sondas o en el sensor, etc.

Gracias a esta detección robusta, es posible extraer la PRV de los sujetos y realizar un estudio frecuencial de esta señal en las bandas LF (0.04-0.15 Hz) y HF (0.15-0.4 Hz). Los parámetros más habitualmente estudiados son las potencias de la bandas LF y HF normalizadas con la potencia total (PLFn y PHFn respectivamente) y la relación o ratio entre las mismas (LF/HF).

5. Resultados

Como se aprecia en la Tabla 1, donde se han recogido los parámetros biomédicos más importantes de seis de los sujetos bajo estudio, el ritmo cardíaco de cinco de los seis sujetos mostrados ha aumentado al descender a los 40 metros de profundidad respecto al ritmo cardíaco en la superficie.

		Ritmo cardíaco		**PLFn**		**PHFn**		**LF/HF**	
Sexo	**Edad**	**0 m**	**40 m**	**0 m**	**40 m**	**0 m**	**40 m**	**0 m**	**40 m**
V	>40	90	88	0.88	0.89	0.12	0.11	7.0	8.4
V	20 - 30	79	83	0.78	0.81	0.22	0.19	3.5	4.4
M	20 - 30	84	89	0.55	0.78	0.45	0.22	1.2	3.6
M	30 - 40	79	81	0.46	0.77	0.54	0.23	0.9	3.3
V	20 - 30	56	64	0.84	0.90	0.16	0.1	5.2	9.5
V	>40	86	83	0.76	0.85	0.24	0.15	3.2	5.6

Tabla 1. Ritmo cardíaco y componentes LF y HF de la HRV para seis de los sujetos bajo estudio.

En la figura 4.a podemos observar la diferencia entre la potencia normalizada obtenida a 40m de profundidad menos la obtenida a 0m, tanto para la banda LF como para la HF. Los resultados obtenidos muestran un aumento de la potencia normalizada de la banda LF y un decremento en la banda HF para todos los sujetos, como también se apreciaba en la Tabla 1. Al realizar una prueba t de Student vemos que ambas diferencias son significativas con un valor *p* de 0.0474. Siendo la potencia normalizada media en la banda LF de 0.71 a 0m y 0.84 a 40m, y de 0.29 y 0.17 en la banda HF para 0 m y 40 m de profundidad, respectivamente.

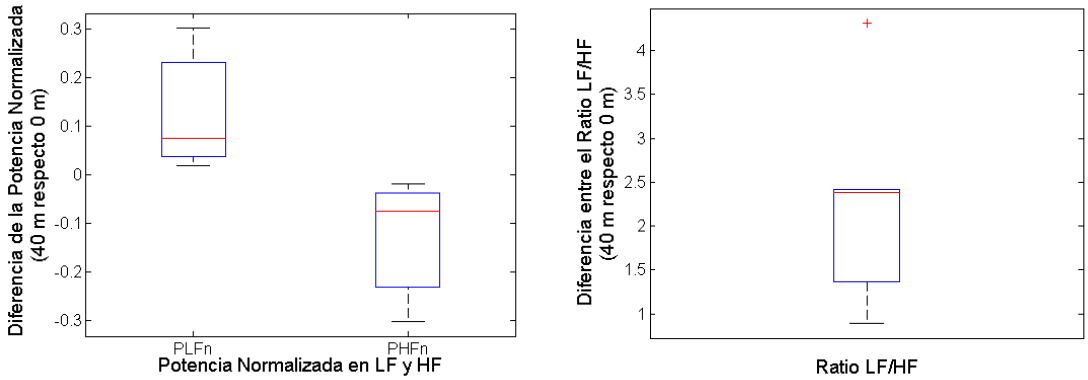


Figura 4. Diferencias entre los resultados obtenidos a 40 metros respecto a los obtenidos 0 m de profundidad: (a) potencias normalizadas de las bandas LF y HF; y (b) ratio de potencias en las bandas LF/HF.

También se puede observar en la figura 4.b, cómo la diferencia en el ratio LF/HF es positiva, siendo este ratio LF/HF mayor a 40m de profundidad para todos los sujetos que a 0m de profundidad. Esta diferencia también es estadísticamente significativa, con un valor p de 0.0050 en la prueba t de Student.

De estos resultados podemos extraer que hay un aumento de la actividad simpática a mayor profundidad, contradiciendo los resultados de Lund *et al*. [9]. Estas diferencias pueden deberse a que ese estudio se realizaba enriqueciendo con oxígeno el aire que respiraban los sujetos y bajando solamente hasta una profundidad de 15m, buscando que los sujetos entren en hiperoxia. En cambio, nuestros resultados se obtienen a mayor profundidad y ventilando a los sujetos con aire, ya que a esas profundidades si se ventila con mayores concentraciones de oxígeno la hiperoxia puede tener consecuencias severas en los sujetos.

6. Conclusiones

El control y monitorización de señales biomédicas durante la inmersión para la identificación de estados psicofisiológicos y neuropsicológicos disfuncionales puede evitar posibles accidentes subacuáticos. En esta comunicación se han presentado los resultados preliminares obtenidos durante el registro de señales biomédicas de buceadores dentro de una cámara hiperbárica en la que se ha simulado la inmersión hasta una profundidad máxima de 40 metros. Se ha observado no sólo el aumento del ritmo cardíaco de los sujetos a una profundidad de 40 metros respecto al ritmo a 0 metros, sino también una mayor actividad de la rama simpática del sistema nervioso autónomo.

En vista de estos buenos resultados obtenidos, que confirman la hipótesis original de modificación del funcionamiento del cuerpo humano con la presión, se pretende profundizar en su estudio con nuevos experimentos y una muestra más amplia de sujetos de experimentación con la idea de que corroboren las conclusiones aquí expuestas y las amplíen, obteniendo al mismo tiempo nuevas líneas de actuación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Centro Universitario de la Defensa a través de los proyectos CUD2013-11 y CUD2013-05: SIRENA, por la Universidad de Zaragoza y el Centro Universitario de la Defensa a través del proyecto UZCUD2014-TEC-03, y por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) a través del proyecto TEC2014-54143-P.

Los autores quieren agradecer al Hospital General de la Defensa de Zaragoza su colaboración y facilidades para el uso de sus instalaciones para el desarrollo el estudio, además de agradecer a su personal toda la ayuda prestada durante el estudio.

Referencias

1. Richardson, D.; Shreeves, K. The PADI Enriched Air Diver course and DSAT oxygen exposure limits. *South Pacific Underwater Medicine Society Journal* **1996**, 26 (3), 198-205.
2. Butler, F.K.; Thalmann, E.D. Central nervous system oxygen toxicity in closed circuit scuba divers II. *Undersea Biomedical Research* **1986**, 13 (2), 193–223.
3. Butler, F.K. Closed-circuit oxygen diving in the U.S. Navy. *Undersea and Hyperbaric Medicine* **2004**, 31(1), 3–20.
4. Lang, M.A. *DAN nitrox workshop proceedings*; Durham, NC: Divers Alert Network, **2001**.
5. Clark, J.M.; Thom, S.R. Oxygen under pressure. In *Bennett and Elliotts' Physiology and Medicine of Diving*, 5th ed.; Brubakk, A.O., Neuman, T.S., Eds.; Saunders, United States, **2003**, 358–418.
6. [Anderson2002] Anderson, J.; Berggren, P.; Grönkvist, M.; Magnusson, S.; Svensson, E. Oxygen saturation and cognitive performance. *Psychopharmacology* **2002**, 16(2), 119-128.
7. Scholey, A.B.; Moss, M.C.; Neave N.; Wesnes, K. Cognitive performance, hyperoxia, and heart rate following oxygen administration in healthy young adults. *Physiology Behavior*, **1999**, 67(5), 783-789.
8. Barbosa, E.; Garcia-Manso, J.M.; Martin-Gonzalez, J.M.; Sarmiento, S.; Calderon, F.J.; Da Silva-Grigoletto, M.E. Effect of Hyperbaric Pressure During Scuba Diving on Autonomic Modulation of the Cardiac Response: Application of the Continuous Wavelet Transform to the Analysis of Heart Rate Variability. *Military Medicine* **2010**, 175(1), 61-64.
9. Lund, V.; Laine, J.; Laitio, T.; Kentala, E.; Jalonen, J.; Scheinin, H. Instantaneous beat-to-beat variability reflects vagal tone during hyperbaric hyperoxia. *Undersea & Hyperbaric Medicine* **2003**, 30 (1), 29-36.
10. Task Force. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal* **1996**, 17, 354–381.
11. Orini, M.; Bailón R.; Enk R.; Koelsch S.; Mainardi L.; Laguna P. A method for continuously assessing the autonomic response to music-induced emotions through HRV analysis. *Medical and Bilogical Engineering and Computing* **2010**, 48, 423–433.
12. Peláez-Coca, M.D.; Orini M.; Lázaro, J.; Bailón, R.; Gil E. Cross Time-Frequency Analysis for combining information of several sources: Application to estimation of Spontaneous Respiratory

Rate from Photoplethysmography. *Computational and Mathematical Methods in Medicine* **2013**, vol. 2013, Article ID 631978, 8 pages.

13. Vicente, J.; Laguna, P.; Bartra, A.; Bailón, R. Detection of Driver's Drowsiness by Means of HRV Analysis. *XXXVIII International Conference on Computing in Cardiology* **2011**, Hangzhou (China), 89-92.
14. Ministerio de Fomento, Resolución de 20 de enero de 1999, de la Dirección General de la Marina Mercante, por la que se actualizan determinadas tablas de la Orden de 14 de octubre de 1997 por la que se aprueban las normas de seguridad para el ejercicio de actividades subacuáticas. BOE-A-1999-4137.
15. Gil, E.; Orini, M.; Bailón, R.; Vergara, J.M.; Mainardi, L.; Laguna, P. Photoplethysmography pulse rate variability as a surrogate measurement of heart rate variability during non-stationary conditions. *Physiological Measurement* **2010**, 31, 1271-1290.

Calidad de transmisión de vídeo en redes de comunicaciones submarinas

Moreno-Roldán, José .M. [1,*], Luque-Nieto, Miguel A. [1], Poncela, Javier[1], Otero, Pablo [1] y Díaz-del-Río, Víctor [2]

[1] Universidad de Málaga, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación. Email: jmmroldan@uma.es (J.M.M), luquen@uma.es (M.A.L), jponcela@uma.es (J.P), pablo.otero@uma.es (P.O.)

[2] Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Málaga; Email: diazdelrio@ma.ieo.es,

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: jmmroldan@uma.es (J.M.M)

Abstract: La adquisición de imágenes submarinas plantea en la actualidad importantes dificultades especialmente en términos de coste y/o retardo en la disponibilidad de la información. Las transmisiones de vídeo a través de redes submarinas permitirían reducir de manera notable ambos problemas, sin embargo, la tecnología existente para el despliegue de este tipo de redes está basada en módems acústicos que poseen capacidades de transmisión muy limitadas debidas a las adversas características de propagación del entorno submarino. El estudio de la calidad alcanzable en esas condiciones es un aspecto clave en el análisis de estos servicios de vídeo pues permite evaluar su viabilidad y establecer una relación entre las aplicaciones y los recursos de red necesarios para su ejecución.

Keywords: video quality; MOS; monitoring, underwater networks.

---

1. Introducción

La medida habitual de calidad para un servicio prestado sobre una red de comunicaciones es la Mean Opinion Score (MOS), es decir, la puntuación media que un grupo lo suficientemente representativo de usuarios emite sobre ese servicio. A pesar de la naturaleza inherentemente subjetiva de esta medida y debido al coste que conlleva este tipo de experimentos (especialmente en tiempo y evaluadores), se han propuesto diferentes modelos matemáticos que permiten obtener valores de MOS

a partir de métodos objetivos. La International Telecommunication Union (ITU) clasifica estos métodos en tres grupos según la entrada que recibe el modelo para calcular la MOS:

- Métodos intrusivos son los que necesitan la señal transmitida y la recibida para la estimación.
- Métodos no intrusivos son los que sólo necesitan la señal recibida para la estimación.
- Métodos de planificación son los que no necesitan de una transmisión real para la estimación sino que utilizan parámetros de la red y el servicio para calcular la MOS.

Los métodos paramétricos no necesitan de una transmisión a través de la red, ni siquiera de una simulación lo que supone una ventaja cuando se trata de redes que no están todavía desplegadas o no se encuentran disponibles para este tipo de pruebas como es el caso de las actuales redes submarinas.

En la bibliografía es posible encontrar diversos modelos paramétricos de estimación de calidad de vídeo ([1], [2], [3]) cada uno de los cuales tiene en cuenta un subconjunto diferente de variables del servicio (tasa binaria, tasa de cuadro, resolución, pérdidas, contenido) y realiza el ajuste con diferentes intervalos de esas variables. La propuesta de Yamagashi et al. [1] ha sido estandarizada por la ITU en la recomendación ITU-T G.1070 [4] por lo que ha sido elegida como referencia en este trabajo, que analiza los resultados de dicho modelo para calidad de vídeo cuando se aplican las condiciones existentes en redes submarinas. Aunque el modelo tiene como objetivo servicios de videoconferencia, su utilización se ha extendido a otras aplicaciones al ser el único normalizado disponible.

Para contrastar la validez de un modelo, son necesarios datos subjetivos de calidad de servicio, es decir, valores experimentales, no estimados como los presentados en ([5], [6]). Estos estudios, sin embargo, toman como referencia entornos de servicio diferentes del submarino y los valores de los parámetros con los que trabajan no coinciden con los que aquí resultan de interés. Por ello, en este artículo se comparan los resultados obtenidos con el modelo ITU frente a valores subjetivos de MOS procedentes de un experimento, diseñado específicamente y realizado en colaboración con un grupo de científicos del entorno marino, y se exponen las conclusiones extraídas.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. El Modelo paramétrico ITU de calidad de vídeo

Existe un estándar ITU [4] que propone dos modelos paramétricos para calidad de servicio de audio y vídeo, de manera independiente, y un tercer modelo que combina la interacción de ambos. El modelo para vídeo está formado por varias ecuaciones que toman como variables de entrada la tasa binaria del vídeo en el nivel de aplicación, el número de imágenes por segundo y la pérdida de paquetes IP extremo a extremo. Además, las ecuaciones deben ajustarse con un conjunto de coeficientes según otros parámetros del servicio: el códec de compresión de vídeo, la resolución y el tamaño de visualización. Sin embargo, la documentación sólo proporciona cinco conjuntos de coeficientes en un apéndice no normativo y tres de ellos imponen como restricción una tasa binaria mínima considerablemente mayor a lo que la tecnología actual permite. Por tanto, el uso del modelo se restringe a resoluciones QVGA (320x240 pixels) con tamaño de visualización de 4.2'' y QQVGA (160x120 pixels) con tamaño de visualización de 2.1'' con compresión MPEG-4 en ambos casos. Cualquier variación de estas condiciones requiere la obtención de un nuevo juego de coeficientes a partir de datos subjetivos mediante un ajuste de mínimos cuadrados. Para el análisis de este modelo, se

escrito una implementación con el software MATLAB que permite obtener las curvas que se discuten en el apartado 3 de este artículo.

En el plano teórico el modelo presenta algunos problemas que se exponen en los siguientes subapartados.

2.1.1. Tasa de cuadros óptima.

Uno de los valores intermedios calculados en la estimación de la MOS es la tasa de cuadros óptima (Ofr), es decir, el número de imágenes por segundo que optimiza la calidad percibida. Este parámetro se define como una recta dependiente de la tasa binaria (1).

$$O_{fr} = v_1 + v_2 \cdot B_r \quad (1)$$

Para el caso QVGA, el valor de este coeficiente establece el límite inferior de esta tasa de cuadros en 1.431 fps. Por tanto, independientemente de lo baja que sea la tasa de datos, la calidad no puede mejorarse reduciendo la tasa de cuadros por debajo de esa cantidad. Esto puede ser cierto para un determinado rango de tasas binarias, pero no parece razonable cuando estamos en los valores extremadamente bajos a los que nos obligan las comunicaciones submarinas.

2.1.2. Contexto de servicio.

Algunos de los factores que afectan a la calidad percibida no están relacionados con parámetros de red o de aplicación sino con el contexto de prestación del servicio. Uno de estos factores es el contenido del vídeo que puede tener un gran impacto en el rendimiento del compresor. Éste aprovecha las similitudes intra-cuadro e inter-cuadros de modo que imágenes muy complejas o secuencias con mucho movimiento necesitan una mayor tasa binaria para mantener la calidad. El modelo ITU está orientado a videoconferencia, un servicio notablemente distinto de la monitorización y exploración de áreas submarinas por lo que las imágenes que lo caracterizan pueden diferir de forma suficiente como para afectar la valoración de la calidad.

Otro de los factores obviados por el modelo es la expectativa del usuario. Esta expectativa puede incluir elementos como su experiencia previa en otros servicios similares o condiciones especiales de prestación del servicio. Por ejemplo, el modelo paramétrico propuesto para audio en telefonía [7] modifica la calidad obtenida de los parámetros puramente objetivos con un "factor de ventaja" en función de la facilidad de acceso del servicio (línea cableada, movilidad, acceso a localizaciones remotas mediante satélite). Considerando las actuales condiciones de obtención de imágenes submarinas, es posible que los potenciales usuarios de un servicio de vídeo desplacen sus opiniones positivamente si las imágenes se obtienen en tiempo real o reducido retardo pero con un coste muy inferior a los sistemas actuales.

2.2. Medidas de calidad subjetiva

La única manera de contrastar hasta qué punto los inconvenientes del modelo suponen una desviación significativa de la MOS es obtener valores subjetivos de calidad de vídeo en condiciones análogas a las de prestación del servicio. La metodología para este tipo de medidas está estandarizada

por ITU en dos recomendaciones ([8], [9]) que describen en detalle aspectos como la señal fuente, la caracterización de las escenas, varios procedimientos de evaluación y los informes de resultados.

Para la realización de estas pruebas, se ha contado con la colaboración del Centro Oceanográfico de Málaga del Instituto Español de Oceanografía (IEO) que ha cedido varias horas de metraje submarino procedentes del proyecto "Life+Indemares – Chimeneas de Cádiz" [10]. El material ha sido grabado con los equipos ROV Liropus 2000 y VOR Aphia, este último desarrollado por el grupo GEMAR del IEO. Un grupo seleccionado de científicos del centro han participado como evaluadores de calidad.

A partir de los archivos de vídeo, se ha construido una base de datos de escenas breves (12 segundos de duración) codificadas con H.264 y diferentes tasas de bit, tasas de cuadro, resoluciones y modos de color. La tabla 1 recoge las configuraciones utilizadas. Estos parámetros se han elegido de acuerdo con las posibilidades de transmisión de las redes actuales. Las restricciones en la tasa binaria impuestas por la tecnología impiden utilizar tasas de cuadro regulares (25 – 30 fps) y resoluciones medias o altas (VGA o superiores). La figura 1 contiene ejemplos representativos del tipo de imágenes incluidas en el test. El tamaño de visualización de estas imágenes es de 6,65x5 cm.

Parámetro	**Valores**
Tasa binaria	8, 14, 20 kbps
Tasa de cuadro	1, 5, 10 fps
Resolución	320x240, 160x120 px
Modo de color	RGB (8 bits / canal), escala de grises (8 bits)

Tabla 1. Parámetros de configuración de las escenas.

A pesar de la gran cantidad de muestras en la base de datos, el diseño experimental debe considerar un tiempo ajustado por evaluador por lo que la prueba cuenta con un total de 26 condiciones de evaluación organizadas en bloques en cada uno de los cuales se considera la variación de una pareja de parámetros. La asignación de escenas a cada condición se ha realizado de forma aleatoria y también aleatorio es el orden de presentación de condiciones a cada evaluador de modo que este orden no tenga un impacto apreciable en las opiniones emitidas.

3. Resultados y Discusión

En esta sección se exponen y discuten, en primer lugar, los resultados obtenidos de aplicar el modelo ITU de estimación paramétrica de calidad de video. Posteriormente, se muestra un primer análisis de los resultados de las pruebas subjetivas de calidad. Tanto en un caso como en otro la escala de calidad tiene cinco grados que corresponden con las categorías cualitativas mala (1), pobre (2), moderada (3), buena (4) y excelente (5). Para facilitar el procesado, estas categorías suelen mapearse con los valores indicados entre paréntesis.

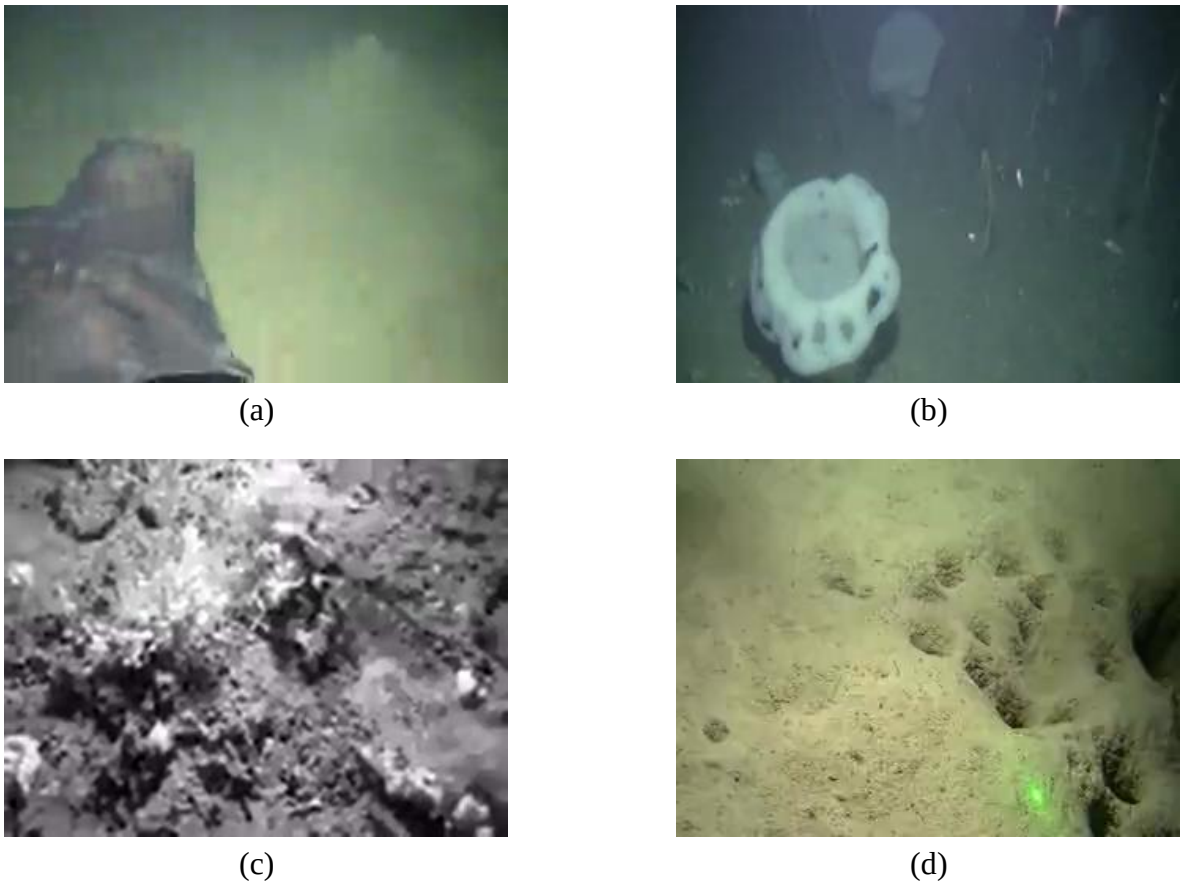


Figura 1. Cuadros representativos de algunas configuraciones. (a) 320x240 px, 8 kbps, 10 fps, RGB. (b) 320x240 px, 14 kbps, 1 fps, RGB. (c) 160x120 px, 20 kbps, 5 fps, escala de grises. (d) 320x240 px, 20 kbps, 1 fps, RGB.

3.1. Estimación de calidad de vídeo G.1070

La figura 2 muestra los valores estimados por el modelo paramétrico utilizando condiciones similares a las del test subjetivo. Los coeficientes seleccionados corresponden a resolución QVGA con tamaño de visualización 4.2'' y compresión MPEG-4. Puede observarse como la calidad decrece al aumentar la tasa de cuadros, es decir, la fluidez del vídeo. Esto se debe a que la tasa binaria disponible, debe repartirse entre todas las imágenes de ese intervalo temporal. Cuando dicha tasa es tan reducida, la calidad de cada cuadro se degrada hasta el punto de que la calidad percibida es mayor cuando hay pocos cuadros de mayor nitidez que cuando hay más fluidez, pero el contenido de cada imagen es difícil de distinguir. En cualquier caso, los valores de calidad estimados son muy bajos si los consideramos dentro del rango posible. En el mejor de los casos (20 kbps, 2 fps) se alcanza una MOS de 1.265, poco por encima de la mínima valoración.

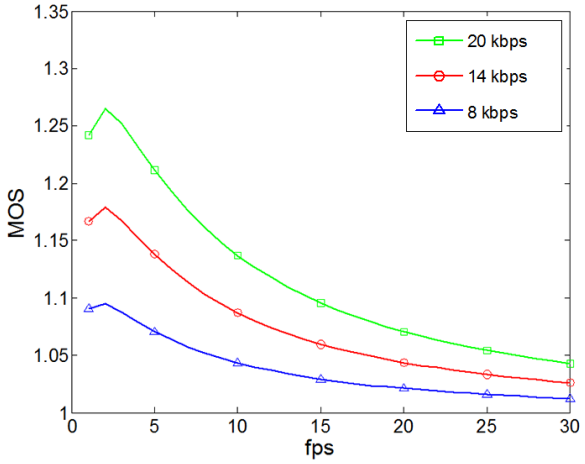


Figura 2. Curvas de MOS frente a tasa de cuadro (*frames per second)*. Modelo G.1070

3.2. Pruebas subjetivas

Las MOS calculadas a partir de los test subjetivos se muestran en la figura 3. Cada punto de las curvas es la opinión media global para dos repeticiones de las mismas condiciones de tasa de cuadro y tasa binaria por usuario y para todos los usuarios participantes en la prueba. La preferencia de los evaluadores muestra en general la misma monotonía decreciente con la tasa de cuadro, es decir, valoran mejor un vídeo menos fluido donde la calidad de cada cuadro es mayor. Sin embargo, hay una diferencia substancial en cuanto a la situación de estos valores en la escala global: las escenas a 1 cuadro por segundo se evalúan con una calidad media superior a *moderada* para cualquiera de las tasas binarias en la prueba, con el valor para 14 kbps cercano a la categoría *buena*. Aunque para el vídeo a 8 kbps la calidad decrece muy rápidamente al pasar a 5 fps, para 14 y 20 kbps se mantiene en el entorno del tercer nivel.

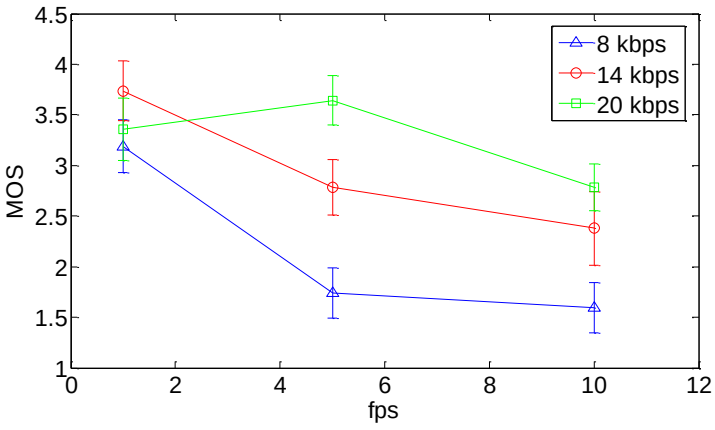


Figura 3. Curvas de MOS frente a tasa de cuadro (*frames per second)*. Datos subjetivos experimentales.

4. Conclusiones

La transmisión de vídeo en las actuales redes de comunicaciones submarinas supone un reto importante debido a las restricciones de la tecnología. El estudio de la viabilidad de este tipo servicios

pasa por una estimación de la calidad que es posible conseguir en ese entorno de capacidad limitada. En esta comunicación se evalúa el modelo paramétrico de estimación de calidad propuesto por la ITU y los problemas que presenta. Para contrastar su validez se ha realizado una prueba en la que potenciales usuarios de este servicio han proporcionado datos directos de calidad subjetiva. La comparación de ambos muestra que, aunque la tendencia de las curvas de MOS es similar, la valoración de los usuarios en términos absolutos es mucho mayor que la estimada por el modelo. Un análisis más profundo y la realización de nuevas pruebas subjetivas, permitirá determinar si el modelo puede seguir siendo válido con variaciones que corrijan los problemas detectados o si será necesario desarrollar un nuevo modelo para este tipo de entornos.

Agradecimientos

Al Capitán y tripulación del B/O Ramón Margalef del Instituto Español de Oceanografía, a bordo del cual se obtuvieron las imágenes utilizadas en este estudio. A los miembros del Grupo de Investigación Indemares/Chica que participaron en la campaña oceanográfica y a todos los científicos del Centro Oceanográfico de Málaga que participaron en el experimento de evaluación de calidad.

Este trabajo ha sido financiado con la ayuda de la Universidad de Málaga. Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech.

Referencias

1. Yamagishi, K. and Hayashi, T., "Video-Quality Planning Model for Videophone Services". *ITE*, Vol. 62, No. 7, 2008.
2. A. Raake, M. N. Garcia, S. Moller, J. Berger, F. Kling, P. List, and J.H. Johann, "T-V-model: Parameter-based prediction of IPTV quality," *IEEE ICASSP*, 2008.
3. A. Khan, L. Sun, and E. Ifeachor, "QoE prediction model and its application in video quality adaptation over UMTS networks," *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 14, no. 2, 2012, pp. 431–442.
4. Opinion model for video-telephony applications. *ITU-T Recommendation G.1070*, 2012
5. De Simone, Francesca et al. Subjective Quality Assessment of H.264/AVC Video Streaming with Packet Losses. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2011.
6. Tulu, Bengisu; Chatterjee, Samir. Internet-based telemedicine: an empirical investigation of objective and subjective video quality. *Decision Support System*, 2007.
7. The E-model: a computational model for use in transmission planning, *ITU-T Recommendation G.107*, 2014.
8. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures. *ITU-R Recommendation BT.500-13*, 2012.
9. Subjective video quality assessment methods for multimedia applications. *ITU-T Recommendation P.910*, 2008.
10. Díaz del Río, V. et al. Volcanes de Fango del Golfo de Cádiz. *Proyecto LIFE+INDEMARES*. Ed. Fundación Biodiversidad. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, España, 2014; pp.130

La detección de matrículas en Android.

Valderas Mayorga, Manuel

Tte. Guardia Civil. DNI: 49090059-D. Email: manuvalderas@gmail.com

---

Abstract El presente documento recoge las conclusiones e impresiones de un trabajo de fin de grado realizado por Manuel Valderas Mayorga sobre la detección de matrículas en Android. Se pretende mostrar las posibilidades que existen actualmente en cuanto a la detección de caracteres alfanuméricos mediante dispositivos que utilizan Android, ya sean teléfonos móviles, tablets… Para ello se mostrarán todos aquellos aspectos que intervienen en la detección, como son los sistemas de detección de matrículas, los motores OCR, así como la implementación de las mismas en los dispositivos Android.

Keywords: ANPR, OCR, NDK, SDK, Android, matrícula, caracteres, Tesseract, smartphone, aplicación.

---

1. Introducción

El mundo de los dispositivos móviles ha avanzado mucho en los últimos años. El sistema operativo Android ha tenido un gran papel en esta evolución, aportando funciones nunca antes vistas. El reducido tamaño de estos dispositivos permite al usuario llevarlos a cualquier lado, y sus múltiples aplicaciones hacen de estos aparatos una herramienta casi fundamental en el día a día de cualquier persona. La conexión a Internet, y elementos tales como la cámara de fotos y el GPS demuestran que estos aparatos ya no son solo teléfonos, sino pequeños ordenadores[1].

La implicación que tiene la telefonía móvil en la actualidad ha sobrepasado todas las expectativas, y se ha establecido en las vidas de los usuarios; incluso hablar hoy de teléfono podría resultar anacrónico. El sistema Android, uno de los grandes protagonistas en el mundo de los *smartphones*, no solo limita su ámbito a los teléfonos móviles, sino que cada vez más otros dispositivos electrónicos lo utilizan, gracias en parte a la naturaleza *open source* del sistema, que posibilita su uso sin tener que abonar pagos adicionales. Esto ha permitido que se extienda en un tiempo récord.

Las capacidades de estos pequeños ordenadores han hecho posible que surjan una serie de utilidades que transcienden el uso del dispositivo como un teléfono, permitiendo el desarrollo de aplicaciones muy complejas. La detección de huellas dactilares, el uso de dispositivos ópticos para reconocer caracteres alfanuméricos y detección facial, ponen en relieve que estos aparatos van a constituir la verdadera revolución tecnológica en los próximos años, si no lo son ya[2].

La digitalización de caracteres alfanuméricos se ha convertido en un asunto de gran interés en la sociedad actual. Por lo que respecta a textos, se generan grandes cantidades de volúmenes tanto tipográficos como manuscritos, especialmente en papel, soporte muy adecuado para poder ser digitalizado. Así, automatizar la introducción de caracteres al sistema evitando la entrada por teclado, implica un gran ahorro de trabajo, así como una ventaja a la hora de clasificar información, como en el caso de los detectores automáticos de matrículas (ANPR en inglés). Estos dispositivos utilizan software basado en detección óptica de caracteres (OCR en inglés) para detectar estos últimos en una imagen, dando como salida una matrícula comprensible para el sistema[3].

Los sistemas OCR llegan hoy día tanto a empresas relacionadas con la gestión documental, como a la Administración Pública, debido a la gran versatilidad.

Sin embargo, la tecnología de captación no solo se limita a esto, si no que se abre un gran abanico de posibilidades, como la detección de personas peligrosas mediante rasgos faciales. Como se puede observar, las posibilidades para los cuerpos policiales y defensa son numerosas.

Los dispositivos de captación de imágenes que incorporan los nuevos dispositivos Android hacen posible que se tomen imágenes con gran cantidad de detalles, lo que aumenta en gran medida las posibilidades de edición de las imágenes. Sin embargo, a la hora de llevar a cabo un reconocimiento de caracteres, como en el caso de las matrículas, puede ser perjudicial tal cantidad de información, ya que a mayor número de píxeles a tratar, mayor carga de procesamiento será necesaria y por ende, mayor coste computacional. Es cierto que los nuevos dispositivos están incorporando procesadores que se asemejan a los que hace pocos años incorporaban los ordenadores portátiles, por lo que esto está empezando a dejar de ser un problema. Pero también es

cierto que cuando se trata de obtener los caracteres de una matrícula, lo que se requiere es rapidez, por lo hay que encontrar un equilibrio entre la cantidad de detalle de la imagen (ya sea vídeo o fotografía) y la rapidez que se necesite.

2. La detección automática de matrículas (ANPR)

Un sistema ANPR está formado por un software y hardware específicos, con el fin de procesar señales en forma de imágenes, y detectar los caracteres de la matrícula objetivo[4].

Un ANPR se compone normalmente de cuatro partes:

1) Una cámara capaz de capturar imágenes.
2) Un dispositivo con capacidad de procesamiento.
3) Un software basado en tecnología OCR.
4) Una conexión a Internet para gestionar las matrículas y trabajar con servidores externos.

2.1 La detección de las matrículas en un sistema ANPR

En general, el proceso de reconocimiento óptico de caracteres cuenta con las siguientes fases[5]:

1) Escaneo óptico.
2) Localización y segmentación.
3) Pre-procesamiento.
4) Extracción de características.
5) Reconocimiento y Procesamiento.

En la figura se muestra este proceso:



Figura 1. Fases en el reconocimiento de matrículas

La parte de software se basa principalmente en algoritmos que siguen patrones para detectar, por ejemplo, el rectángulo de una matrícula, o si un carácter es un número o una letra. Estos últimos son los llamados OCR (*Optical Character Recognition*).

Estos sistemas se encargan de llevar a cabo la detección de los caracteres que aparecen en la imagen o vídeo. Así, es una tecnología que trata de emular la capacidad del ojo humano para reconocer formas y objetos. Consigue que esos caracteres sean comprensibles por un ordenador, normalmente dando como resultado final un archivo de texto editable. Para detectar los caracteres, el software realiza un barrido de la imagen píxel a píxel buscando formas que coincidan con los rasgos de los caracteres [6].

Los OCR presentan varios problemas que hacen que detectar los caracteres sea complejo. Así, la climatología, la cantidad de luz y la condición de la matrícula hacen que este sistema no sea siempre infalible. Una ayuda para solucionar estos problemas se encuentra en el proyecto *Open CV*; no es exactamente un software de detección de caracteres, sino que es una librería para el tratamiento digital de imágenes, que puede permitir la creación de un OCR, o tratar imágenes antes del procesado OCR[7].

Hay casos en los que el sistema detecta caracteres que no están presentes en la librería con la que trabaja por defecto; son caracteres especiales, y requieren de un "entrenamiento" previo del sistema, para que dicho elemento se incluya en la librería y el software pueda detectarlo en el futuro[8].

2.2 Uso y limitaciones de los sistemas ANPR

Los sistemas ANPR son usados en el control de peajes, zonas de estacionamiento de vehículos, detección de velocidad, aduanas, control del tráfico en puentes, entre otros usos; Estos sistemas también son utilizados por las fuerzas policiales, así como empresas de seguridad, para procesar las matrículas y obtener datos relevantes tanto del conductor como del vehículo[9].

El uso en vehículos policiales es complejo, ya que es complicado posicionar el vehículo, obtener una buena imagen de la matrícula del coche objetivo, procesar dicha imagen, y obtener información a través de bases de datos externas a través de Internet, con el problema añadido de la cobertura de red[10]. En estas situaciones se necesita rapidez normalmente, y no se siempre se está en condiciones de tomar buenas imágenes y que la cobertura de red esté operativa.

3. La implementación en dispositivos Android

Los dispositivos móviles basados en Android disponen de todo lo necesario para convertirse en un ANPR. Así, la parte de hardware necesaria estaría formada por un sistema de captación de imágenes, siendo la cámara del dispositivo la encargada de

realizar dicha función; una unidad de procesamiento de imágenes, en este caso los modernos procesadores que incluyen estos aparatos pueden realizar esta función sin problemas; una unidad de transmisión y un sistema de almacenamiento.

La tecnología OCR ha avanzado mucho, y hoy día se puede implementar incluso en dispositivos móviles. Hay multitud de librerías de detección. Así, existen GOCR, Java OCR, Ocrad, Tesseract… Estas librerías están constituidas por algoritmos que se encargan de detectar los caracteres presentes en la imagen. En este estudio se ha utilizado la librería Tesseract, que es *open source*, desarrollado en sus primeras etapas por HP, para ser posteriormente comprado y explotado por Google.

La librería Tesseract, combinada con la librería de procesamiento de imágenes Leptónica, es una de las mejores que se puede encontrar en Internet de forma gratuita. Esta librería se crea en 1995 por la empresa HP. Entre 1995 y 2006 no tuvo un gran desarrollo; sin embargo, estos últimos años ha sido bastante desarrollada por Google, incrementando notablemente su precisión y su capacidad[11].

3.1. La utilización de la librería Tesseract

La librería Tesseract se encuentra escrita en lenguaje de programación C. Esto crea un conflicto a priori debido a que Android está desarrollado en Java[1]. Por tanto, antes de poder ser utilizada, hay que convertir dicha librería a lenguaje comprensible para Android. Esto se consigue con una herramienta llamada *Native Development Kit* (NDK). Tras realizar la conversión, se obtiene una librería que es totalmente utilizable en lenguaje de programación de Android.

Es importante comentar que esta librería funciona bajo la versión Android 2.2 o superior, por lo que versiones inferiores a esta darán como resultado un error en la compilación del programa.

3.2. Aplicación de detección de matrículas

Una vez la librería está en lenguaje Java, se puede crear una aplicación que sea capaz de utilizarla. Para ello se necesita un entorno de programación de Android, también llamado SDK (Source Development Kit), e importar la librería Tesseract a un proyecto nuevo[2], en el que se creará la aplicación.

[1]Android utiliza una versión modificada de Java, principalmente para poder explotar características como la cámara, las aplicaciones, los menús…

[2] Un proyecto Android contiene todos los archivos que componen una aplicación.

A partir de aquí, se puede escribir un código que pueda utilizar la librería [12]; para este estudio se ha optado por una aplicación sencilla llamada *matrícula*, que tiene *dos activity*[3] como se muestra a continuación:

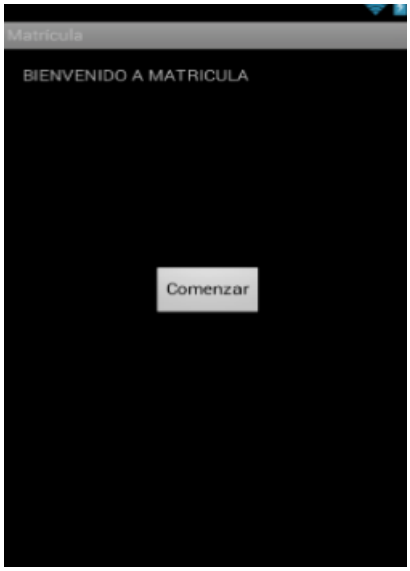


Figura 2. Primer *activity*

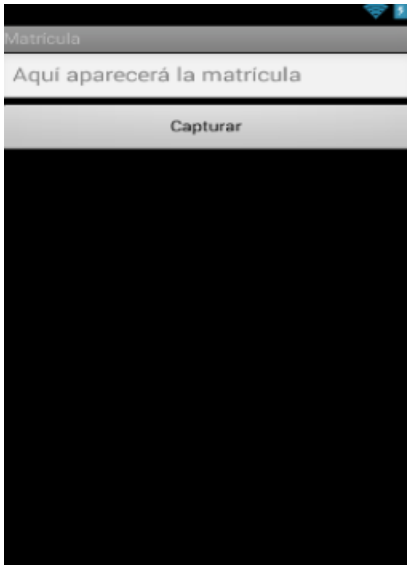


Figura 3. Segundo *activity*

El primer *activity* sirve para introducir la aplicación, y consta de un texto y un botón para comenzar a utilizarla. El segundo *activity* muestra un cuadro de texto donde aparecerán los caracteres de la matrícula capturada, y un botón con el que poder lanzar la aplicación de la cámara. Es importante que los caracteres de la matrícula se vean bien y que no haya aberraciones, es decir, lo mejor es tomar fotografías desde una vista cenital.

Es una aplicación sencilla, pero muestra cómo se puede utilizar una librería *open source*, como es Tesseract, en dispositivos Android.

4. Conclusiones

El gran auge de los dispositivos móviles y su rápida evolución han propiciado la era de la información, donde todo y todos están comunicados. Sin embargo, referirse a estos dispositivos como meros aparatos que sirven solo para llamar es tener una visión muy limitada, ya que pueden competir hoy día con cualquier ordenar personal.

Los dispositivos móviles son capaces de procesar grandes cantidades de información, lo que hace posible que cada vez más se puedan ver aplicaciones y programas más complejos. En el caso de la detección de matrículas, estos dispositivos

[3] El *activity* es un componente de cualquier aplicación, ofreciendo una pantalla con la que el usuario puede interactuar, como tomar una foto o llamar.

son capaces de trabajar con eficacia, gracias a los dispositivos ópticos que integran y a los procesadores que incorporan.

El carácter *open source* del sistema operativo ha provocado que muchos fabricantes se interesen en él, ya que tienen la posibilidad de añadir o quitar ciertos componentes del mismo. Esto hace también que las posibilidades de desarrollo para estos sistemas sean prácticamente infinitas, ya que cualquiera con unos conocimientos básico puede empezar a programar.

El desarrollo de esta aplicación se ha basado en la investigación de la librería OCR Tesseract, la cual se encarga de implementar los algoritmos necesarios para la detección de los mismos. La aplicación que se ha mostrado en el documento es básica, ya que permite reconocer los caracteres de la matrícula, pero no detecta el rectángulo de la matrícula, lo que supondría un ahorro en el coste computacional, ya que al detectar dicho rectángulo, solo habría que inspeccionar esa porción de imagen.

Partiendo de las características iniciales de la aplicación, se pueden añadir muchas mejoras a la aplicación, como conexiones a servidores externos, detección de matrículas en vídeo…

Agradecimientos

Agradezco a todos los que siempre me han apoyado en todo lo que he hecho, en especial a mi familia y amigos.

Agradecer al Teniente Coronel Moure y al Teniente Coronel Del Moral por apoyarme esta magnífica oportunidad.

Referencias

1. TOMÁS GIRONES, J. Capítulo 1: Visión general y entorno de desarrollo. In *El gran libro de Android*, 3rd, Editor Marcombo S.A, Gran vía de les Corts Catalanes, Spain, 2011; pp. 21-26.

2. VALDERAS MAYORGA, M. Conclusiones. In *Trabajo de fin de grado: la detección de matrículas en Android,* 1st ed. Editor Academia de Oficiales de la Guardia Civil, C/ Princesa s/n, Spain, 2014; pp. 57-60.

3. ARLANDIS NAVARRO, J. OCR: sistemas de reconocimiento óptico de caracteres. *Revista del Instituto Tecnológico de Informática. 08-09.*

4. CEBALLOS JIMÉNEZ, S. E. Reconocimiento Automático de Matrículas (ANPR). In *Proyecto fin de carrera: identificación y reconocimiento de matrículas de automóviles con Matlab*, 1st ed. Editor: Universidad Politécnica de Madrid, C/ Ramiro de Maeztu, 7, Spain; pp 29-36.

5. Capra, J.; Capra, B.; Aciti, C.; Marone, J. Implementación del reconocedor. In *Una aplicación móvil para el reconocimiento automático de matrículas de automóviles argentinos*. 1st ed. Editor Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Gral. Pinto 339, B7000GHG Tandil, Argentina; pp. 3-4.

6. KULTURA 2.0. *Tecnología para el reconocimiento óptico de caracteres*, 2011. Recuperado de: http://www.kultura.ejgv.euskadi.eus/r46-19123/es/contenidos/informacion/kultura2_0_prestakuntza/es_k20_form/adjuntos/pildora-OCR-2.pdf.

7. NAVARRO SANTAPAU, J. Capítulo. In *Trabajo Final de Máster: software de adquisición de imágenes y reconocimiento óptico de caracteres para Android,* 1st ed. Editor Universitat Oberta de Catalunya, Rambla del Poblenu, Spain 2013; pp26-27.

8. Library Illinois. *5.0 best practices for optical character recognition*, 2010. Recuperado de: http://www.library.illinois.edu/dcc/bestpractices/chapter_05_ocr.html

9. ANPR ltd. *What is an ANPR?* 2015. Recuperado de: http://www.anpr-ltd.com/what-is-anpr.php.

10. MITCHELL, S. *Number plate recognition: the technology behind the rhetoric*, 2013. Recuperado de: http://theconversation.com/number-plate-recognition-the-technology-behind-the-rhetoric-17572.

11. TESSERACT-OCR. *An OCR Engine that was developed at HP Labs between 1985 and 1995… and now Google,* 2014. Recuperado de https://code.google.com/p/tesseract-ocr/

12. GAUT. *Making a simple OCR Android app using Tesseract*, 2011. Recuperado de: http://gaut.am/making-an-ocr-android-app-using-tesseract/

Fotónica y Defensa en el Año de la Luz

González Marcos, Ana Pilar[1,*], Campoy Fernández, Jesús[2], Alaíz Gudín, Antonio Mª [1], Pacheco Ordóñez, Fernando[2] y de Pedro Carracedo, Javier[3]

[1] Universidad Politécnica de Madrid. Emails: am.alaiz@alumnos.upm.es (AMAG)
[2] Ejército de Tierra. Parque y Centro de Mantenimiento de Sistemas Antiaéreos, Costa y Misiles. Emails: jcamfe5@et.mde.es (JCF), fpacord@et.mde.es (FPO)
[3] Universidad de Alcalá. Email: javier.depedro@uah.es (JDPC)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: anapilar.gonzalez@upm.es (APGM);

Abstract: Es innegable que el siglo XXI se caracteriza por el desarrollo de la tecnología fotónica. La viabilidad de controlar las fuentes fotónicas, la comprensión de cómo se propaga e interacciona la radiación con el medio y la capacidad de detectar fotones ofrece una gama de posibilidades de aplicación tan amplia que podemos considerar que aún nos quedan muchas por descubrir. Por otro lado, el año 2015 ha sido proclamado el Año de la Luz debido a su coincidencia con los aniversarios de una serie de hitos importantes en la historia de la ciencia de la luz; entre ellos, la posibilidad de su transmisión en guía ondas que Kao publicó hace 50 años. Es curioso constatar que la celebración del primer congreso DESEi+d el 6 y 7 de noviembre coincidía con la fecha de nacimiento de cinco premios nobeles, y que uno de ellos, el físico indio Raman, dé nombre a un efecto fotónico de numerosas aplicaciones. En este artículo se revisan las aplicaciones más conocidas de la Fotónica en el entorno militar de Defensa y Seguridad haciendo hincapié en las relacionadas con los trabajos previos de los autores.

Keywords: fotónica; biofotónica; sensores fotónicos; redes de comunicaciones ópticas

---

1. Introducción

El desarrollo de la tecnología fotónica, al igual que ocurrió con la tecnología electrónica, debe su auge a la fabricación de dispositivos y sistemas integrados que permiten disminuir en tamaño y coste los equipos de aplicación de estas tecnologías. De ahí que el desarrollo de los sistemas microelectromecánicos *Micro Electro Mechanical Systems* - MEMS), los nanoelectromecánicos (*Nano*

Electro Mechanical Systems - NEMS), los circuitos de guiaondas planas (*Planar Lightwave Circuits* - PLC), los circuitos fotónicos integrados (*Photonic Integrated Circuit* - PIC) y el estudio de nuevos materiales (v.g. cristales fotónicos) con aplicaciones de micro y nanofotónica, así como la fotónica en silicio, constituyen la base de la gran mayoría de las técnicas de la Fotónica. Por ello en octubre del 2014 el Departamento de Defensa –DoD- de EE. UU. aprobó la creación de un instituto para la fabricación de fotónica integrada *Integrated Photonics Institute for Manufacturing Innovation (IP-IMI)*. En este artículo no haremos referencia a estas tecnologías de fabricación indispensables, sólo a algunas de sus aplicaciones. Antes de comenzar con las mismas, parece oportuno definir qué entendemos por Fotónica.

El nombre de fotónica proviene de la palabra fotón –mínimo cuanto de energía que puede medirse de una radiación electromagnética, E=hν–; la primera radiación claramente identificada fue la que cubre el visible (400-700nm) y por tanto la óptica ha hecho siempre referencia a esa zona del espectro. Entre 700nm y 1mm siempre se ha definido el infrarrojo pero, actualmente, la zona cercana a microondas de 0,1THz a 10THz se conoce como radiación de Terahertz, T-luz. La Fotónica se conoce como la ciencia de la luz. Pero, ¿qué entendemos por luz? Encontramos diferentes definiciones, algunas cubren todo el rango representado en la figura 1. Para nosotros es más preciso considerar la Fotónica, tal y como se usa en el campo de la Biofotónica o de la Fotobiología, con referencia a las radiaciones del espectro electromagnético (EM) cuya interacción con el medio no produce daño, es esencialmente beneficiosa, como ocurre con la luz solar, excepto por altas exposiciones a la misma. Esta se corresponde con la zona del visible, el infrarrojo y el ultravioleta cercano.

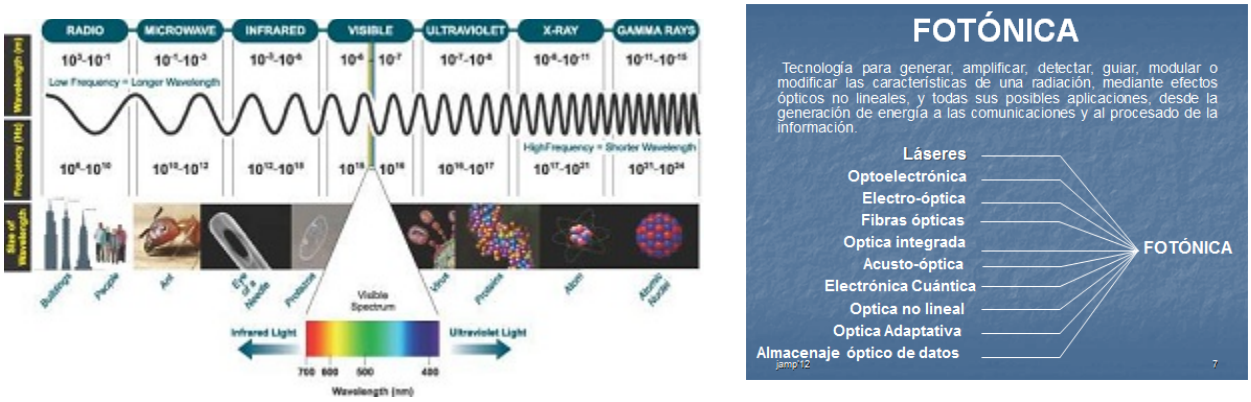


Figura 1. Espectro electromagnético de la luz [http://www.andor.com/learning-academy/what-is-light-an-overview-of-the-properties-of-light] y definición de Fotónica como tecnología por Martín Pereda (fundador del primer departamento de Tecnología Fotónica en España).

Si nos fijamos en las aplicaciones, lo mejor es emplear las mismas palabras que se utilizaron en el documento de la Naciones Unidas [1] para declarar un "Año de la Luz": «…las aplicaciones de la ciencia y la tecnología de la luz son esenciales para los avances ya alcanzados y futuros en las esferas de la medicina, la energía, la información y las comunicaciones, la fibra óptica, la astronomía, la arquitectura, la arqueología, el ocio y la cultura…;…responden directamente a las necesidades de la humanidad, son esenciales para abordar retos tales como el desarrollo sostenible, la energía y la salud de las comunidades, así como para mejorar la calidad de vida en los países desarrollados y en desarrollo.» Su importancia es tal que la propuesta presentada por México a las Naciones Unidas fue apoyada por 35 países.

Ahora, nuestro objetivo es relacionar la Fotónica con Defensa. Si pensamos en el mundo militar y en la luz, es casi seguro que la primera imagen que nos surge es el sable de luz de la Guerra de las Galaxias (1977) o el "rayo de la muerte" utilizada por héroes de ficción como Flash Gordon (1934) que inspiraron la idea de la "pistola de rayos láser" desde el momento en que en 1960 se inventa el láser [2]. El láser, conocido inicialmente como «una solución en busca de un problema», es hoy ya una realidad como arma, y una solución para múltiples problemas.

Sin embargo, no vamos a hablar de los láseres aunque sean las principales fuentes que se emplean por las propiedades de la luz coherente que generan. La coherencia es un requisito fundamental para una gran cantidad de aplicaciones de la Fotónica. En la figura 2 se muestra los principales bloques funcionales de la tecnología fotónica y las áreas de aplicación. No se dispone de espacio para desarrollar aunque fuese brevemente cada uno de los bloques, pero hay resaltar lo que la tecnología fotónica está permitiendo. Esta es la capacidad esencial de poder controlar una radiación lo más monocromática posible. La generación más monocromática se consigue con los láseres de punto cuántico, pero aún no son manejables en comunicaciones y computación. También es crítico identificar la frecuencia de la radiación: en comunicaciones, para separar los canales ópticos; en aplicaciones industriales, para identificar el color, y en medios biológicos, para identificar marcadores. Una técnica para conseguir esto último es poder analizar la respuesta Ramán de un medio, ya que ésta constituye su huella dactilar. Para poder detectar una radiación monocromática es necesario disponer de técnicas de filtrado que separen las longitudes de onda de los fotones que se propagan en un mismo espacio.

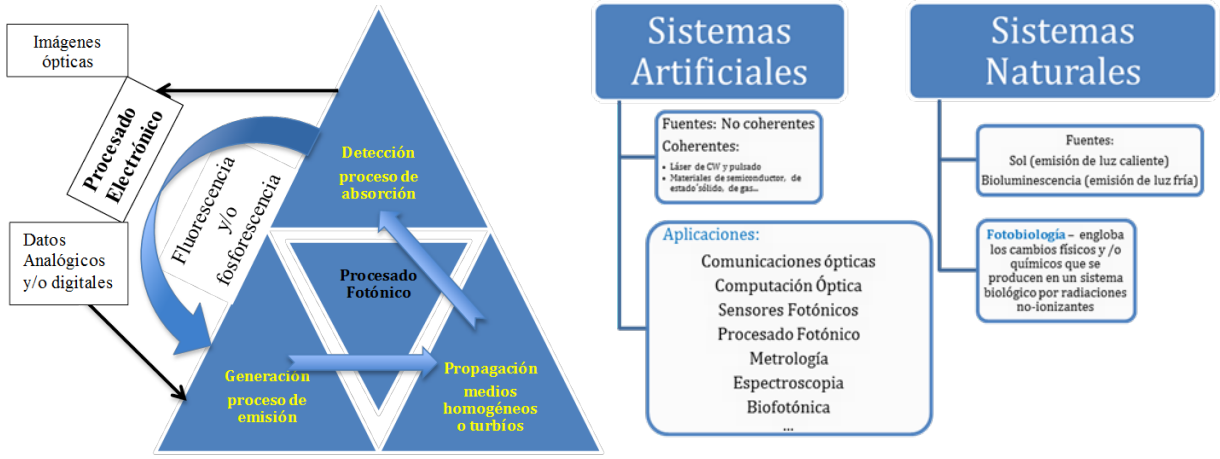


Figura 2. Principales bloques funcionales en sistemas fotónicos y áreas de aplicación.

Aunque tradicionalmente el desarrollo de la tecnología en el entorno militar ha influido en la vida civil [3], en este caso podemos decir también que el desarrollo de la tecnología civil está influyendo en la vida militar. Este artículo trata de mostrar algunos ejemplos de esto último.

2. Equipos ópticos y fotónicos

Las aplicaciones militares clásicas de la óptica son en primer lugar las relacionadas con la mejora de la visión. El ojo del ser humano no tiene precisión en la visión nocturna (con poca cantidad de luz), solo se le activa un tipo de detector en la retina, los bastones (los conos tiene un umbral de sensibilidad mucho menor), lo que significa que es incapaz de identificar la longitud de onda de radiación que recibe y pierde precisión sobre la información de la imagen. Como solo vemos en el rango de

frecuencias del visible, las cámaras con sensores o detectores de infrarrojos y de visión nocturna son de gran ayuda. Si junto al detector de mayor sensibilidad se incorporan las lentes necesarias que por sí solas constituyen unos prismáticos, tendremos un visor que es un equipo "optrónico" [1](óptica y electrónica juntas).

En segundo lugar los equipos con capacidad de medir diferentes parámetros, tales como: distancia, con mayor precisión -*distanciómetro*- o menor precisión y mayor alcance –*telémetro*-; ángulo –*teodolito*-; y orientación -*giróscopo*-. Equipos más modernos incorporan ambas capacidades, como: las gafas de visión nocturna NVG [4] y los nuevos sistemas de puntería como la mira holográfica.

Este tipo de equipos ha de ser robusto, de tamaño pequeño, poco peso, bajo consumo y resistente al agua. Se les puede incorporar la capacidad de grabar vídeo, disponer de geolocalización, brújula y sistemas de procesado de la información obtenida con diferentes sensores fotónicos; así como, cuando sea posible, disponer de sistemas de comunicación.

Una técnica de observación remota que comenzó con el láser y que continúa su desarrollo paralelamente al de la tecnología fotónica es el Lidar (LIDAR, LiDAR or LADAR). Hace referencia a la aplicación radar en frecuencias de la luz; se emplean láseres, y gracias a los nuevos algoritmos de imagen y los sistemas electrónicos de alta capacidad de procesamiento muestran mapas y objetos en 3D.

3. Biofotónica

Podemos considerar la Biofotónica una parte de la Fotobiología y esta es tan amplia como es la naturaleza y su desarrollo bajo la luz solar; por ello solo hablaremos de algunos aspectos de la misma. La Biofotónica permite el diagnóstico médico y la terapia de enfermedades.

En relación con la terapia, no sólo por el uso del láser como herramienta de corte para técnicas quirúrgicas; también permite eliminar células no deseadas como las cancerígenas haciendo incidir luz sobre una sustancia fotosensibilizadora. Esta, al absorber la luz, da lugar a una reacción química que elimina la célula deseada, lo que se conoce como terapia fotodinámica. Las aplicaciones de la terapia de bajo nivel de potencia láser –LLLT-, todavía no del todo reconocida, parece estimular el proceso natural de la curación del cuerpo y puede llegar a ser muy útil.

Las técnicas de imágenes médicas son fundamentales tanto para operaciones como para el diagnóstico. La endoscopia, acompañada de técnicas interferenciales para la formación de imágenes como la Tomografía de Coherencia Óptica (OCT), permite construir imágenes de tejido vivo y exámenes claros de la morfología del mismo; sirve de apoyo a cualquier otro tipo de imágenes médicas (RMN, Ecografías, radiografías…). Las imágenes ópticas se pueden usar para cuantificar el flujo sanguíneo, volumen de sangre, el consumo de oxígeno, las tasas de reoxigenación y tiempo de recuperación muscular en el músculo. La formación de imágenes ópticas puede medir la ubicación y la actividad de las regiones específicas del cerebro al monitorear continuamente los niveles de hemoglobina en sangre a través de la determinación de los coeficientes de absorción óptica. Permite, por ejemplo, la detección rápida para posibles casos de hemorragia intracraneal mediante la colocación

[1] Según el DEI –Diccionario Español de Ingeniería - versión 1.0: Sistema Optrónico: Sistema compuesto de elementos como radar, láser y calculadores electrónicos generalmente aplicado a la detección y seguimiento automático de blancos.

del escáner en cuatro lugares de la cabeza. En los pacientes sin lesiones del cerebro absorbe la luz uniformemente. Cuando hay una hemorragia interna de una lesión, la sangre se puede concentrar en un solo lugar provocando una mayor absorción de la luz en esa zona, y el escáner lo detecta.

El diagnóstico mediante técnicas biofotónicas mínimamente invasivas requiere del conocimiento de las propiedades ópticas de los tejidos. Esto no es sencillo ya que los tejidos son medios turbios y la propagación de una radiación en este tipo de medios es compleja. Como ejemplo de los trabajos realizados en este campo pueden verse las referencias [5-7].

4. Sensores fotónicos

Se entiende como sensor cualquier elemento que modifique alguna de las propiedades de una señal óptica conocida o que genere una señal óptica que aporte información de alguna característica (temperatura, concentración de luminiscentes…). El conocer la señal óptica implica el uso de un detector o de lo que se conoce también como sensor óptico.

El uso de sensores de infrarrojos en aplicaciones militares es bien conocido; por ejemplo, para medir con precisión la composición química de los materiales o gases; permiten ver bajo capas de pintura, su aplicación en visión nocturna. Dada su rápida disminución de precio y su versatilidad están ganando terreno en las aplicaciones M2M (machine to machine), incluyendo el diagnóstico médico, imágenes y controles de procesos industriales, detección de incendios, de fugas de gas a distancia, vigilancia de la contaminación y control de la combustión en tiempo real.

Se clasifican en tres categorías principales según su rango de longitud de onda de funcionamiento: IR-cercano (*near-IR*), IR-medio (*mid-IR*), eIR- lejano (*far-IR*). Near-IR implica fibra óptica, sensores en el rango de los 700nm - 1400nm. Mid-IR incluye dispositivos de detección térmicos en el rango de 1400nm -3000nm. Y far-IR, o imágenes térmicas, que implica el rango de 3000nm -1mm.

Según un reciente informe de mercado [8], los sensores mid-IR sumaron 789 millones de $ en 2012 y se prevé que alcance 7000 millones de $ en 2019. La reducción del tamaño y del coste de fabricación aumenta las unidades demandadas. El estudio de WinterGreen se centra en cómo los sensores están convirtiéndose en parte de los sistemas de red en el IoT *(Internet of Things)*. Lo que es nuevo es el uso de nuevos tipos de láser para una amplia gama de aplicaciones de detección, desde controles de procesos industriales y monitores ambientales a nuevos diagnósticos médicos.

Algunas de las herramientas más importantes para mantener un ambiente limpio, seguro y saludable son sensores, sistemas de sensores y redes de sensores que detectan la presencia y cuantifican la cantidad concreta de gases con una determinada traza química, comprobando el cumplimiento de la normativa. Esto también es cierto para el proceso industrial y el seguimiento y la salud de la automoción, especialmente en el análisis del aire respirado. Los estándares de hoy en día son costosos y consumen mucho tiempo en exámenes médicos que darán paso a medidores de aire expirado capaces de diagnosticar condiciones médicas en campo.

Una técnica muy útil que emplea este tipo de sensores es la espectroscopia de infrarrojo cercano (*Near InfraRed Spectroscopy* -NIRS), casi de 800nm a 2500nm. Es ampliamente utilizada para cuantificar la composición de los productos, ya que cumple los criterios de ser precisa, fiable, rápida, no destructiva y de bajo coste. El equipo consta de una fuente, un detector y un elemento dispersivo (tal como un prisma, o, más comúnmente, una rejilla de difracción) que permita detectar la intensidad a diferentes longitudes de onda para su representación gráfica.

Las técnicas de imágenes espectroscópicas en el rango NIR son muy interesantes. Una imagen espectral es aquella que reproduce la figura de un objeto en función de la longitud de onda que esté reflejando (o emitiendo) el objeto en cuestión. La formación de imágenes hiperespectrales se ha aplicado para una amplia gama de usos, incluyendo la investigación remota de plantas y suelos. Una imagen hiperespectral es el espectro continuo o firma espectral del objeto de análisis. Los datos pueden ser recogidos de instrumentos en aviones o satélites para evaluar la cobertura y la química del suelo.

De todo lo dicho hasta ahora se desprende que la identificación de un longitud de onda tiene abierto un campo de enormes aplicaciones, campo en el que desde hace años se centran los esfuerzos de los autores de este estudio para conseguir el desarrollo de un sensor de este tipo [9].

Una vez se dispone del dato de cada sensor se aplican técnicas multivariable (múltiples variables) de calibración (por ejemplo, el análisis de componentes principales, los mínimos cuadrados parciales, o redes neuronales artificiales) que a menudo se emplean para extraer la información deseada. Un cuidadoso desarrollo de un conjunto de muestras de calibración y la aplicación de técnicas de calibración multivariable es esencial para los métodos de análisis de infrarrojo cercano.

5. Redes de Comunicaciones Fotónicas

Los avances tecnológicos en el mundo comercial, debido a la cercana presencia de la fibra óptica y del transporte digital a alta velocidad, han sido aprovechados e incorporados en varios casos. Valgan como ejemplos de dicha inserción tecnológica los radares de aviones de combate el F-22 y F-35, [10][11], y el radar naval por fibra óptica digital en el Cobra Judy Replacement (CJR).

La mayoría de los sistemas militares pueden agruparse funcionalmente en una de las siguientes categorías de sensores basados en antena: radar, comunicaciones, vigilancia, y de guerra electrónica (EW). Los sistemas de radar se utilizan para la detección de amenaza, sistemas de control de incendios, control de tráfico aéreo, prevención de colisiones, altimetría, guiado de misiles, monitorización del clima e imagen. Los sistemas de comunicaciones militares se utilizan para el transporte de datos plataforma-plataforma y compartiendo cada vez más la coordinación de múltiples sensores en redes cooperativas para escenarios sistema-sistema. Los sistemas de vigilancia se utilizan para el seguimiento y conocimiento de la situación, mientras que la guerra electrónica se utiliza para asegurar acceso sin trabas al espectro EM y evitar o negar a un adversario la misma.

5.1 Sistemas de Sensores

Las tendencias que prevalecen en general en los sistemas militares y arquitecturas de sensores incluyen [12]:

- Digital Beamforming (DBF)
- Sensores y sistemas multifunción
- Sensores escalables y altamente integrados
- Amplio rango de frecuencias y ancho de banda instantáneo
- Diseños de Arquitectura Abierta

Los enlaces de fibra óptica analógica, que utilizan como portadora de la señal de microondas o de radio a una señal óptica, pueden servir, como la conexión para el sistema que permite la recepción electrónica, la conversión A/D y los procesadores para ser situados remotamente.

Para un mayor conocimiento de la situación se requiere en todo momento detectar el espectro de radiofrecuencia completo en un ambiente denso. Los anchos de banda ancha de los dispositivos fotónicos hacen de ellos un candidato natural para la inserción en los equipos de las antenas del

futuro. Las técnicas fotónicas de conversión A/D [13] pueden superar las limitaciones impuestas por los diseños típicos de 2 o 3 mezcladores. Los conversores fotónicos A/D han sido intensamente estudiados durante años y han demostrado algunos resultados impresionantes [14].

5.2 Redes de Comunicaciones Digitales

Las actuales redes de comunicación ópticas, cimentadas sobre el paradigma OTN (*Optical Transport Network*), son conocidas, en su despliege con tecnologías fotónicas, como redes ópticas elásticas o flexibles; permiten numerosos canales ópticos, operando a distintas velocidades de transmisión, con diferentes técnicas de modulación y eficiencia espectral desigual [15]. Esta disparidad las convierte en redes muy complejas, en términos de planificación, en caso de que se comporten como redes verdes, a fin de que consientan una mayor eficiencia energética y una distribución de costes, de acuerdo con el tráfico presente y futuro. En cualquier caso la complejidad reclama el uso de herramientas matemáticas de similar aplicación en diversos entornos; valga como ejemplo un sencillo trabajo presentado en la publicación [16].

La metodología analítica que ofrece el estudio de redes complejas puede extenderse, con sus particularidades, a las organizaciones militares. El análisis de diferentes topologías de red, así como el desarrollo de métricas que permiten evaluar diversos indicadores del rendimiento de un sistema, favorece la detección de fortalezas y debilidades en las estructuras operativas de los sistemas militares. De esta forma, resulta factible su mejora, reestructurándose las condiciones presentes, a fin de proporcionar mayor adaptabilidad, robustez y eficacia en escenarios y contextos, a priori, vulnerables, desde una perspectiva tecnológica.

La teoría de grafos y la teoría de red conforman los principios matemáticos en que se fundamenta la metodología para describir una red [17]. Si bien no son teorías recientes, el legítimo apogeo no fue posible hasta la aparición de equipos con alta capacidad de cómputo, a finales del siglo XX. Debido a la reciente introducción de los principios de la guerra centrada en redes (*network-centric warfare*), en la que la información y la comunicación constituyen una ventaja competitiva en términos estratégicos [18], la teoría de las redes complejas se ha vuelto indispensable en la resolución de problemas militares.

El análisis de diferentes topologías de red, así como el desarrollo de métricas que permiten evaluar diversos indicadores del rendimiento de un sistema, favorece la detección de fortalezas y debilidades en las estructuras operativas de los sistemas militares. De esta forma, resulta factible su mejora, reestructurándose las condiciones presentes, a fin de proporcionar mayor adaptabilidad, robustez y eficacia en escenarios y contextos, a priori, vulnerables, desde una perspectiva tecnológica.

En el terreno militar resulta primordial definir los elementos esenciales del análisis (EEA), cuyas medidas arrojen patrones concisos a partir de los cuales rediseñar estructuras robustas y fiables. La mayoría de los estudios encontrados en la literatura centran el análisis en observar, medir, describir y comprender [19]; sin embargo, su verdadero potencial estriba en diseñar nuevos sistemas, conforme a los parámetros conceptuales y prácticos que deparan los nuevos riesgos geopolíticos. Las redes ópticas se acomodan actualmente a las demandas militares de tráfico de información, si bien la ocupación óptima de longitudes de onda precisa de técnicas de optimización combinatorial,

de forma que, ante contingencias que pudieran limitar los recursos de comunicación presentes, se maximice el uso de la capacidad de comunicación [20]. Además, para contrarrestar riesgos aún más severos, recientes mecanismos de control, basados en la teoría de juegos, surten los efectos deseados [21].

Una vez definidos los actores que intervienen en la organización militar y la interconexión entre ellos, la recopilación de datos, además de cuestiones relativas a su formato, se convierten en una pieza clave del análisis, con independencia de las herramientas software, comerciales o de libre distribución, de que pueda disponerse en cada momento. Por tanto, una correcta gestión de grandes bases de datos, junto con descripciones estadísticas de redes a gran escala [22], se adapta perfectamente al examen de las tres propiedades que caracterizan las redes complejas: estructura, dinámica y evolución [23].

Actualmente, los condicionantes exclusivos de las estructuras militares dificultan la integración directa de métodos que han evidenciado su éxito en ámbitos tan diversos como las redes sociales, organizaciones empresariales, finanzas, propagación de virus informáticos, etc. No obstante, en los últimos años diferentes tentativas innovadoras han arrojado cierta esperanza, puesto que su originalidad reside en aplicar técnicas inductivas a partir de los datos recogidos por métodos tradicionales, como, por ejemplo, el célebre estudio del investigador de redes sociales, Valdis Krebs, que determinó la probabilidad de que dos compañías se fusionaran, simplemente analizando sus sistemas de correo electrónico [24].

El desafío al que se enfrentan las organizaciones militares de todo el mundo es alentador; de hecho, el Departamento de Defensa de los EE. UU., ya en los años 90, acreditó una doctrina militar, cuyo credo era trasladar la revolución tecnológica, propiciada por los avances en las tecnologías de la información y la comunicación, al ámbito militar, de forma que la conexión efectiva o la generación de redes en el emprendimiento militar cristalizara en una ventaja competitiva. Es más, diversos comités militares estratégicos se reúnen periódicamente, con objeto de elaborar recomendaciones en materia de elementos esenciales del análisis, estableciéndose ciertas categorías, encaminadas a detallar parámetros que caracterizan los sistemas militares [25]. Con esta taxonomía solo restaría integrar métodos de análisis para cuantificarlos, analizarlos y transformarlos en requerimientos de diseño; a este respecto, las teorías que han ido surgiendo, sobre la base de las redes complejas y la evolución computacional, marcan el camino que debe seguirse.

6. Conclusiones

Desde hace tiempo se reconoce que la fibra óptica (FO) y las tecnologías fotónicas constituyen una tecnología clave para el desarrollo de los sensores y los sistemas militares debido a sus excelentes propiedades, como el ancho de banda, tamaño pequeño, bajo peso, inmunidad a la influencia electromagnética, baja pérdida incremental y estabilidad de fase.

Durante las últimas décadas, distintos organismos militares (DARPA, ONR, AFRL, etc.) han invertido en financiación económica y en investigación con el propósito de mejorar los sistemas militares a través del uso de la Fotónica, tanto analógica como digital.

En este artículo se revisan algunas de las aplicaciones más representativas de las tecnologías fotónicas.

7. Agradecimientos

Agradecer de manera especial al PCMASACOM del Ejercito de Tierra la información y apoyo para la realización del presente trabajo.

Referencias

1. ONU, Asamblea General, «Globalización e interdependencia: ciencia y tecnología para el desarrollo,» Naciones Unidas, 9/12/2013.
2. J. A. Martín Pereda, «Wiki de la Cátedra Isdefe-UPM,» [En línea]. Available: http://catedraisdefe.etsit.upm.es/wiki/index.php/El_l%C3%A1ser,_caballo_de_batalla_de_la_Guerra_Fr%C3%ADa:_algunos_detalles_de_su_nacimiento. [Último acceso: junio 2015].
3. J. A. Martín Pereda y A. P. González Marcos, «Influencias de la tecnología militar en la sociedad civil,» Política Científica, pp. 28-33, 1990.
4. «Armasight,». [En línea]. Available: https://www.armasight.com/night-vision-academy/night-vision-history#fr11. [Ultimo acceso: junio 2015]
5. J. Campoy , R. Alcarria y A. P. González-Marcos, «Study of the optical behavior of skins using Monte Carlo techniques,» *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 31, nº 3, 09 2015.
6. J. Campoy Fernández, R. Alcarria Garrido, A. González-Marcos y S. Vidal-Asensi , «Estudio y caracterización óptica de un Carcinoma Basocelular mediante simulación láser,» *Sanidad Militar*, vol. 71, nº 2, pp. 84-90, Abril-Junio 2015.
7. J. Campoy, R. Alcarria y A. González-Marcos, «Simulation of apparent optical properties in different seawater,» *Optical Review*, vol. 22, nº 4, pp. Vol. 22, Issue 4, pp 497-510, Aug. 2015.
8. E. T. Curtis y S. Eustis, «Mid IR Sensors: Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worlwide, 2013 to 2019,» *Winter Green Research*, Inc., 2013.
9. M. Alaíz y A. P. González Marcos, «Wavelength-Shift Detection by Semiconductors Lasers,» de *Actas: II Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad*, DESEi+d 2014. Ed., Zaragoza.
10. Harris Corporation, «F-22 Raptor Multimission Air Dominance Fighter,» 27 Sept. 2013. [En línea]. Available: http://download.harris.com/app/public_download.asp?fid=880. [Último acceso: 2015].
11. J. Levis, B. Sutterfield y R. Stevens, «Fiber Optic Communication within the F-35 Mission Systems,» *Avionics Fiber-Optics and Photonics*, pp. 12-13, 2006.
12. P. J. Matthews, «Analog and Digital Photonics for Future Military Systems,» *Optical Fiber Communication Conference* (OFC), 2014.
13. T. Clark, P. Callahan y M. Dennis, «Photonic Downconversion and Microwave-to-Digital Subsystems,» *Microwave Symposium Digest* (MTT), 2011.
14. K. a. A. N. F. Kartner, «Progress in Photonic Analog-to-Digital Conversion,» *Optical Fiber Communication Conference* (OFC/NFOEC), 2013.
15. M. C. Taful y J. Pires, Dynamic Capacity Allocation in OTN Networks, vol. 7, *Communications and Network*, 2015, pp. 43-54.
16. J. de Pedro Carracedo, J. Martín Pereda y A. González Marcos, «Método de optimización del enrutado estático en una red óptica WDM,» *Óptica Pura y Aplicada*, vol. 42, nº 4, pp. 245-250, 2009.

17. R. Cohen y S. Havlin, Complex Networks: Structure, Robustness and Function, Cambridge University Press, 2010.
18. J. Moffat, Complexity Theory and Network Centric Warfare, DIANE Publishing, 2010.
19. M. Newman, Networks: An Introduction, OUP Oxford, 2010.
20. M. Andrews y L. Zhang, «Complexity of wavelength assignment in optical network optimization,» de INFOCOM, 2006.
21. L. Pavel, Game Theory for Control of Optical Networks, Springer Scic&Business Media, 2012.
22. Réka y A.-L. Barabási, «Statistical mechanics of complex networks,» *Reviews of Modern Physics,* nº 74, pp. 47-97, January 2002.
23. G. Caldarelli, Scale-Free Networks: Complex Webs in Nature and Technology, OUP Oxford, 2007.
24. V. Krebs, «Valdis Krebs' website,» [En línea]. Available: http://www.orgnet.com. [Último acceso: 22 July 2015].
25. D. A. Jarvis, «A methodology for analyzing complex military command and control (C2) networks,» Alidade Incorporated publications.

Sesión III-C

Guiado, Energía y Materiales

Mejora de la eficiencia energética en un acuartelamiento descentralizando la generación de calor

Mur Amada, Joaquín [1,*], García García, Miguel Angel [1] y Cristóbal Monreal, Iván [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa Zaragoza. Emails: joaquin.mur@unizar.es (JMA), magargar@unizar.es (MAG), icristob@unizar.es (ICM)

***** joaquin.mur@unizar.es: (JMA)

Abstract: En este trabajo se plantean y analizan someramente las diferentes posibilidades de mejora de la eficiencia energética de un acuartelamiento, actuando sobre la generación del calor empleado en calefacción y agua caliente sanitaria. Desechadas otras alternativas, se estudian las ventajas, tanto desde el punto de vista de la mejora de la eficiencia energética como desde el punto de vista de la disminución de gastos de operación, que acarrearía la sustitución del actual combustible utilizado en las calderas de generación del calor (gasóleo C) por gas natural. También se apuntan las ventajas ligadas a la sustitución de la generación centralizada de calor por una generación distribuida en distintas dependencias del acuartelamiento.

Keywords: calefacción; ACS; eficiencia energética, generación de calor.

---

1. Introducción

La Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID), la Meta Tecnológica (MT) 3.3.4 habla de "*disminuir la dependencia de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica en bases y campamentos*", y fija como objetivo conseguir "*climatización y agua caliente sanitaria integrada y eficiente*" [1].

Por otra parte, hay un buen número de Bases, Acuartelamientos y Establecimientos del Ejército de Tierra en los que se ha certificado (o está en fase de implementación) un Sistema de Gestión Ambiental basado en la norma UNE-ISO 14001, certificación que lleva asociado un claro compromiso con la disminución de la emisión de gases contaminantes.

Según la Instrucción nº 56/2011, de 3 de agosto, del Secretario de Estado de Defensa, "*El Ejército de Tierra, la Armada, el Ejército del Aire, los Órganos Directivos y Organismos Autónomos incorporarán los principios de ahorro y eficiencia energética y de utilización de fuentes de energía alternativas entre los principios generales de su actuación y en sus procedimientos de contratación. Así mismo, adoptarán medidas y acciones orientadas a alcanzar los objetivos de ahorro y eficiencia energética marcados en el artículo 85 de la Ley 21/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible y en la Resolución de 14 de enero de 2010, de la Secretaría de Estado de Energía, por la que se publica el Acuerdo de Consejo de Ministros del 11 de diciembre de 2009, por el que se aprueba el plan de activación de la eficiencia energética en los edificios de la Administración General del Estado y la Instrucción 8/2009, de 9 de marzo, del Secretario de Estado de Defensa por la que se aprueba el Programa Permanente de Eficiencia y Economía del Gasto del Ministerio de Defensa*" [2].

La instalación militar sobre la que se ha realizado este estudio es la Academia General Militar (AGM), sita en Zaragoza. En este acuartelamiento, existe un sistema centralizado que suministra calor para agua caliente sanitaria (ACS) y calefacción a la mayoría de los edificios ubicados en su recinto, así como a los edificios del Centro de Adiestramiento "San Gregorio" (CENAD), situado en las inmediaciones de la AGM. El Polideportivo y los dos edificios del Centro Universitario de la Defensa (CUD) tienen sistemas de climatización independientes.

La instalación de generación y distribución de calor utiliza agua sobrecalentada como fluido calorportante. Consta de un edificio en el que se sitúan las calderas, las bombas de circulación de este fluido calorportante, sus depósitos de expansión y equipo de tratamiento, y los depósitos de combustible. El combustible utilizado para alimentar las calderas es gasóleo C.

Se dispone de cuatro calderas de agua sobrecalentada de la marca BUDERUS HEIZTECHNIK. Dos son del modelo Logano TYPE S815 W 3200, de 2 750 000 kcal/h, con quemadores FBR FGP 350-M(TL), y otras dos son del modelo Logano TYPE S825, de 3 750 000 kcal/h, con quemadores CUENOD C500H 601. Según la documentación técnica [3], su rendimiento nominal es del 92% para una temperatura de funcionamiento salida a 80 ºC y retorno a 60 ºC, según la norma EN 303. Como la temperatura de salida de la caldera está habitualmente entre 120 ºC y 160 ºC, el rendimiento real disminuye en un 2~3% sobre el nominal.

De este edificio central parte el circuito primario, por el que circula el agua sobrecalentada, que se reparte por todo el recinto a través de varios ramales. Este circuito primario alberga unos 150 000 litros de agua aproximadamente, y llega hasta lo que se denominan "subestaciones térmicas", distribuidas por los distintos edificios de la AGM y del CENAD, en las que se intercambia el calor con los circuitos que suministran el ACS, mediante unos interacumuladores, y los circuitos de calefacción de las diferentes dependencias.

Esta instalación ha ido evolucionando hasta la configuración actual de acuerdo a las necesidades y la disponibilidad presupuestaria de cada momento. Hay que señalar que se ha realizado un esfuerzo en pos de la automatización y monitorización del sistema y, en la actualidad, se dispone de un sistema SCADA para la gestión de la instalación.

La utilización de agua sobrecalentada para transportar el flujo de calor a las diferentes subcentrales térmicas tiene una incidencia directa en los costes de operación y mantenimiento. Las tuberías y demás elementos del circuito primario, a pesar de ser de aceros especiales y de utilizarse agua osmotizada y

aditivos específicos, sufren la corrosión de manera más agresiva debido a las altas temperaturas del agua.

2. Demanda térmica y posibles acciones para disminuir el suministro energético

2.1. Demanda térmica

A lo largo de un año, se han distinguido tres periodos de demanda térmica, que tienen en cuenta las necesidades de climatización y ACS y la ocupación de la AGM. De esta manera, la temporada alta corresponde a meses de otoño/invierno (entre noviembre y mayo, salvo el periodo navideño), en los que la ocupación de la Academia es plena y, por lo tanto, la demanda térmica alta; la temporada media corresponde a meses de otoño y primavera, cuando la ocupación es plena pero la demanda térmica se limita al ACS; y la temporada baja corresponde a meses de verano en los que los alumnos están de vacaciones y, por tanto, la demanda térmica es mínima.

La figura 1 muestra la demanda térmica para cada uno de estos tres periodos del año (calculada a partir del dato del consumo semanal de gasóleo) frente a la temperatura ambiente (tomada de los archivos históricos del aeropuerto de Zaragoza).

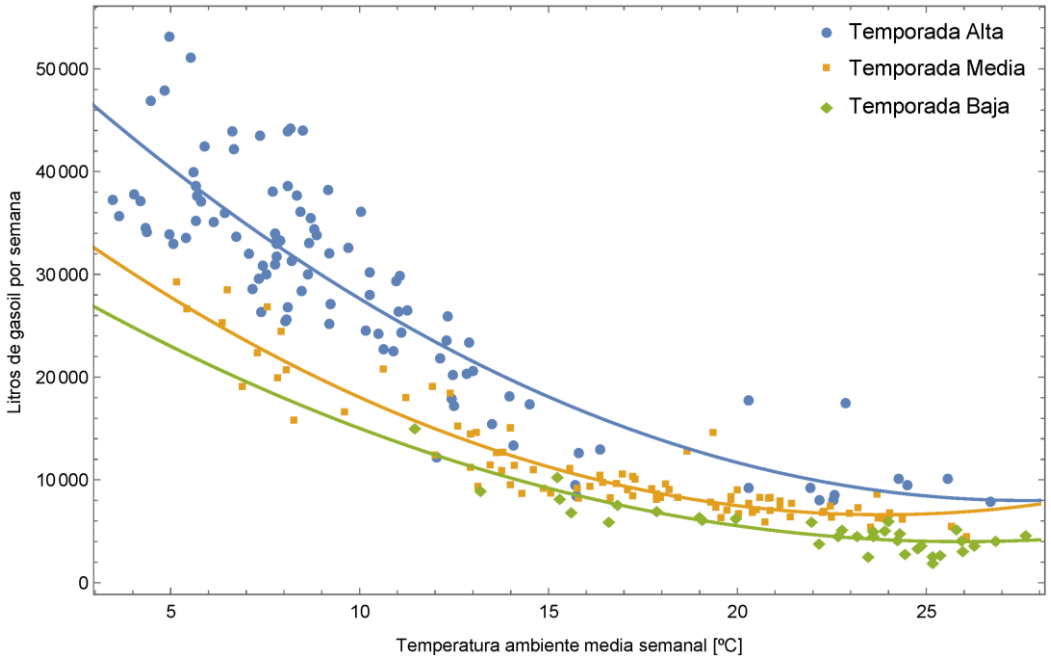


Figura 1: Consumo semanal promediado de gasóleo C respecto la temperatura media exterior, de la AGM.

2.2. Posibles acciones para disminuir el suministro energético

Dependiendo de la inversión disponible y de los condicionantes técnicos y estratégicos, la AGM podría emprender una o varias de las actuaciones propuestas a continuación, para disminuir su suministro energético. Estas actuaciones son:

- Aumentar las medidas de ahorro energético.
- Sustituir el combustible que actualmente se quema en las calderas (gasóleo C) por gas natural.

- Renovar la central térmica, sustituyéndola por un sistema de cogeneración o trigeneración.
- Instalar sistemas de energías renovables.
- Segregar las subcentrales más alejadas de la central.

2.2.1. Sistema de cogeneración

El actual marco energético dificulta la viabilidad de instalaciones de cogeneración cuando supongan la conexión a la red eléctrica. La Ley 24/2013, del Sector Eléctrico [4], establece un nuevo régimen retributivo específico para instalaciones de cogeneración y energías renovables. El Real Decreto 413/2014 [5], de 6 de junio, fija la nueva retribución a las energías renovables, cogeneración y residuos que supone, en término medio, una disminución de aproximadamente del 30% respecto a la retribución anterior. A estas limitaciones hay que añadir que la cogeneración necesita una inversión inicial muy elevada.

Otro inconveniente una posible instalación de cogeneración en la AGM, es el significativo aumento de la carga de trabajo en labores de operación y mantenimiento durante los meses que estuviera operativa la planta, a lo que se sumaría la gestión de los contratos bilaterales o a plazos de suministro de energía o bien la gestión de ofertas en el mercado eléctrico.

2.2.2. Sistemas de energías renovables

El marco legislativo en el que se mueven las energías renovables cuando se conectan a la red eléctrica es el mismo que el presentado en el caso de la cogeneración. Aunque las instalaciones eólicas no tienen que presentar ofertas al mercado eléctrico, sí tienen que enviar una previsión de su generación. Existen emplazamientos bien expuestos al recurso eólico en el campo de maniobras de San Gregorio, pero una instalación de este tipo puede condicionar los usos habituales del campo, por lo que tampoco se considera idónea su instalación en las inmediaciones de la AGM. Un emplazamiento no tan óptimo como algunos vértices de San Gregorio es la colina donde se encuentran los depósitos de agua.

La instalación de placas fotovoltaicas conectadas a red tampoco es rentable a día de hoy, ya que requieren una burocracia similar a la generación eólica. Así pues, tanto la instalación de una planta de cogeneración como el emplazamiento de energías renovables, sólo pueden justificarse desde el punto de vista medioambiental.

La instalación de colectores solares podría suministrar parte de la demanda térmica del acuartelamiento. Dado que el nuevo Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE) exige su colocación, la única instalación de este tipo existente en la AGM es en el edificio Medrano (el último construido). Los edificios Galbis y Cisneros han sido o están siendo reformados, pero no se han instalado colectores solares. Estos edificios cuentan con fancoils conectados o bien a climatizadores de frío, o bien a un intercambiador de calor con el circuito primario de agua sobrecalentada, así como radiadores adicionales. En la reforma también se instaló el reglamentario sistema de renovación de aire (sin recuperador de calor/frío).

En el edificio Histórico, las cuestiones estéticas y la normativa específica a la que está sujeto, imposibilitan la instalación de colectores solares.

2.2.3. Sustitución del combustible de las calderas

Teniendo en cuenta que entre el recinto de la AGM, el recinto del CENAD y el campo de maniobras de San Gregorio discurre un gasoducto, la actuación más sencilla que se puede emprender para aumentar la eficiencia energética de la AGM es el cambio de combustible quemado por las calderas. La propuesta consiste en llevar el suministro desde el gasoducto hasta los quemadores de las calderas de la central térmica¸ donde se sustituirían los actuales de gasoil por otros de gas (las calderas de la central pueden funcionar indistintamente con gas o con gasoil según su documentación).

Con esta modificación se aumentaría la eficiencia de la instalación además de disminuirse las emisiones de CO_2, gases contaminantes y derrames accidentales de combustible.

2.2.4. Descentralización de la generación de calor

Otra propuesta para disminuir el suministro energético de la AGM, es la descentralización de la generación del calor empleado en la calefacción y el ACS. Se propone instalar calderas de gas en los recintos que ahora ocupan las distintas subestaciones térmicas. De esta manera no habría pérdidas de calor en el circuito primario, se aumentaría el rendimiento de la instalación, al ser las calderas de gas más eficientes que las de gasóleo, se simplificaría el mantenimiento, redundando todo ello en una disminución en los costes de explotación del sistema.

3. Resultados

3.1. Sustitución del combustible de las calderas

Debido a la composición química, a las altas eficiencias de los procesos de combustión del gas natural y a las avanzadas tecnologías de recuperación de calor en los mismos [6,7], las emisiones de CO_2 en la combustión del gas natural (del orden de 0,252 kg_{CO2}/kWh) es un 20% inferior a las emisiones en la combustión del gasóleo (del orden de 0,311 kg_{CO2}/kWh). Como puede verse en la tabla 1, la cantidad del resto de gases contaminantes emitidos por las calderas de gas natural es muy inferior la cantidad de gases contaminantes emitidos por las calderas de gasóleo [8].

Combustible	Rendimiento %	CO mg/MJ	PM mg/MJ	NOx mg/MJ	SO_2 mg/MJ
Gasóleo C	92	100	6	75	50
Gas natural	95	40	1	60	6

Tabla 1. Rendimiento y emisiones medias indicativas de calderas de gasóleo y gas natural. Fuente: [9]

Añadido a la menor cantidad de emisiones, y también debido a la mejor combustión que tiene lugar en ellas, el rendimiento de las calderas de gas suele ser algo más alto que el rendimiento de las de gasóleo. Considerando un caso extremo, si se compara una caldera de gas natural de condensación frente a una de gasóleo, la diferencia de rendimientos puede superar el 15% en favor de la de gas, aunque la caldera de condensación proporciona agua a una temperatura inferior y la instalación de calefacción y ACS debe poder funcionar con esas temperaturas.

Además de las anteriormente citadas mejoras en cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero y eficiencia en el proceso de combustión, el precio del combustible también es un factor importante a la hora de evaluar la viabilidad del cambio de combustible de las calderas. Como puede verse en la tabla 2, en términos del precio del kilovatio hora, el gas natural es la energía más económica de las tradicionalmente utilizadas.

Tipo de energía	Precio kWh
Gas natural	0,07 €/kWh
Electricidad	0,17 €/kWh
Gas propano	0,08 - 0,14 €/kWh
Gas butano	0,08 €/kWh
Gasóleo C	0,10 €/kWh

Tabla 2. Comparación del precio por kWh para usuarios domésticos según tipo de energía, impuestos incluidos, en noviembre de 2014. Fuente: [10], [11].

De cara a comparar los precios de los combustibles, también es fundamental conocer su evolución. La figura 2 muestra los precios del gas natural y del gasóleo C (en €/kWh) en los dos últimos años.

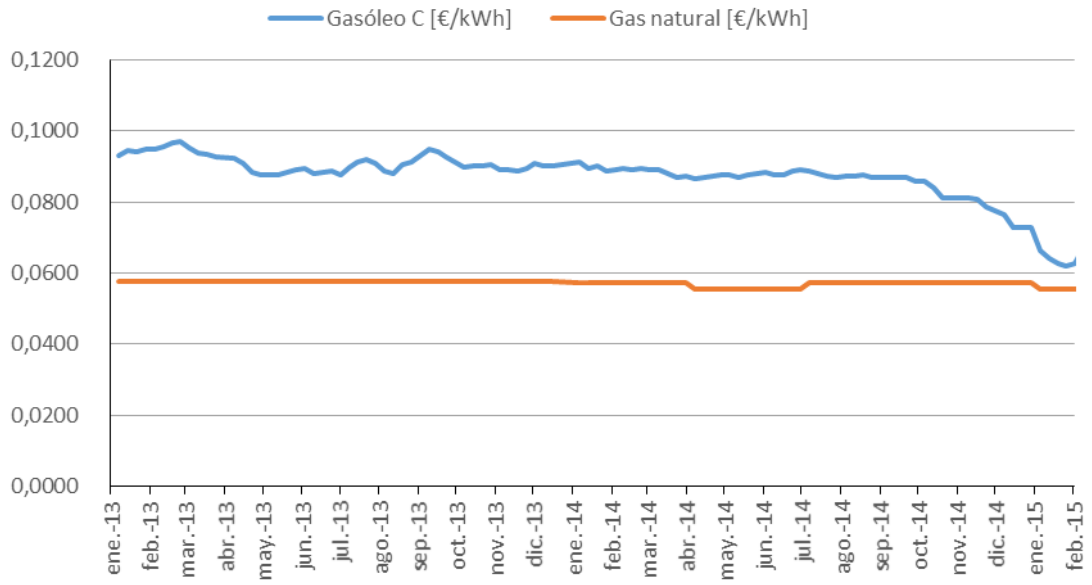


Figura 2: Evolución del precio del gas natural y del gasóleo C a lo largo de los últimos años. Fuente: [10], [12]

La figura 3 muestra el consumo anual de combustible en la central térmica de la AGM. Puede verse que éste fluctúa entre 8 y 10 GWh (entre 799 y 897 m^3 de gasoil). Teniendo en cuenta el precio medio del gasóleo C para el Ejército entre enero y septiembre del 2014, se estima un precio medio de 0,0835 €/kWh, referido al PCI, para todo el año 2014. Así pues, el coste medio anual del combustible empleado en satisfacer la demanda térmica de la AGM, considerando los últimos 4 años, representa un importe en torno a 720 000 €.

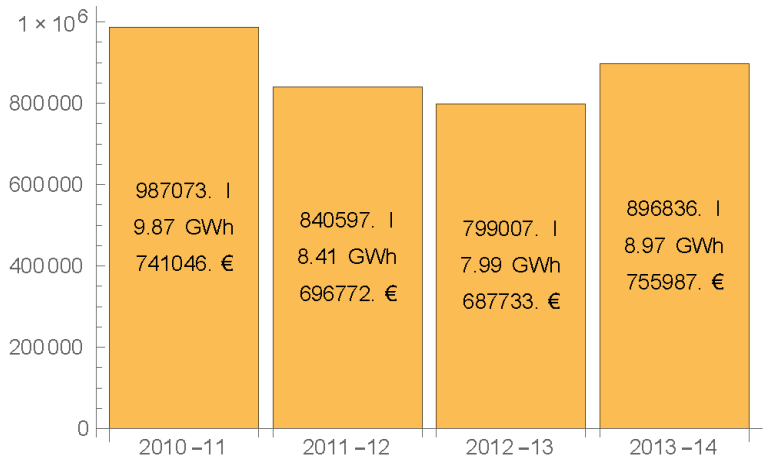


Figura 3: Consumo anual (por cursos académicos) de gasóleo C de la central térmica de la AGM (estimación de energía con PCI = 10 kWh/l) y gasto aproximado en combustible.

Se estima el coste de 9 GWh de gas en alrededor de 560 000 € (impuestos incluidos) a precios de noviembre de 2014. Según esta estimación, modificar el suministro de combustible de gasóleo C a gas, supondría un ahorro en torno a 160 000 €/año. El precio del gas se ha calculado en base a una oferta para un consumo anual de 4,5 GWh. El poder de compra de gas del Ejército es mucho mayor, por lo que se estima que el coste real de 9 GWh de gas sería menor que los 560 000 € estimados.

3.2. Descentralización de la generación de calor

En cuando a la descentralización de la generación de calor en la AGM, podrían aprovecharse futuras renovaciones de la instalación para comenzar con este proceso. Podría iniciarse por aquellas dependencias que están más alejadas del edificio de la central térmica, minimizándose de esta forma las pérdidas en el circuito primario.

Una vez totalmente descentralizado el sistema, la generación de calor tendría lugar en cada uno de los recintos donde se ubican las actuales subestaciones térmicas. El incremento del rendimiento de la instalación es evidente, ya que no existirían pérdidas de calor en el circuito primario.

La eficiencia del sistema también aumentaría debido a que, como ya se ha mencionado en el apartado anterior, las calderas de gas, sobre todo si se trata de calderas de gas de condensación, presentan rendimientos mayores que las calderas que utilizan gasóleo como combustible.

Por otra parte, con calderas descentralizadas, el sistema tendría un tiempo de respuesta más rápido, pues no sería preciso elevar la temperatura de los 150 000 litros del circuito primario a 120 ºC para que las subestaciones transmitan ese calor a sus interacumuladores de ACS o a sus circuitos de calefacción. Con las actuales limitaciones de temperatura del agua sobrecalentada, se estima que el ACS alcanza la temperatura de confort para poder ducharse 2 horas después de que la central térmica haya sido puesta en marcha en una mañana de invierno.

Además, descentralizando la generación de calor, la temperatura del agua en los circuitos sería considerablemente menor que la temperatura actual del agua en el circuito primario, lo que supondría menores costes de operación y mantenimiento, pues menores temperaturas de agua implican menor corrosión y, por lo tanto, un mantenimiento más espaciado. Por añadidura, los repuestos para este tipo de calderas son mucho más comunes, de menor costo y fáciles de obtener.

Desde el punto de vista de la fiabilidad, las calderas de gas descentralizadas también mejorarían la continuidad de suministro, pues además de que son más rápidas de reparar, una avería en una no condicionaría al resto, que funcionarán independientemente. Esto contrasta con situación actual, en la que una avería en uno de los ramales del circuito primario puede dejar varios días sin servicio a todas las dependencias que "cuelgan" del ramal afectado, además de suponer un elevado coste de reparación.

Por último, las modernas calderas de gas cuentan con robustos sistemas de seguridad, no tienen grandes depósitos de combustible anejos y pueden funcionar sin la supervisión presencial de un operario en la central, tal como se hace actualmente. Esto añadiría libertad de horarios a la calefacción y ACS, redundando en un mejor servicio y disminuyendo los costes de explotación.

4. Conclusiones

Se han estudiado varias opciones para disminuir el suministro energético y la emisión de gases de la AGM. En el actual marco eléctrico, los sistemas de cogeneración y trigeneración y las energías renovables conectadas a red no son rentables y requieren de complejos sistemas de gestión y operación.

La sustitución del actual combustible de la central térmica por gas natural lograría menores emisiones de CO_2, una mejora en la eficiencia energética del sistema y un ahorro de costes.

El aumento en la eficiencia, y el consiguiente ahorro en costes, podría ser mayor si se aprovechasen futuras renovaciones de las instalaciones para descentralizar la generación de calor situando calderas de gas distribuidas por los diferentes recintos de la AGM y del CENAD a los que actualmente suministra calor la central térmica.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer su ayuda y apoyo al Cap. Mariano I. Manzano y, muy especialmente, al Stte. Félix Peñalosa, ambos de la Jefatura de Apoyo y Servicios de la AGM.

Referencias

1. Ministerio de Defensa. Estrategia de Tecnología e Innovación. Metas tecnológicas. **2012**.
2. Ministerio de Defensa. Instrucción 56/2011, de 3 de agosto, del Secretario de Estado de Defensa sobre sostenibilidad ambiental y eficiencia energética en el ámbito del Ministerio de Defensa *Boletín Oficial del Ministerio de Defensa del 9 de agosto de 2011* **2011**, 21811–21818.
3. Burderus. Chaudière Logano S815 et Logano plus SB815, 2000. *Catálogo* **2000**.
4. Jefatura del Estado. Ley 24/2013, de 26 de Diciembre, del Sector Eléctrico. *Boletín Oficial del Estado de 27 de diciembre de 2013* **2013**, 105198–105294.
5. Ministerio de Energía, Industria y Turismo. Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos. *Boletín Oficial del Estado del 10 de junio de 2014* **2014**, 43876-43978.
6. Oficina catalana del canvi climatic. Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero, **2012**, 0–74.

7. Ministerio de Energía, Industria y Turismo – IDEA. Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en España. Versión 3/marzo/2014.
8. Comisión Nacional de Energía. Información Básica de los Sectores de la Energía, **1999**.
9. Carrasco, J.E.; Esteban, L.S. Más eficiencia, menos emisiones. *Bioenergy International* **2014**, 22, 8–9.
10. Preciogas.com. Evolución del precio del gas natural. Último acceso 20/julio/2015.
11. Ediciones El País. La subida de los costes de la energía llegan a la factura con un alza del 18%. *El País*. 3/noviembre/2014.
12. Datosmacro.com. www.datosmacro.com. Último acceso 10/septiembre/2015.

Estudio de las variaciones de la generación renovable en España

Mur Amada, Joaquín [1,*], García García, Miguel Angel [1] y Dranca, Lacramioara [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa Zaragoza. Emails: joaquin.mur@unizar.es (JMA), magargar@unizar.es (MAG), licri@unizar.es (LD)

***** joaquin.mur@unizar.es: (JMA)

Abstract: Este artículo muestra un estudio de las variaciones de la generación solar y eólica que se han producido en el año 2014 en el sistema eléctrico español. Se ha utilizado el histograma, el análisis tiempo-frecuencia a través del espectrograma y el análisis tiempo-escala a través de una transformada Wavelet modificada para detectar la duración y amplitud de las variaciones de la serie temporal. Las variaciones de potencia eólica generada en España peninsular en 2014 con duración entre 2 días y 2 semanas están comprendidas entre 500 MW y 3000 MW (cuantiles 10% y 90%). Las variaciones de duración entre 16 minutos y 10 horas tienen una amplitud que oscila entre 15 y 150 MW (cuantiles 10% y 90%) por hora de duración. También se ha detectado un comportamiento estacional (una mayor presencia de oscilaciones diurnas y semidiurnas entre mayo y septiembre).

Keywords: energía eólica; energía solar; seguridad de suministro eléctrico; espectrograma; escalograma.

---

1. Introducción

Según la línea de acción sexta de la Estrategia de Seguridad Nacional [1], "*España es todavía un país vulnerable desde el punto de vista energético. Por una parte, depende excesivamente del exterior para su abastecimiento, y, por otra parte, la baja interconexión energética de gas y electricidad con el resto de Europa aumenta la amenaza de interrupciones en el suministro*".

El Informe anual de Seguridad Nacional 2014 [2] asevera que "*el carácter intermitente, poco predecible y la escasa capacidad de almacenamiento de las energías renovables, unido al bajo nivel de interconexión transfronterizo entre la Península Ibérica y el resto de Europa y a los costes elevados de este tipo de tecnologías, dificultan su integración óptima dentro del mix energético*".

Para mejorar la seguridad del sistema eléctrico es necesario conocer las características de las fluctuaciones de potencia y las desviaciones de las predicciones de las energías renovables para asignar de forma segura las reservas primarias, secundarias y terciarias de generación [3].

Este artículo muestra un estudio de las variaciones de la generación solar y eólica que se han producido en los últimos años en el sistema eléctrico español. Los datos de las islas se han segregado de la península porque en las islas, las variaciones de la generación renovable son mayores en términos relativos, más rápidas y más difíciles de predecir.

2. Estudio estocástico de la potencia en España

Por una parte, el comportamiento de la demanda eléctrica ha sido muy estudiado por las compañías eléctricas y los operadores del mercado eléctrico. Afectan a la demanda eléctrica: el ciclo diurno, el semanal (días laborables, sábados y domingos) y el estacional, los factores laborales (festividades de ámbito regional y nacional) y las condiciones meteorológicas [4].

Por otra parte, el comportamiento de la generación renovable no controlable depende de la disponibilidad de la fuente primaria de energía, que está sujeta a las condiciones meteorológicas y al ciclo diurno.

El estudio del proceso estocástico se simplifica enormemente si se encuentra una transformación de la serie original que permita aproximarla a un proceso gaussiano. Los procesos gaussianos tienen una distribución estadística normal, son estacionarios y ergódicos (no presentan estacionalidad) y se caracterizan con la densidad espectral de su varianza o con su función de autocorrelación.

Habitualmente, el estudio estadístico de una serie de datos comienza con la representación gráfica de la serie seguido del cálculo de la distribución de frecuencias. Si el proceso es ergódico, se puede transformar en un proceso gaussiano utilizando el ratio entre la densidad de probabilidad acumulada experimental y la de la distribución normal [5].

En la figura 1, la función de densidad de probabilidad de la potencia eléctrica consumida en la red eléctrica peninsular muestra el clásico comportamiento bimodal debido a los periodos valle y pico en el consumo eléctrico.

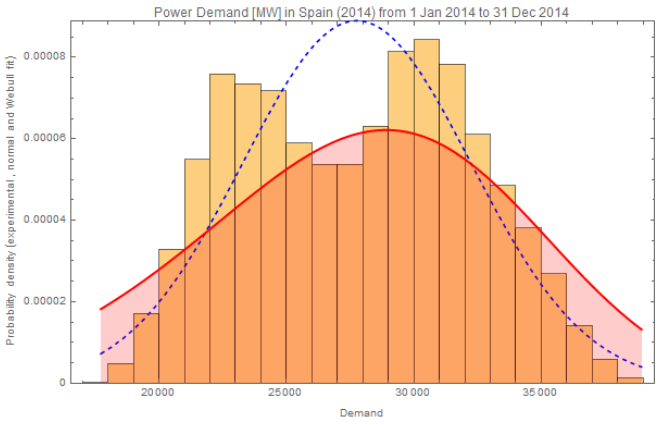


Figura 1. Histograma de potencia consumida en España peninsular en 2014.

En las islas también se producen valles y pico en el consumo, aunque el fuerte comportamiento estacional del consumo en las islas enmascara las dos modas de la distribución cuando se calcula a lo largo de un año (figura 2).

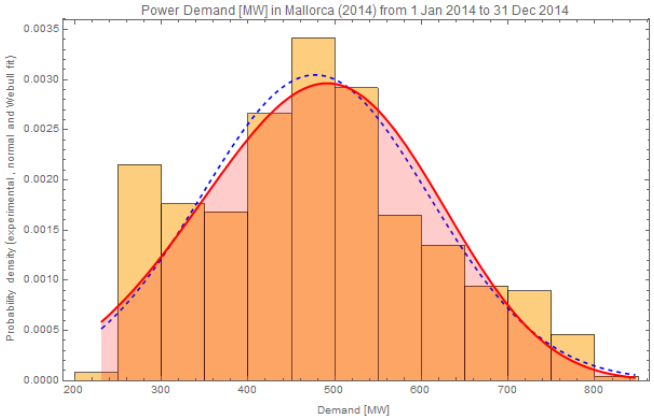


Figura 2. Histogramas de potencia consumida en Mallorca en 2014.

El comportamiento de la generación renovable no controlable depende de la disponibilidad de la fuente primaria de energía. El histograma de la generación solar (figura 3) muestra un comportamiento muy alejado de la normalidad debido a los frecuentes periodos de baja o nula insolación la producción solar. La distribución tiene una cola muy pesada debido a que la generación solar está muy condicionada por el ciclo diurno y por las condiciones meteorológicas. Por ello la suma de muchas plantas solares no tiende a la normalidad, pues la producción solar en puntos alejados de la península está fuertemente relacionada.

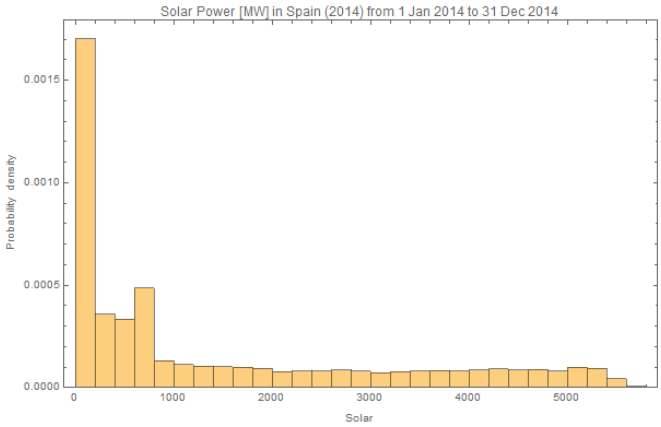


Figura 3. Histogramas de la generación solar en España peninsular en 2014.

El comportamiento de la generación eólica está condicionado por fenómenos meteorológicos como anticiclones y borrascas que afectan al conjunto de la península. No obstante, la dinámica atmosférica es más variada debido a las diversas características locales y a las diferentes características de las brisas marinas y de montaña. Un parque eólico experimenta periodos de calma y de fuerte viento, teniendo una distribución bimodal de potencia generada. Sin embargo, la figura 4 muestra que la generación eólica total de España peninsular tiene una distribución que no difiere excesivamente de la distribución Weibull (línea continua roja), muy empleada para caracterizar el potencial eólico. Incluso la distribución de la generación eólica empieza a acercarse a la distribución normal (línea punteada azul), aunque siga mostrando un comportamiento estacional y cíclico.

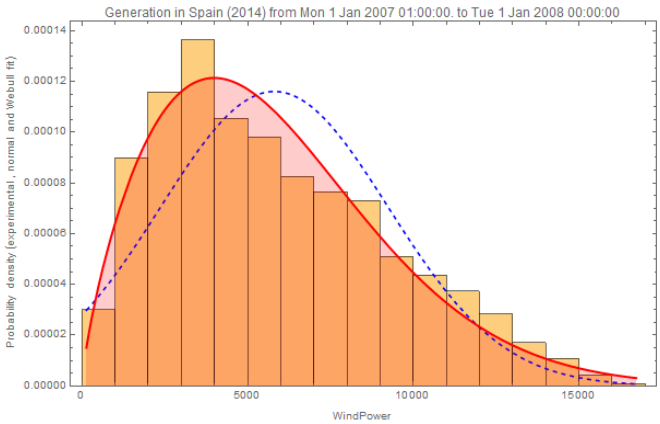


Figura 4. Histogramas de la generación eólica en España peninsular en 2014.

En un proceso estocástico, el valor observado en un instante depende del observado en instantes cercanos. Por ejemplo, la potencia eólica que se generará dentro de una hora depende de la actual. Las series temporales con modelos autoregresivos integrales de media móvil (ARIMA) son útiles cuando se está interesado en la evolución futura de la variable a partir de los valores pasados.

No obstante, existen situaciones en las que un análisis frecuencial es ventajoso respecto al análisis clásico de series en el dominio del tiempo porque permite extraer mayor información sobre el comportamiento cíclico de las señales. Además está relacionado con las excepcionales propiedades teóricas de los procesos estocásticos normales. Por ejemplo, cada punto del espectro (o línea espectral) de un proceso normal es independiente de los demás. En otras palabras, cada línea del espectro es una variable normal compleja, independiente estadísticamente del resto, de media nula y de varianza igual a su densidad espectral de varianza (más conocida como periodograma, "*Power Spectrum Density*" o módulo medio de la transformada de Fourier de la serie al cuadrado)

Una ventaja del análisis frecuencial es que permite estudiar más fácilmente el efecto de considerar variables meteorológicas en emplazamientos cercanos. La varianza de la suma de potencias de varios aerogeneradores o del viento equivalente de una región se puede estimar a partir de la coherencia espacial del viento. Por tanto, la varianza espectral de esas señales corresponde a la varianza del viento, amortiguada a altas frecuencias para tener en cuenta el efecto del promediado espacial correspondiente a la cancelación parcial entre turbinas de fluctuaciones rápidas. Este comportamiento simplifica el estudio de la variación de la generación eólica en función del tamaño de la región considerado.

Las condiciones climáticas varían a lo largo del tiempo y las variables atmosféricas sólo pueden considerarse procesos estacionarios normales mientras las características ambientales no varíen significativamente. Por tanto, la representación frecuencial de estos procesos es una aproximación a la realidad que puede utilizarse para obtener las características del proceso y, posteriormente, obtener una representación temporal que pueda ser utilizada finalmente para la predicción y el control de la energía eólica a partir de los valores medidos en el pasado.

El espectrograma consiste en una representación del contenido frecuencial de la señal en función del tiempo. Se emplea habitualmente en audio y en tratamiento de señales de frecuencia variable. Se suele estimar aplicando la transformada de Fourier a pequeñas porciones de la serie temporal. Esto permite estudiar señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia conjuntamente. El espectrograma

puede servir para comprobar cuánto se aproxima la señal real a un proceso normal y puede servir también para identificar aquellos periodos durante los cuales la señal presenta variaciones atípicas que son características de condiciones meteorológicas extremas o comportamientos singulares del sistema.

Por ejemplo, la figura 5 revela la presencia de patrones diurnos y semidiurnos más marcados de mayo a septiembre, típicos de las distintas velocidades de calentamiento y enfriamiento del mar, valles y montañas. También se puede ver la importancia de las frecuencias típicas de borrascas y anticiclones.

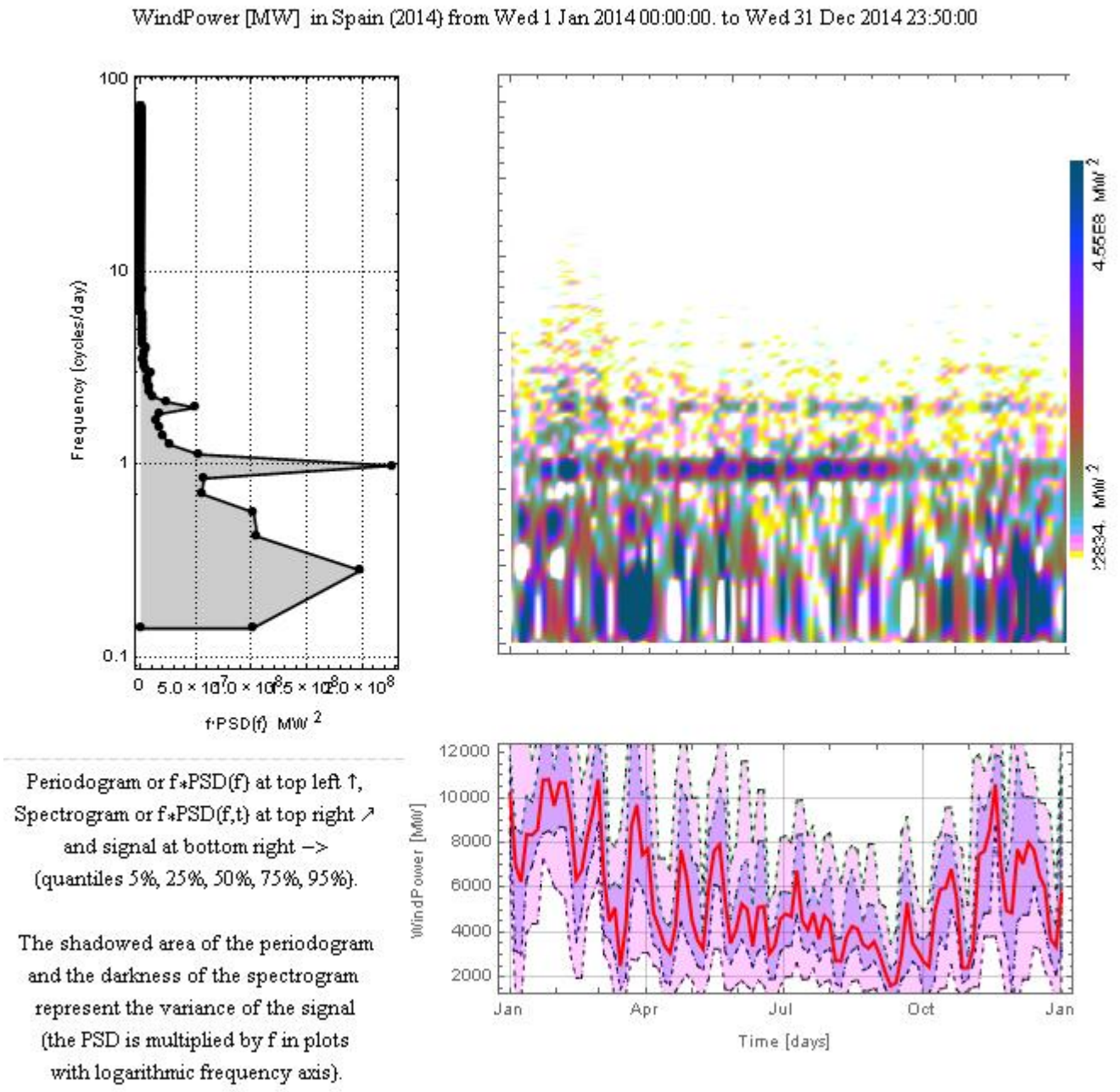


Figura 5. Espectrograma de la generación eólica en España peninsular en 2014.

Desde el punto de vista del control de redes eléctricas es muy importante detectar y prever cambios abruptos en la generación renovable (especialmente para la programación de la reserva rodante y la seguridad de funcionamiento del sistema eléctrico) [6], [7]. La detección y caracterización de estos sucesos es compleja y para ello se propone utilizar la transformada Wavelet compleja de tipo Gabor.

Utilizando esta familia con un dominio bastante corto se pueden detectar variaciones (rampas y picos en la señal) a distintas escalas temporales. Se ha aplicado un escalado no normalizado a la Wavelet para que el módulo del escalograma represente la amplitud (pico a pico) de la variación de la señal, mientras que la escala temporal representa la duración de la variación. La fase de la transformada indica el punto en que se encuentra la variación (pico, valle o rampa ascendente o descendente). Para acelerar el cálculo de la transformada wavelet continua se ha implementado un filtrado recursivo de la señal mediante medias móviles iterativas y la diferenciación entre puntos no contiguos. La información obtenida del escalograma se puede utilizar para comparar la ocurrencia real de los eventos extremos respecto a la estimada a partir del periodograma mediante la aproximación a un proceso normal transformado.

El escalograma de la figura 6 indica correctamente la magnitud y la escala de tiempo de las variaciones y el patrón diario y semanal de la potencia demandada en la España peninsular.

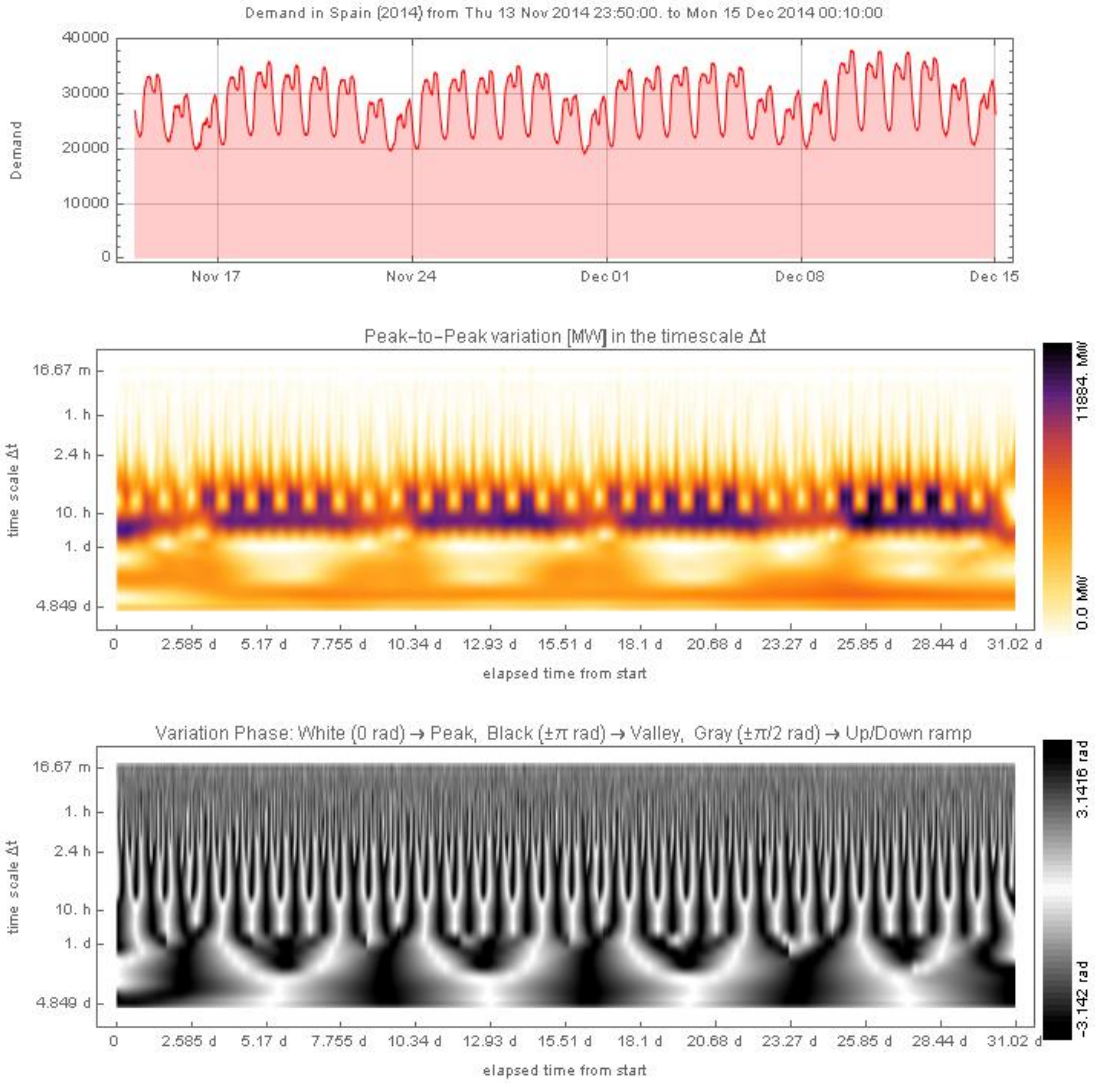


Figura 6. Escalograma del consumo eléctrico en España peninsular del 14/11/2014 al 15/11/2014.

El escalograma se puede utilizar para caracterizar las variaciones de potencia. Su histograma (figura 7) muestra que las mayores variaciones de potencia eólica generada en España peninsular en

2014 tienen una duración entre 2 días y 2 semanas. En esa escala temporal, las variaciones están comprendidas entre 500 MW (cuantil 10%) y 3000 MW (cuantil 90%).

También se observa que las variaciones de duración entre 16 minutos y 10 h tienen una amplitud aproximadamente proporcional a su duración, entre 15 y 150 MW por hora de duración. O dicho de otro modo, que el valor eficaz de la derivada en esas escalas temporales suele estar comprendida entre 15 y 150 MW/h.

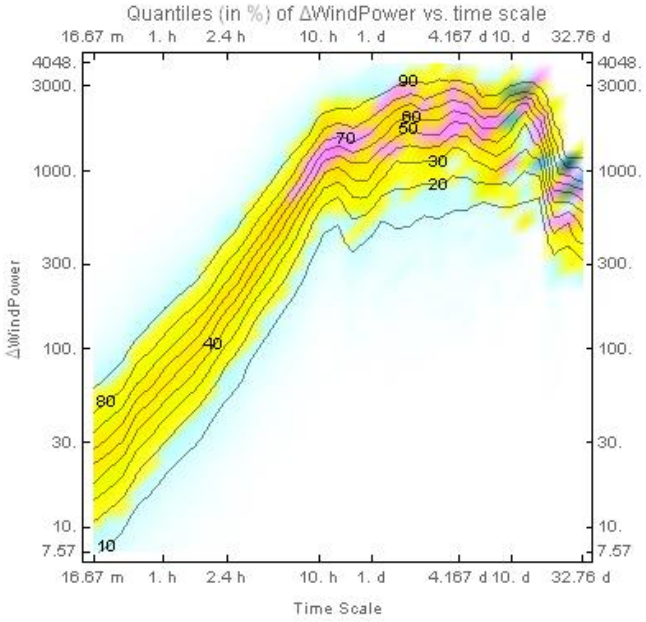


Figura 7. Rango decil de las variaciones de potencia eólica generada en España peninsular en 2014

3. Conclusiones

El espectrograma permite calcular el periodograma y la coherencia de la generación renovable. Los espectrogramas muestran un comportamiento estacional de la potencia solar y eólica generada. El periodograma indica patrones diurnos y semidiurnos muy marcadas en la generación solar y, en menor medida, en la generación eólica. Se ha observado un patrón estacional entre mayo y septiembre.

Se ha desarrollado un escalograma basado en la transformada Wavelet compleja de tipo Gabor, modificado para que indique la magnitud y la escala de tiempo de las variaciones de series de datos. Esta gráfica es más sencilla de interpretar y tiene mejor resolución temporal que el espectrograma.

El escalograma de la generación solar muestra un patrón diurno muy fuerte debido a que su aportación queda limitada a las horas de insolación. Se ha observado que las variaciones de potencia solar en España peninsular son mayores y más rápidas que las de la energía eólica.

El escalograma de la potencia eléctrica consumida en España muestra un patrón semanal muy nítido, que modula la demanda diaria entre días laborables y fin de semana. En las islas muestra también una clara componente estacional.

La generación eólica no muestra patrones tan definidos como los anteriores. Las mayores variaciones de potencia eólica generada en España peninsular en 2014 tienen una duración entre 2 días y 2 semanas. En esa escala temporal, las variaciones están comprendidas entre 500 MW (cuantil 10%) y 3000 MW (cuantil 90%). También se observa que las variaciones de duración entre 16 minutos y

10 horas tienen una amplitud comprendida entre 15 MW y 150 MW por hora de duración (cuantiles 10% y 90%).

Referencias

1. Presidencia del Gobierno. *Estrategia de Seguridad Nacional. Un proyecto Compartido*. Gobierno de España 2013.
2. Departamento de Seguridad Nacional, Presidencia de Gobierno. *Informe anual de seguridad de 2014*. Gobierno de España 2014.
3. Sansavini, G.; Piccinelli, R.; Golea, L. R.; Zio, E. A stochastic framework for uncertainty analysis in electric power transmission systems with wind generation. *Renew. Energy* **2014**, 64, 71–81.
4. REE (Red Eléctrica de España), *Informe del Sistema Eléctrico Español 2014*. REE 2015.
5. Mur-Amada, J. *Wind Power Variability in the Grid*. Prensas Universitarias de Zaragoza. Zaragoza, 2009.
6. Katzenstein, W.; Apt. J. The cost of wind power variability. *Energy Policy* **2012**, 51, 233–243.
7. Wang, J.; Botterud, A.; Bessa, R.; Keko, H.; Carvalho, L.; Issicaba, D.; Sumaili, J.; Miranda, V. Wind power forecasting uncertainty and unit commitment. *Appl. Energy* **2011**, 88, no. 11, 4014 - 4023.

Estudio de la Eficiencia Energética en los Cuarteles de la Escuela Naval Militar

Gómez Rodríguez, Miguel Ángel [1,*], González Gil, Arturo, Lareo Calviño, Guillermo, Álvarez Feijoo, Miguel Ángel, Piñeiro Paredes, José Javier

[1] Centro Universitario de la Defensa (Marín). miguelgr@cud.uvigo.es: (MAGR), arturogg@cud.uvigo.es: (AGG), glareo@cud.uvigo.es: (GLC), alvarezfeijoo@cud.uvigo.es: (MAAF), javierpipa@gmail.com:(JJPP).

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: miguelgr@cud.uvigo.es: (MAGR);

Abstract: En este trabajo se realiza un estudio de la eficiencia energética de un cuartel de alumnos de la Escuela Naval Militar con el fin de conocer el consumo energético y sus principales causas así como clasificar el grado de eficiencia del edificio. Para el estudio se ha usado un software de cálculo, reconocido oficialmente por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, comúnmente utilizado para el proceso de certificación energética de edificios. Una vez obtenidos los resultados del estudio se evalúan diferentes medidas de mejora de la eficiencia energética así como el impacto que su implantación tendría en el consumo y su viabilidad económica.

Los resultados de este estudio podrán servir como base para la definición de algunas medidas de ahorro energético a estos y otros edificios de Defensa, con lo que se favorecerá la eficiencia energética y se logrará un considerable ahorro económico.

Keywords: eficiencia energética; consumo; cuartel; ahorro energético

---

1. Introducción

El fomento de la eficiencia energética constituye una parte muy importante del conjunto de políticas necesarias para cumplir lo establecido en el Protocolo de Kioto y debe estar presente en las medidas que adopten los diferentes países para dar cumplimiento a los compromisos adquiridos. Tanto la tecnología disponible, como los hábitos responsables, hacen posible un menor consumo de energía, mejorando la competitividad de las empresas o de las familias y también la calidad de vida personal.

La gestión de la demanda de energía es, hoy en día, un instrumento importante que permite a la Unión Europea ejercer una influencia en el mercado mundial de la energía y en la seguridad de su abastecimiento a medio plazo. El Tratado constitutivo de la Comunidad Europea, en particular sus artículos número 6 y número 175, prescriben que las exigencias de la protección del medio ambiente se integren en la definición y en la realización de las políticas y acciones de la Comunidad. Así, en sus Conclusiones de 30 de mayo y de 5 de diciembre de 2000, el Consejo dio su apoyo a un *Plan de Acción para mejorar la Eficacia Energética* y pidió que se tomaran medidas específicas para el sector de la edificación, puesto que el conjunto de las viviendas absorben más del 40 % del consumo final de energía en la Comunidad y se encuentra en fase de relativa expansión; tendencia que previsiblemente hará aumentar el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Es de significar que las medidas para fomentar la mejora de la eficiencia energética de los edificios deben tener en cuenta las condiciones climáticas, las particularidades regionales o locales, así como el entorno ambiental interior y la relación coste-eficacia. Es importante, además, que dichas medidas no incumplan otros requisitos esenciales aplicables a los edificios tales como la accesibilidad, la seguridad o la utilización a que se destine el edificio.

El Ministerio de Defensa mediante la Directiva nº 107/97, de 2 de junio, puso de manifiesto la importancia de los temas medioambientales en el seno de las Fuerzas Armadas (FAS); por ello, ha desarrollado un sistema propio de gestión patrimonial y energética denominado SINFRADEF (Sistema de Gestión de Infraestructura del Ministerio de Defensa), que contiene información relevante sobre los consumos y la eficiencia energética de todos sus edificios. Así pues, el cuartel de alumnos *Almirante Francisco Moreno,* como edificio perteneciente a las FAS, debe de obtener su calificación energética al objeto de que el Mando conozca su consumo de energía primaria y también la cantidad de emisiones de CO_2 que produce, al objeto de poder llevar a cabo en futuras reformas las medidas convenientes para mejorar su eficiencia energética.

En este estudio se analizan algunos indicadores de la eficiencia del cuartel de alumnos *Almirante Francisco Moreno* situado en la Escuela Naval Militar para estudiar la conveniencia de aplicar medidas de mejora de la eficiencia energética. Asimismo, se proponen ciertas mejoras con su correspondiente estudio de viabilidad económica.

2. Edificación a estudio

2.1. Datos generales

El Cuartel Almirante Francisco Moreno, edificio situado en un solar de unos 3169 m^2, se compone de una planta baja y de dos plantas superiores en donde se sitúan los dormitorios, los estudios y los baños de los alumnos de la ENM. Presenta una clara simetría en forma de “H”, pero cerrada por su fachada oeste; y con su eje principal orientado al 070. En la figura 1 se puede observar una vista

frontal de la fachada principal del edificio. En la Figura 2 se presenta un plano de la distribución de habitaciones del edificio. Cada una de las dos plantas consta de dos módulos perfectamente simétricos de unos 1925.56 m^2 habitables cada uno, teniendo como unión entre ambos un espacio de descanso a modo de hall de 201.7 m^2. En cada módulo se ubican 22 dormitorios con capacidad para 4 camas, en la mayoría de los casos, y 3 amplios aseos. En total cada uno de los 4 módulos puede albergar a 88 alumnos. Por tanto, la superficie total útil de cada planta es de 2127.27 m^2 y cada una de ellas puede alojar a 176 alumnos. Así pues, el cuartel podría dar cabida a 352 alumnos.



Figura 1. Vista de la fachada principal del edificio.

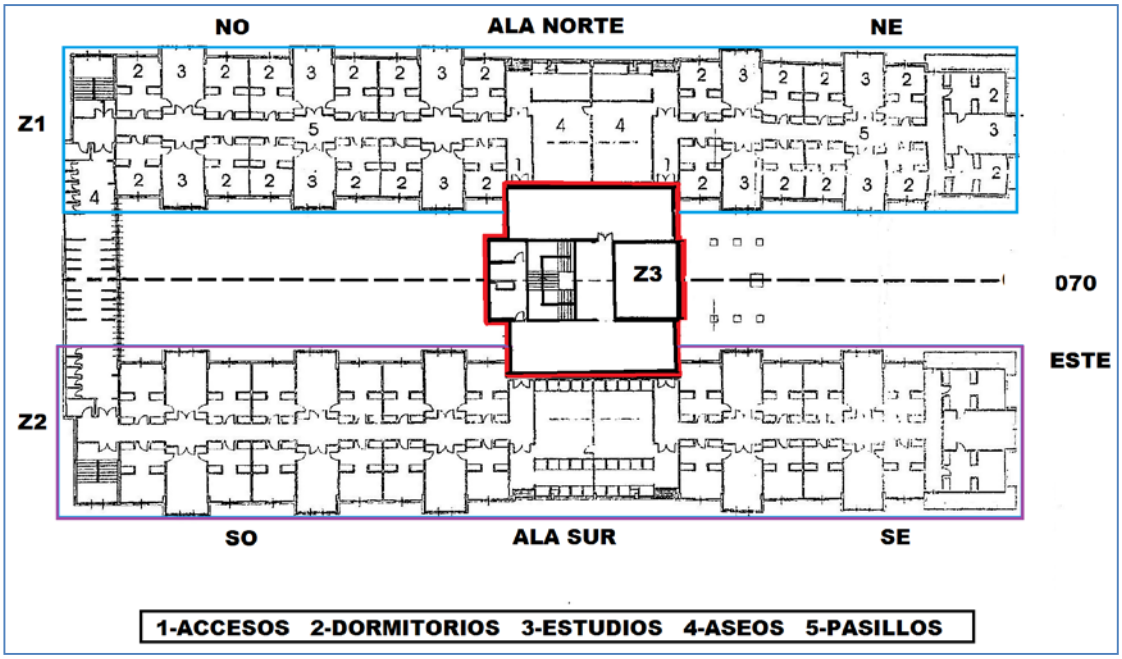


Figura 2. Plano del edificio y las zonas de estudio.

2.2. Fachadas

Los materiales que componen la edificación son los de uso habitual en la húmeda y lluviosa zona de Galicia donde se encuentra situado, Marín. Las fachadas se encuentran formadas por:

- Una combinación de aplacados de granito gris pulido.
- Zonas de mortero monocapa.
- Paneles prefabricados para formación de las ventanas.
- Pequeñas zonas de ladrillo cerámico esmaltado.

2.3.Suelos

Existen dos zonas bien diferenciadas según el tipo de suelo. La principal diferencia entre las zonas definidas es que, el suelo de la zona Z1 está expuesto a la intemperie; en cambio, la zona Z2 cuenta bajo su suelo con una biblioteca, con lo cual la pérdida energética en esa zona será notablemente menor.

La superficie de suelo expuesto a la intemperie es de aproximadamente 963 m^2 mientras los suelos que hacen frontera con una partición interior cuentan con una superficie de aproximadamente 1165 m^2.

2.4. Cubierta

Sobre las habitaciones de la segunda planta se encuentra un hueco definido por el forjado y la cubierta. La cubierta, en las distintas zonas se encuentra formada por tejas cerámicas curvas, sobre paneles bituminados de fibrocemento que le confieren unas óptimas cualidades de impermeabilización y se apoya en tabiques palomeros. Estos tabiques se construyen colocando unos ladrillos parcialmente sobre otros inferiores, pero solamente por sus extremos.

2.5. Ventanas

Las ventanas del cuartel de alumnos son de una sola hoja, están fabricadas con el mismo tipo de carpintería y con un tipo de vidrio análogo, aunque, en este caso, hay que exceptuar los de las ventanas pertenecientes a los baños denominados *de damas*, que añaden una capa de un material granulado semiopaco. La descripción detallada de las ventanas del edificio se puede encontrar en [1].

La edificación no dispone de ningún elemento de oscurecimiento del cristal ni de ningún suplemento, a modo de toldo, para los días de intenso sol, además los cristales no son del tipo *bajo emisivos*, que son aquellos que poseen unas propiedades que logran mejorar el rendimiento energético del espacio en donde se encuentran

2.6. Puentes térmicos

En la envolvente térmica del edificio se encuentran varios tipos de puente térmico debidos a diferente conductividad de los materiales, diferentes espesores o a cuestiones geométricas. Los puentes térmicos que nos encontramos en el cuartel *Almirante Francisco Moreno* se encuentran detallados en [1].

2.7. Iluminación

La certificación energética de un edificio tiene en cuenta no solo el gasto en calefacción y refrigeración, sino también la demanda energética de iluminación. Además, la demanda energética de

calefacción y refrigeración de un edificio se ve afectada significativamente por el tipo de iluminación instalada. Las fuentes de iluminación del cuartel son en su mayoría luminarias con capacidad para dos tubos fluorescentes. El consumo de potencia de iluminación por zonas es el mostrado en la Tabla 1. En total, la potencia instalada en lo referente al estudio de zonas habitables del edificio, asciende a 55.448 W**.**

ILUMINACIÓN ZONAS Z1 Y Z2				
ESTANCIA	**TIPO DE LUZ**	**Nº TUBOS**	**POTENCIA (W)**	**POTENCIA TOTAL (W)**
CAMARETAS Y ESTUDIOS	LUMINARIA MODELO MI-VR 2x58W DE ILUSOL	592	34336	
PASILLO	LUMINARIA MODELO DO-VPE 2x58 DE ILUSOL	176	10208	52432
BAÑOS	LUMINARIA MODELO 950 HYDRO DISANO 2x58	136	7888	
ILUMINACIÓN Z3				
ESTANCIA	**TIPO DE LUZ**	**Nº TUBOS**	**POTENCIA (W)**	**POTENCIA TOTAL (W)**
HALL	LUMINARIA MODELO MI-VR 2x58W DE ILUSOL	52	3016	3016

Tabla 1. Datos de potencia de iluminación.

3. Resultados

3.1. Estudio de consumo

Para el cálculo del consumo, las características del edificio han sido introducidas en el programa CE^3X, reconocido oficialmente por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, y comúnmente utilizado para el proceso de certificación energética de edificios existentes. La descripción detallada de la introducción de los datos puede encontrarse en [1]. La calificación obtenida se corresponde con la letra D (Figura 3), al obtenerse unas emisiones globales de dióxido de carbono de 134.16 $kg/CO_2/m^2$, , como consecuencia del consumo energético de la edificación. Dado que se trata de una construcción de cierta antigüedad (año 1977) y pese a haber sufrido obras de mejora durante el año 2003, puede decirse que el Cuartel obtiene una calificación energética media (letra D), quedándose muy cerca de la calificación inmediatamente superior (letra C), que se obtendría con 133 $kg/CO_2/m^2$. En la Tabla 2 se muestran los valores parciales de consumo de energía primaria y emisiones de CO_2 por metro cuadrado al año de calefacción, agua caliente sanitaria (ACS), refrigeración e iluminación.

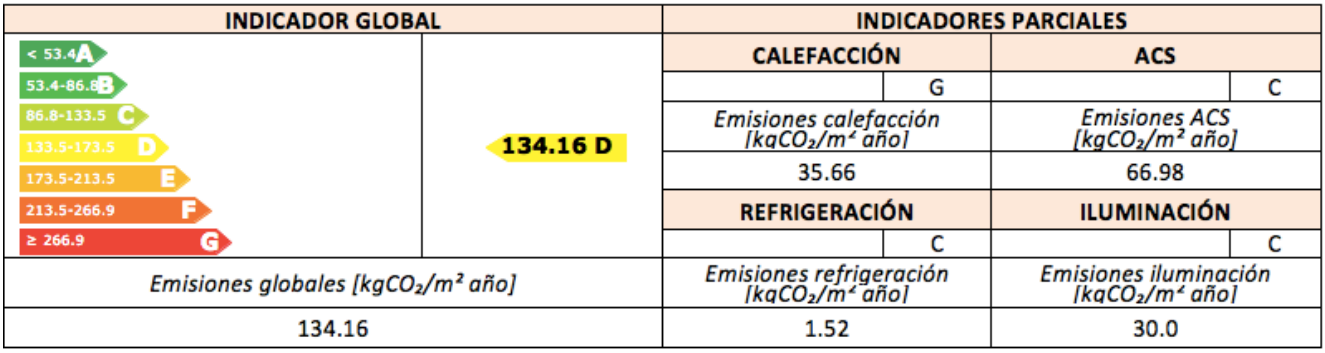


Figura 3. Etiqueta de calificación energética y consumos de CO_2.

	Energía primaria (kWh/m² año)	**Emisiones CO_2 (kgCO_2/m² año)**
Calefacción	176.55	35.66
ACS	331.60	66.98
Refrigeración	6.10	1.52
Iluminación	120.69	30.0
Global	634.94	134.16

Tabla 2. Indicadores parciales de consumo y emisiones.

De estos datos se puede extraer que la principal fuente de consumo es la gran demanda de ACS lo cual es debido al uso del edificio y la eficiencia de la caldera. También los gasto de calefacción e iluminación son importantes. Esto es debido principalmente a un deficiente aislamiento térmico y un excesivo consumo de las luminarias instaladas. Por su parte el gasto en refrigeración es poco significativo debido a que se trata de un edificio situado junto al mar en una zona climática tipo C1 [1].

	Coste gas natural (IVA incluido) (€/año)
Calefacción	19843.5
ACS	49455.4
Total	**69298.9**
	Coste electricidad (IVA incluido) (€/año)
Refrigeración	1960.5
Iluminación	44764.7
Total	**46725.2**
Global (electricidad+gas natural)	**116024.1**

Tabla 3. Relación de costes anuales de consumo.

3.2. Mejoras energéticas en el edificio.

Tras el cálculo del consumo energético se contemplan una serie de medidas, a modo de mejoras, para lograr aumentar la eficiencia energética del edificio cuartel. . En este caso, las mejoras que se van a plantear son las siguientes:

1. Sustitución de ventanas y marcos e incorporación de espuma aislante a la caja de las persianas.
2. La mejora anterior más la incorporación de placas de poliuretano proyectado al equipo mixto de caldera y ACS, así como la renovación total de tubos fluorescentes por tubos LED.
3. La mejora anterior, pero cambiando la instalación de calefacción y ACS por una caldera de biomasa.

En las tablas 4 y 5 se muestra los cálculos de consumos de energía primaria y emisiones de CO_2 obtenidos con las mejoras aplicadas respecto al primer cálculo del edificio. Se puede observar que la primera mejora (sustitución de ventanas y aislamiento de puentes térmicos) tiene un efecto poco significativo en el ahorro energético. Esto puede ser debido a que el edificio no tiene una gran superficie de ventanas en relación a la superficie de fachadas y las pérdidas por los puentes térmicos no son significativas. Por su parte, la segunda medida sí consigue una mejora significativa en el consumo de electricidad. Por el contrario, la reducción de gasto en iluminación evita la disipación de calor por parte de las luminarias que debe ser contrarrestado con un mayor consumo de calefacción. Globalmente la medida consigue mejorar un 12.4 % el consumo de energía primaria y un 14.5 % las emisiones de CO_2. La tercera medida (sustitución de caldera de gas natural por biomasa) tiene un efecto leve en el consumo de energía primaria, pero un gran efecto en las emisiones de CO_2 debido a que se trata de un combustible renovable (emisiones de CO_2 nulas). Por otra parte, la biomasa se trata de un combustible abundante en la zona con lo cual es menos susceptible a las fluctuaciones del mercado.

	Mejora I		**Mejora II**		**Mejora III**	
	Energia Prim. ($kWh/m^2año$)	**% mejora**	**Energia Prim. ($kWh/m^2año$)**	**% mejora**	**Energia Prim. ($kWh/m^2año$)**	**% mejora**
Calefacción	168.8	4.4	199.0	-12.7	197.1	-11.6
ACS	331.6	0.0	328.7	0.9	328.3	1.0
Refrigeración	2.9	52.1	1.4	76.6	1.4	76.6
Iluminación	120.7	0.0	27.1	77.6	27.1	77.6
Global	624.0	1.7	556.2	12.4	553.9	12.8

Tabla 4. Indicadores parciales de consumo una vez aplicadas las mejoras.

	Mejora I		**Mejora I+II**		**Mejora I+II+III**	
	Emisiones CO_2 ($kgCO_2/m^2año$)	**% mejora**	**Emisiones CO_2 ($kgCO_2/m^2año$)**	**% mejora**	**Emisiones CO_2 ($kgCO_2/m^2año$)**	**% mejora**
Calefacción	34.1	4.4	40.2	-12.7	0.0	100
ACS	67.0	0.0	66.4	0.9	0.0	100
Refrigeración	0.7	52.0	1.4	5.9	0.4	76.3
Iluminación	30.0	0.0	6.7	77.6	6.7	77.6
Global	131.8	1.8	114.8	14.5	7.1	94.7

Tabla 5. Indicadores parciales de emisiones de CO_2 una vez aplicadas las mejoras.

En la Tabla 6 se muestran los gastos anuales en combustible y electricidad con las mejoras aplicadas así como los porcentajes de ahorro respecto al caso original. Lo más destacable es el ahorro de electricidad producido con la segunda mejora debido al ahorro en iluminación y un ligero ahorro en el gasto de combustible con la tercera mejora debido al menor coste de la biomasa respecto al gas natural.

	Mejora I		**Mejora II**		**Mejora III**	
	Coste (€/año)	**%**	**Coste (€/año)**	**%**	**Coste (€/año)**	**%**
Combustible	68242.5	1.5	71040.4	-2.5	65283.5	5.8
Electricidad	45703.9	2.2	10488.1	77.6	10488.1	77.6
Global	113946.4	1.8	81528.5	29.7	75771.6	34.7

Tabla 6. Coste económico una vez aplicadas las mejoras.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado la eficiencia energética del Cuartel *Almirante Francisco Moreno* como ejemplo de las edificaciones de defensa existentes mediante el uso del programa informático CE^3X como paso previo para alcanzar, mediante las reformas oportunas, un ahorro económico y, con ello, contribuir de forma clara a salvaguardar el medio ambiente.

Dado que el Cuartel Almirante Francisco Moreno asume un gasto anual por el funcionamiento del conjunto de sus instalaciones de unos 116.000€, se podría considerar la posibilidad de acometer ciertas obras de reforma que se verían amortizadas en pocos años. En este sentido, ha quedado de manifiesto que las mejoras a emprender al objeto de mejorar la eficiencia energética del Cuartel, pasan en un primer momento por mejorar la envolvente térmica, la iluminación y la caldera del edificio. De este modo se puede conseguir un importante ahorro de electricidad y utilizar una combustible renovable y barato para cubrir la demanda de calefacción y ACS, además de un ahorro de unos 40000 euros anuales.

5. Referencias

1. Piñeiro Paredes J.J. Certificación Energética del Cuartel “Almirante Francisco Moreno” en la ENM, Trabajo Fin de Grado. Mayo 2015.
2. CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo (BOE 08-noviembre-2013)

Los materiales de cambio de fase en la Armada como alternativa para una mayor eficiencia energética

Álvarez, Feijoo, Miguel Ángel[1]*; Gómez Rodríguez, Miguel Ángel[1]; Suárez García, Andrés[1]; y Cacabelos Reyes, Antón[1]

[1] Centro Universitario de la Defensa (CUD), Escuela Naval Militar (ENM), Plaza de España 2, 36920, Marín.
Emails: alvarezfeijoo@cud.uvigo.es, (MAAF); miguelgr@cud.uvigo.es, (MAGR); asuarez@cud.uvigo.es, (ASG); acacabelos@cud.uvigo.es, (ACR)

* Autor Principal y responsable del trabajo; Email: alvarezfeijoo@cud.uvigo.es, (MAAF)

Abstract: Los materiales de cambio de fase (Phase Change Materials, PCM) constituyen una rama interesante de investigación con fines energéticos. En la Armada, su interés está vinculado desde su aplicación para reducir el consumo energético de climatización en edificios hasta su uso en ropa del personal de tropa y marinería. En el sector de la edificación, este material se puede incorporar a las paredes exteriores o a una capa de revestimiento, lo que permite frenar el flujo de calor en ambos sentidos y así lograr reducir el intervalo de oscilación de la temperatura en el interior del recinto. También es posible su aplicación como apoyo en instalaciones solares para almacenar energía y, así, poder emplearla en el momento que se necesite (i.e. instalaciones de agua caliente sanitaria). Estos materiales, cuando se aplican a ropas, permiten almacenar el calor corporal y cederlo cuando sea necesario. Por lo tanto, en este documento se pretende dar una visión de las posibles aplicaciones de los materiales de cambio de fase que pueden ser de especial interés para las fuerzas armadas, y conseguir un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos.

Keywords: PCM; eficiencia energética; confort térmico; climatización.

---

1. Introducción

La necesidad humana de buscar un confort térmico, tanto en las viviendas donde se reside como en los centros de trabajo, ha generado un enorme interés por el desarrollo de sistemas que mantengan este bienestar. Estos sistemas requieren un consumo de energía notable, demanda que se está incrementando

continuamente debido al rápido crecimiento económico de la sociedad. De todo el consumo de energía actual, un porcentaje muy elevado se destina a la climatización, tanto de viviendas como de centros de trabajo. Por lo tanto, la edificación es responsable de una gran parte de la factura energética del país, además de la contaminación y las emisiones de efecto invernadero. Debido a lo cual, las políticas energéticas de los gobiernos, a nivel nacional e internacional, se están focalizando en reducir el consumo de energía por medio de una mayor eficiencia energética (tanto en la edificación como en otros campos). Las energías renovables se han posicionado como una de las principales alternativas para lograr estos objetivos. La energía solar fotovoltaica y la solar térmica cada vez tienen mayor presencia en el mix energético (Figura 1), aunque sin embargo, los combustibles fósiles y la energía nuclear siguen siendo las principales fuentes de energía [1]

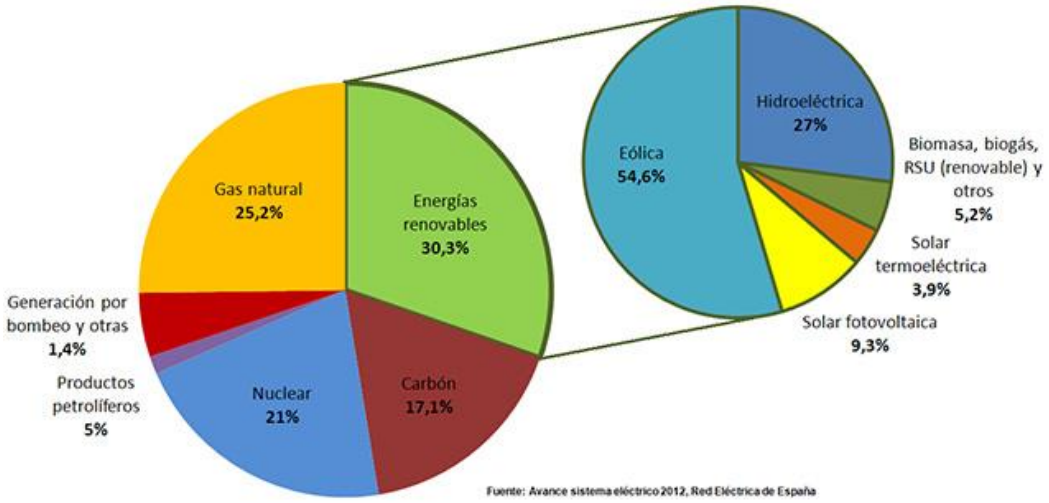


Figura 1. Suministro global de energía por tipo de combustible (Fuente: Avance sistema eléctrico 2012, Red Eléctrica de España).

Las fuentes de energía procedentes de combustibles fósiles son limitadas, y son las causantes esenciales de la contaminación ambiental y del efecto invernadero. Además, los residuos generados por la energía nuclear permanecen activos durante años [2]. El aumento de la eficiencia energética y la sostenibilidad se basan en una reducción en el consumo de energía y en mejoras en su almacenamiento, complementándose con numerosos estudios que se centran en el desarrollo de energías renovables, con el fin de mejorar el rendimiento de los sistemas de generación y acumulación de energía y tratar de conseguir, por ejemplo, edificios con cero emisiones [3]. Con los sistemas de acumulación de energía se puede reducir el consumo de combustibles de origen fósil y sus emisiones de efecto invernadero.

El aprovechamiento del calor sensible o calor latente de cambio de fase de un material es la esencia de los principales métodos de almacenamiento de energía en edificios, sistemas de agua caliente sanitaria (ACS), ropa, etc. [4]. Para ello, estos materiales almacenan y ceden energía térmica de una manera pasiva. Si se aprovecha el calor sensible debido a la variación de temperatura, se necesita un mayor volumen de material que si se aprovecha el calor latente de cambio de fase del material de almacenamiento, para almacenar la misma cantidad de energía [5]. Una consecuencia muy interesante del empleo de este tipo de materiales, denominados materiales de cambio de fase (PCM), es que permiten relacionar producción de energía con demanda aunque no coincidan temporalmente. Pero además de

estas aplicaciones desarrolladas inicialmente, estos materiales fueron derivando también hacia otros usos relacionados con la acumulación de energía para mantener la temperatura corporal, cocinar, etc. En este trabajo se relacionan las posibles aplicaciones de estos materiales en la Armada, y particularmente en la Escuela Naval Militar, con el fin de reducir el consumo energético de climatización y otras aplicaciones tales como mantener la temperatura corporal al incorporar PCM a las prendas de ropa, o incluso también a la ropa de cama.

2. Clasificación de los materiales de cambio de fase

Las sustancias que se ha estudiado como posibles materiales para acumular energía son numerosas, aunque pocas han llegado a comercializarse [6, 7]. De todas ellas, las más empleadas son aquellas que cambian de sólido a líquido, y viceversa. La Figura 2 muestra una de las diversas clasificaciones que se han realizado. De entre los materiales que emplean la propiedad del calor latente para almacenar energía, los más extendidos son aquellos que se basan en el cambio de fase líquido-sólido.

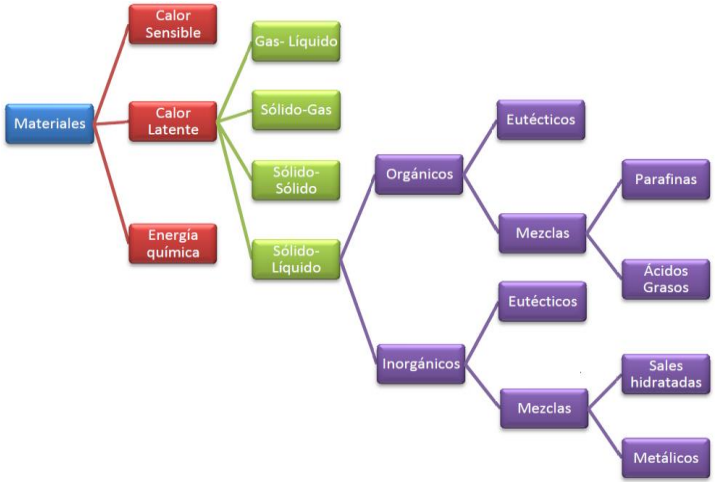


Figura 2. Clasificación de los materiales que se usan para la acumulación de energía [4].

Dentro de los materiales sólido-líquidos, se dividen en:

- PCM orgánicos. Son sustancias químicas basadas en carbono, hidrógeno y oxígeno y muchas veces con nitrógeno, azufre, fósforo, boro o halógenos. Entre sus principales ventajas destacan: amplio rango de temperaturas de fusión, no presentan segregación, son químicamente estables, presentan un elevado calor de fusión, no son reactivos y son compatibles con otros materiales empleados en la construcción. Entre estos compuestos cabe destacar las parafinas: mezclas de hidrocarburos saturados, habitualmente alcanos obtenidos durante el refinado del petróleo pero también pueden ser producidas sintéticamente.
- PCM inorgánicos. Las sustancias de almacenamiento inorgánicas presentan las siguientes características: gran almacenamiento de calor latente por unidad de volumen, bajo coste, alta disponibilidad, buena conductividad térmica, elevado calor de fusión o reducida variación de volumen. Como inconvenientes, se puede destacar su degradación después de ciertos ciclos de uso, pueden ser corrosivos con el recipiente contenedor y son inflamables.

Una de las alternativas más empleada es incorporar directamente estas sustancias que se están estudiando, a los materiales junto con los cuales se pretende que realice su función. Pero también es importante estudiar su compatibilidad, ya que pueden presentar problemas al estar en contacto directo con otros materiales. Por este motivo, habitualmente se emplean contenidos en un recipiente. Se dice entonces que el material está encapsulado. Estos envases se fabrican de materiales con propiedades acordes a las de los PCM. Se tiende cada vez más a la disminución de su volumen, con el fin de conseguir la mayor superficie de intercambio de calor posible. Los tamaños de estos depósitos pueden llegar a ser del orden de milímetros o incluso micrómetros. Los envases pueden ser esferas, tubos, etc. Con ello se consiguen aplicaciones en tejidos de ropa, materiales de construcción o circuitos de refrigeración. Según su tamaño se clasifican en macroencapsulados o microencapsulados [8].

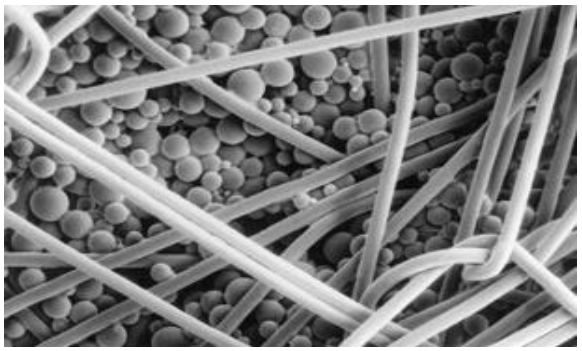


Figura 3. PCM microencapsulado rodeado de fibras de otro material.

3. Aplicaciones de los materiales de cambio de fase

La principal y más estudiada aplicación de los materiales de cambio de fase es la acumulación de energía para mantener el confort térmico en recintos tales como viviendas u oficinas, lo que se traduce en una reducción de la energía consumida por los equipos de climatización. Para ello, se combinan las propiedades de estos materiales con las características de los materiales de construcción. El calor sensible de un material se puede variar en función del volumen de material. A mayor espesor de una pared, por ejemplo, más calor puede almacenar. El aumento del volumen de material implica más cantidad de material empleado, y por lo tanto, más peso, un coste más elevado de la estructura, del transporte y del montaje, y mayor tiempo de construcción requerido [3]. Los edificios con estructura tradicional, debido a los materiales que emplean en su construcción, poseen una elevada inercia térmica. Esta arquitectura permite aprovechar este calor sensible del material. Sin embargo, almacenando la energía en forma de calor se consigue reducir el volumen de la estructura (espesor de las paredes). Se puede deducir entonces que una excelente forma de reducir el consumo energético de un edificio, ya sea para calefacción o refrigeración, consiste en la incorporación de materiales de cambio de fase en paredes, ventanas, techos o suelos. Este tipo de materiales posee una gran capacidad calorífica en un reducido rango de temperaturas y pueden actuar como reservas de energía a temperatura casi constante. Cuando aumenta la temperatura por encima de la de fusión, cambian de fase pasando de estado sólido a líquido almacenando energía en forma de calor. Y cuando desciende, ceden el calor al pasar otra vez a estado sólido. El principio de uso es muy simple, lo complicado consiste en evaluar la contribución de las cargas

debidas al calor almacenado en forma de calor latente para mejorar el rendimiento térmico en un edificio. Es decir, se incorpora este material para lograr construcciones más ligeras, que empleen menos material, compensando el PCM la pérdida de capacidad de almacenamiento de calor sensible del material al reducir su volumen [9, 10].

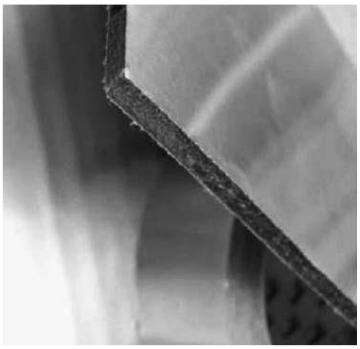


Figura 4. Imagen delas microcápsulas de PCM en un enlucido de yeso, obtenida en un microscopio electrónico [12].

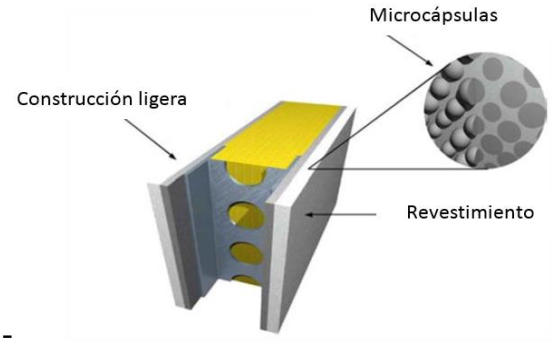


Figura 5. Vista esquemática de una pared de construcción ligera con microcápsulas de PCM en el revestimiento [13].

Los sistemas de acumulación de ACS son relativamente recientes, aunque están ganando una enorme difusión por su sencillez y bajo coste de fabricación y mantenimiento. Estos sistemas se basan en el uso de la energía solar para calentar el agua de un depósito [11]. Este depósito contiene un material de cambio de fase recubriendo las paredes, o bien macroencapsulado (Figura 6). Se consigue almacenar energía en este material cuando la temperatura del agua del tanque supera la de fusión del PCM, y cuando baja de esta temperatura, el PCM cede el calor al agua. Esto permite mantener la temperatura del agua de un depósito entre un cierto intervalo fuera de las horas de incidencia del sol, con el consiguiente ahorro de energía para calentarla fuera de las horas de incidencia del sol. En un recinto como la Escuela Naval Militar (ENM) de Marín, esta alternativa constituye un proyecto interesante desde el punto de vista de ahorro de energía. En la ENM, el número de usuarios de ACS es elevado (alumnos, oficiales, personal civil, etc.) y no se dispone de ningún tipo de instalación de aprovechamiento de energía solar, el calentamiento del agua se realiza íntegramente con calderas. Sería interesante hacer un estudio del espacio necesario para la instalación y del espacio que se podría disponer en la ENM para la instalación de los sistemas de acumulación, con la ventaja de que existen numerosas edificaciones que permitirían la instalación de paneles solares.

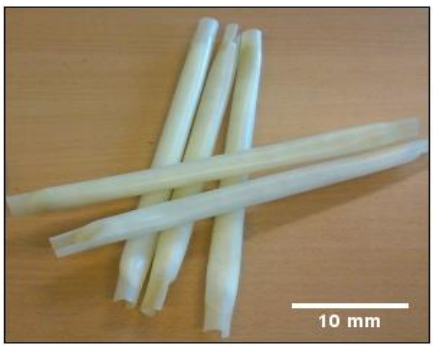


Figura 6. Material de cambio de fase macroencapsulado PCM PT 58 empleado en estudios de depósitos de agua realizados por el Grupo de Tecnología Energética de la Universidad de Vigo.

Otros trabajos han analizado el rendimiento de sistemas de calentamiento de aire por energía solar. Los principales objetivos fueron el estudio del efecto del calor latente y de la temperatura de fusión del PCM en el rendimiento térmico de dichos sistemas y el desarrollo de modelos experimentales de unidades de e almacenamiento de energía con PCM. De estos trabajos se concluye que la principal característica de selección del PCM debe ser la temperatura de cambio de fase, y complementariamente el calor latente del material [14, 15].

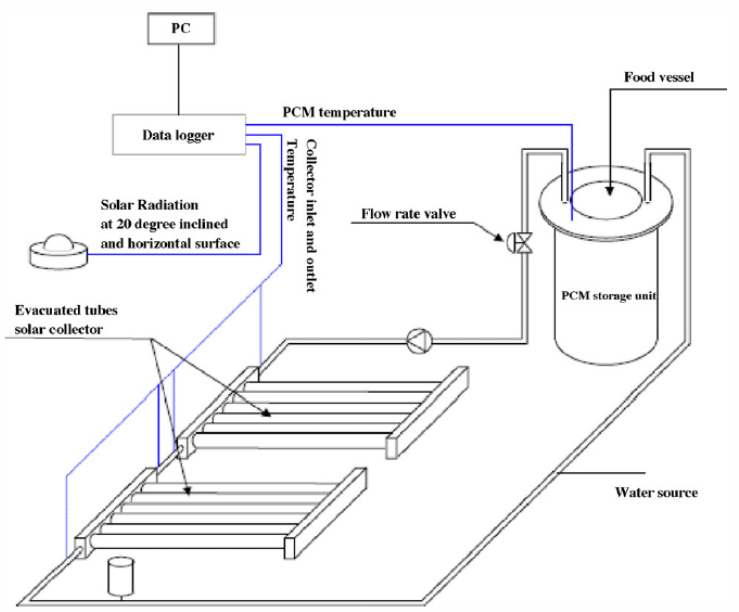


Figura 7. Cocina solar con un sistema de almacenamiento de energía por PCM [16].

Las cocinas solares (Figura 7) constituyen otra de las vías de investigación de los materiales de cambio de fase debido a su uso enormemente extendido. Estos sistemas no se pueden emplear al atardecer, así que lo que se pretende es almacenar energía para momentos en los que el sol ya no tenga gran presencia. Por ejemplo, la acumulación de energía solar durante el día podría ser aplicada para la elaboración de la comida de los Infantes de Marina cuando realizan sus prácticas de campo.

El sector textil también emplea los PCM microencapsulados para mejorar ciertas propiedades de sus productos. Estos materiales absorben o ceden calor en respuesta a cambios de temperatura del entorno.

Esta propiedad puede utilizarse para mejorar el nivel de confort de usuarios de ropa deportiva, equipos militares, ropa de cama, etc. Estos materiales también han sido utilizados en la sistemas de protección térmica patentados por la NASA para las naves espaciales. Inicialmente, su uso en el sector textil se reducía al revestimiento de telas y espumas (calzado, guantes, ropa, etc.). Absorben el exceso de calor del cuerpo, almacenándolo, para luego liberarlo cuando sea necesario. Las chaquetas de esquí son un ejemplo del uso de estos materiales. EL PCM absorbe el calor que cede el cuerpo fundiéndose, almacenándolo hasta que baja la temperatura del cuerpo debido a las condiciones ambientales, momento en el que lo desprende para regular la temperatura y mejorar el confort. Las prendas de ropa de uso militar, así como la ropa de cama, constituyen una vía de aplicación de estos materiales, ya que permitirían reducir su espesor, y por lo tanto su peso y su volumen [16].

4. Conclusiones

Las diversas tecnologías de almacenamiento de energía térmica mediante materiales de cambio de fase tienen múltiples aplicaciones de especial interés para la Armada, que pueden ser enormemente beneficiosas tanto económicamente como a nivel de confort, así como en aspectos medioambientales. Por lo que en este trabajo se presenta una visión general de aquellos aspectos relacionados con la acumulación de energía empleando PCM de los que la Armada, y la ENM, podría sacar partido.

La incorporación de PCM en la construcción es una consecuencia de una mayor concienciación sobre el cambio climático y sobre la reducción en el consumo de combustibles fósiles. Cada vez más edificios cuentan con esta tecnología para reducir el consumo de energía en climatización. La aplicación del PCM en revestidos de paredes o embebido en paredes de nueva creación, techos, etc., permitirían una mayor estabilización de la temperatura en el interior de la estancia, es decir, una menor variación entre las temperaturas máximas y mínimas en el interior. Esto permitiría reducir el consumo de energía del sistema de calefacción. Consumo que también se podría reducir aprovechando aunque sólo sea una parte del calor residual de los humos de las calderas de gasóleo utilizadas en el sistema de calefacción.

La producción de ACS es otra de las aplicaciones que el PCM permitiría reducir la factura energética. En la ENM estudian cada año más de 300 alumnos, además de personal que trabaja en el centro, ya sean oficiales, suboficiales, tropa y marinería y personal civil. Teniendo en cuenta que la mayoría de los alumnos residen dentro de la escuela, y los demás son también posibles usuarios de las instalaciones (incluidas las deportivas), el consumo de ACS es muy elevado. La instalación de un sistema de apoyo con energía solar térmica y PCM supondría una reducción considerable en el consumo de gasóleo.

La acumulación de energía en sistemas con PCM también puede ser de gran interés para los Infantes de Marina para la preparación de alimentos cocinados, para la cena o el desayuno, por ejemplo. Se dispone de energía acumulada para momentos de escasa radiación solar.

La conservación del calor corporal es otra de las aplicaciones de estos materiales que se está desarrollando. Cuando los Infantes realizan prácticas de campo, o cuando los Aspirantes o los Guardias Marinas realizan salidas en barco, pueden darse situaciones en las que el frío haga reducir la temperatura corporal hasta límites peligrosos para la salud. Estos materiales incorporados a la ropa permitirían mantener dicha temperatura en situaciones extremas, o en situaciones normales se emplearía ropa de menos espesor, más ligera y menos voluminosa, con lo cual la logística del transporte sería más sencilla y menos costosa.

5. Referencias

[1] F. Kuznik, D. David, K. Johannes and J. Roux, "A review on phase change materials integrated in building walls," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 15, pp. 379-391, 1, 2011.

[2] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 13, pp. 318-345, 2, 2009.

[3] M. Pomianowski, P. Heiselberg and Y. Zhang, "Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings," *Energy Build.,* vol. 67, pp. 56-69, 2013.

[4] B. Vidal Jimenez, "Modelización del cambio de fase sólido líquido. Aplicación a sistemas de acumulación de energía térmica," 2007.

[5] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications," *Appl. Therm. Eng.,* vol. 23, pp. 251-283, 2003.

[6] S. N. AL-Saadi and Z. (. Zhai, "Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 21, pp. 659-673, 5, 2013.

[7] A. Pasupathy, R. Velraj and R. V. Seeniraj, "Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 12, pp. 39-64, 1, 2008.

[8] P. J. C. Martínez, "TRANSFERENCIA DE CALOR AVANZADA MEDIANTE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE," 2012.

[9] C. Zhou, A. Kolmos and J. F. D. Nielsen, "A problem and project-based learning (PBL) approach to motivate group creativity in engineering education," *International Journal of Engineering Education,* vol. 28, pp. 3-16, 2012.

[10] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia and A. I. Fernández, "Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 15, pp. 1675-1695, 4, 2011.

[11] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée and D. Quenard, "Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material," *Energy Build.,* vol. 38, pp. 357-366, 4, 2006.

[12] G. Zhou, Y. Zhang, Q. Zhang, K. Lin and H. Di, "Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase-change material plates," *Appl. Energy,* vol. 84, pp. 1068-1077, 2007.

[13] D. Morrison and S. Abdel-Khalik, "Effects of phase-change energy storage on the performance of air-based and liquid-based solar heating systems," *Solar Energy,* vol. 20, pp. 57-67, 1978.

[14] P. Schossig, H. -. Henning, S. Gschwander and T. Haussmann, "Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials," *Solar Energy Mater. Solar Cells,* vol. 89, pp. 297-306, 11/15, 2005.

[15] J. Prakash, H. Garg and G. Datta, "A solar water heater with a built-in latent heat storage," *Energy Conversion and Management,* vol. 25, pp. 51-56, 1985.

[16] D. Buddhi, S. Sharma and A. Sharma, "Thermal performance evaluation of a latent heat storage unit for late evening cooking in a solar cooker having three reflectors," *Energy Conversion and Management,* vol. 44, pp. 809-817, 2003.

Alternativas para la reducción del consumo y las emisiones en motores de combustión

Álvarez, Feijoo, Miguel Ángel[1]*; Suárez García, Andrés[1]; Lareo Calviño, Guillermo[1]; Rey González, Guillermo[1]; Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier[1]

[1]Centro Universitario de la Defensa (CUD), Escuela Naval Militar (ENM), Plaza de España 2, 36920, Marín.
Emails: alvarezfeijoo@cud.uvigo.es (MAAF); asuarez@cud.uvigo.es (ASG); glareo@cud.uvigo.es (GLC); guillermo.rey@cud.uvigo.es (GRG); fjavierrodriguez@cud.uvigo.es (FJRR)

* Autor Principal y responsable del trabajo; Email: alvarezfeijoo@cud.uvigo.es (MAAF)

Abstract: El efecto invernadero es un problema medioambiental que cada vez está cobrando mayor relevancia por sus efectos, reflejados en numerosos estudios científicos. Debido a lo cual, está surgiendo una conciencia medioambiental que intenta reducir las emisiones de gases intervinientes en este efecto (CO, HC, NO_x, etc.). Uno de los primeros acuerdos en este sentido, es el Protocolo de Kioto al que se adhirieron numerosos países industrializados en 1997. Este acuerdo y los posteriores tienen como finalidad limitar las emisiones contaminantes. Pero hay otros factores que directamente están relacionados con estas emisiones y que, quizás, sean los que más peso tengan a la hora de limitar dichas emisiones.

Entre las principales fuentes de emisión de este tipo de gases, se encuentran los motores de combustión interna. Este tipo de motores se encuentran en vehículos, centrales térmicas, calderas, generadores, etc. Se emplean como fuentes de generación de energía que utilizan generalmente combustibles fósiles. Pero este tipo de combustibles son limitados y han sufrido una fuerte escalada de precios en los últimos años. Por este motivo, uno de los objetivos de muchos gobiernos nacionales es reducir su dependencia de combustibles fósiles para así reducir su factura energética. Y una manera de reducir este consumo interno de combustible consiste en emplear motores más eficientes. Es decir, cuanto mayor sea el rendimiento en el aprovechamiento de la energía de los combustibles, menor será el consumo y la dependencia del mismo. Por consiguiente, menor será el gasto energético del país y su factura, además de sus emisiones contaminantes de efecto invernadero.

Con estas premisas, se pretenden abordar alternativas para reducir consumos y emisiones en motores de combustión de la Escuela Naval Militar (ENM), desde generadores a motores de buques. Entre estas posibles alternativas destacan el uso de combustibles biodiésel, la implantación de sistemas de reducción de emisiones contaminantes basados en la recirculación de los gases de escape (sistemas EGR, etc.), sistemas de aprovechamiento de la energía de los gases de escape, etc. El uso de biodiésel puede ser una

opción muy interesante, debido a que posee unas propiedades similares al combustible fósil diésel y a la escasa inversión necesaria inicialmente puesto que no es necesaria ninguna modificación inicial en los motores.

Keywords: Biodiésel; eficiencia energética; efecto invernadero; consumo.

1. Introducción

Los combustibles fósiles constituyen una pieza clave para cualquier sociedad moderna ya que son una de las principales fuentes de energía. Constituyen un bien básico y estratégico. Su disponibilidad es de suma importancia para la actividad industrial y comercial, el crecimiento económico y el desarrollo social. La seguridad de suministro en cantidad y calidad, a precios competitivos, que tiene implicaciones directas sobre la inversión y la competitividad de un amplio espectro de sectores industriales.

La obtención de energía, independientemente de su origen, no había representado un problema a hasta hace bien poco. La sociedad estaba acostumbrada a tener la energía en cantidad suficiente, lo que permitió a las empresas seguir invirtiendo y creando puestos de trabajo. Pero el desequilibrio entre la oferta y la demanda de combustibles fósiles, la escalada continua en los precios y la elevada dependencia de algunos países, provocó un debate sobre el futuro de la energía mundial y el desarrollo de estrategias para asegurar el suministro de energía en el largo plazo a precios competitivos. Todo ello, teniendo en cuenta el entorno global actual y de acuerdo con criterios de responsabilidad ambiental.

Para asegurarse el abastecimiento energético, muchas sociedades han tendido a diversificar sus fuentes de energía para tratar de reducir su dependencia de los combustibles fósiles y también las emisiones de contaminantes, tendiendo hacia energías renovables. Por lo tanto, las inversiones en I + D han sido y continúan siendo fundamentales para resolver con garantías no sólo los problemas a corto y medio plazo, sino también a largo plazo, por lo que puede obtener una energía segura y sostenible.

Esta conciencia medioambiental en la población de la mayoría de los países occidentales se ha venido desarrollando desde hace ya unos años. Por ello, en 1997, los países industrializados firmaron el llamado "Protocolo de Kioto", para intentar reducir las emisiones de gases que intervienen en el efecto invernadero. Un elevado porcentaje de estas emisiones tiene su origen en la combustión producida en los motores de combustión interna de vehículos, motores marinos, generadores, etc. Estos generan diversos gases y partículas que son perjudiciales para el medio ambiente; y cuyas emisiones están limitadas por normativas a nivel europeo: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas e hidrocarburos inquemados (HC). La limitación de emisiones de los motores de combustión viene recogida en las distintas normativas, entre ellas la EURO, cada vez más restrictivas y menos perjudiciales sobre el equilibrio medioambiental.

La Armada es un importante consumidor de estos combustibles, en motores de vehículos, marinos, equipos generadores, etc. La dependencia energética es cada vez mayor, y se acentúa en las misiones. Además, el coste económico que supone el uso de combustibles fósiles para nuestras Fuerzas Armadas, en general, es cada día más significativo. Esta dependencia de los combustibles fósiles provoca

vulnerabilidades estratégicas, operacionales y tácticas. Las Fuerzas Armadas españolas son demasiado susceptibles al suministro y a los precios de un petróleo, que en muchos casos se produce en lugares remotos, o zonas de gran inestabilidad política. Por lo tanto, se tiende a buscar un modelo energético que permita tener una mayor independencia.

Partiendo de estas premisas, este documento pretende poner sobre la mesa la existencia de combustibles alternativos para los diversos motores utilizados en la Armada, que permitan reducir la dependencia energética de los equipos, además de un menor consumo que provocaría una mayor independencia de las unidades y menor logística de aprovisionamiento, además de menos emisiones contaminantes. Uno de los principales combustibles alternativos es el biodiésel. Es el sustituto alternativo del diésel convencional o gasóleo, proveniente de combustibles fósiles y, el cual representa más del 90% de combustible consumido en el Ejército Español [1, 2].

2. El biodiésel

El biodiésel es un combustible sustituto del diésel empleado en motores de combustión interna. Se obtiene a partir de plantas oleaginosas (soja, colza, girasol, etc.), aceites de cocina reciclados o grasas animales.

El proceso de fabricación del biodiésel permite obtener largas cadenas de mono alcalino esteres, o biodiésel, a partir de aceites y grasas, mediante un proceso denominado transesterificación. Por cada 100 kg de aceite se necesitan 10 kg de metanol, además de un catalizador (hidróxido de sodio NaOH o hidróxido de potasio KOH), para producir 100 kg de biodiésel y 10 kg de glicerina. La glicerina es un subproducto de la producción del biodiesel [3].

El aceite crudo de plantas o refinado, así como los aceites reciclados, por si solos no son biodiésel ya que no han sido procesados. Además, no es conveniente utilizarlos debido a las consecuencias negativas que pueden provocar en los motores. Está demostrado que el uso de estos aceites crudos en concentraciones de sólo un 10% o un 20% en motores de combustión interna, puede provocar sedimentación en el motor, gelificación del aceite del motor, problemas de lubricación, además de otros problemas de mantenimiento que reducen la vida del motor. Estos problemas son en su mayoría causados debido a que los aceites crudos tienen un índice de viscosidad mayor que el diésel proveniente de petróleo. Mediante el proceso de transesterificación, el combustible obtenido tiene una viscosidad similar al combustible diésel de origen fósil [4].

El biodiésel presenta una serie de ventajas respecto al diésel normal:

- Es renovable.
- Genera empleo local.
- La materia prima es abundante y fácil de conseguir.
- Permite tener una independencia energética.
- La energía obtenida es del orden de 3 veces la energía fósil empleada en su obtención.
- Se reducen las importaciones de petróleo y, por tanto, la factura energética.
- Menores emisiones contaminantes que los combustibles fósiles.
- Es biodegradable.

Aunque también presenta algunos inconvenientes a tener en cuenta:

- A largo plazo, aparecen sedimentos en el sistema de alimentación de combustible.
- La presencia de agua en el biodiésel da lugar a la aparición de microorganismos.
- Una elevada acidez puede atacar a los plásticos y juntas de los elementos del sistema de alimentación.
- Se puede mezclar con el aceite del motor, disminuyendo las propiedades lubricantes del aceite.

La nomenclatura de estos combustibles se basa en su porcentaje en la mezcla. Así, un B0 es un combustible 100% fósil, un B100 es un combustible 100% biodiésel, un B30 es un combustible con un 70% de combustible fósil y un 30% de biodiésel, etc.

El uso de biodiésel reduce la potencia del motor en un 8% aproximadamente, debido a que tiene menos potencia energética que el diésel. Las propiedades de arranque en frío del biodiésel son inferiores a las de los gasóleos normales, por lo que si la temperatura ambiente es demasiado baja, el combustible debe ser calentado antes o durante su paso por el filtro. Para llevar a cabo este precalentamiento existen calentadores eléctricos de combustible que se instalan en el conducto de admisión previos al filtro de combustible. Estos calentadores permiten que el biodiésel a bajas temperaturas no obstruya los poros del filtro de combustible. Estos calentadores eléctricos irían instalados en el conducto que conecta la bomba de combustible con el filtro de combustible, siempre justo delante del filtro de combustible. También se recomienda el montaje de un prefiltro separador de agua [5].

3. Instalación experimental

Para estudiar el consumo y emisiones del biodiésel, se ha empleado un grupo electrógeno GESAN DP9 (propiedades en la Tabla 1).

Tabla 1. Ficha técnica del motor del grupo electrógeno.

Perkins 403C-11G ElectropaK	
Nº de cilindros	3
Cilindrada [cm^3]	1.131
Aspiración	Atmosférica
Refrigeración	Líquida
Régimen de giro [*rpm*]	± 1.500
Potencia nominal [*kW*]	8,4

La pequeña planta experimental empleada (Figura 1), ubicada en el Laboratorio de Máquinas y Motores Térmicos en la Escuela de Ingenieros Industriales de Vigo, está compuesta por los siguientes elementos:

- Grupo electrógeno.
- Cuadro de mandos.
- Aerotermo de 15 kW (para generar la carga al equipo).
- Testo 335 (para medir las emisiones).
- Opacímetro TEXA DSM (para medir la opacidad de los humos).

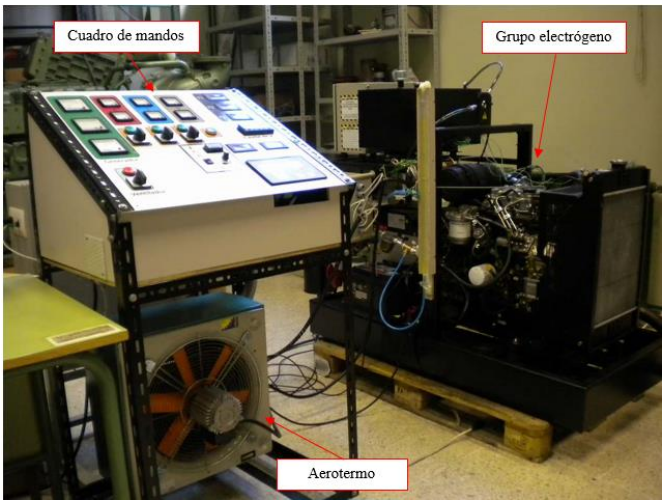


Figura 1. Planta experimental.

El combustible fósil empleado es el Diésel Repsol e+. El biodiésel utilizado en la realización de los ensayos de B100 y B50 fue un biodiésel de soja B100 suministrado por la empresa Bgal. El B50 se obtuvo mezclando al 50% B100 y Repsol e+. En la Tabla 2 se reflejan algunas de sus propiedades.

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de los combustibles comerciales disponibles.

	Repsol e+	**B100**
Densidad a 15ºC [g/cm^3]	0,820 - 0,845	0,885
Inflamabilidad [º C]	>55	165
Viscosidad cinemática a 40ºC [cSt]	2,0 - 4,5	4,25
Índice de cetano	-	54

4. Estudio del consumo y emisiones de un generador

En las Tablas 3, 4 y 5 se muestran los resultados de emisiones obtenidos en los ensayos, con diferentes cargas aplicadas al motor.

Tabla 3. Resultados de ensayos con combustible Repsol e+.

	CARGA [kW]				
	0	**1,5**	**3**	**4,5**	**6**
O_2 [%]	17,79%	16,32%	14,47%	12,17%	9,47%
CO_2 [%]	2,35%	3,44%	4,81%	6,51%	8,50%
λ	6,16	4,25	3,07	2,29	1,77
CO [ppm]	232	149	126	132	184
NO [ppm]	70	140	204	261	319
NOx [ppm]	74	147	214	274	335
Opacidad K [m^{-1}]	0,03	0,06	0,11	0,16	0,19

Tabla 4. Resultados de ensayos con combustible Biodiésel B50.

	CARGA [kW]				
	0	**1,5**	**3**	**4,5**	**6**
O_2 [%]	17,67%	16,09%	14,18%	11,86%	9,20%
CO_2 [%]	2,64%	3,87%	5,34%	7,11%	9,08%
λ	5,95	4,06	2,94	2,21	1,73
CO [ppm]	167	128	120	150	206
NO [ppm]	82	141	201	275	336
NOx [ppm]	86	148	211	289	353
Opacidad K [m^{-1}]	0,00	0,05	0,08	0,10	0,15

Tabla 5. Resultados de ensayos con combustible Biodiésel B100.

	CARGA [kW]				
	0	**1,5**	**3**	**4,5**	**6**
O_2 [%]	17,80%	16,19%	14,33%	12,06%	9,52%
CO_2 [%]	2,55%	3,81%	5,24%	6,97%	8,90%
λ	6,18	4,14	3,01	2,26	1,77
CO [ppm]	185	160	131	147	201
NO [ppm]	71	118	175	280	347
NOx [ppm]	75	124	184	294	364
Opacidad K [m^{-1}]	0,00	0,03	0,05	0,06	0,08

Una variable que se debe tener en cuenta es que el motor lleva instalado un sistema de recirculación de los gases de escape (EGR). Este sistema permite reducir la formación de NO_x al alcanzarse una temperatura máxima menor en la cámara de combustión. Cuando el motor está trabajando en vacío (Figura 2) se observa que las emisiones de contaminantes son muy similares para todos los combustibles, siendo sensiblemente superiores las emisiones de CO del Repsol e+. También se comprueba que no hay relación entre emisiones de CO y NO_x, y concentración de partículas. En cuanto a la cantidad de hollín presente en los humos, reflejada por el tamaño de los círculos de las figuras 2 y 3, se aprecia que los valores más elevados se obtienen cuando el motor está funcionando con Repsol e+, y también cuanto mayor es la recirculación de los gases de escape. Para 6 kW (Figura 3), las emisiones de CO y NOx por kWh son notablemente inferiores respecto al motor sin carga.

Para medir el consumo de combustible, se empleó una bureta que se intercaló en el sistema de alimentación con la que se tomaba el tiempo que tardaba en consumirse el volumen de combustible de la bureta.

El consumo específico de combustible indica la eficiencia que tiene un motor para transformar carburante en energía mecánica, y se expresa como la cantidad de carburante que hay que consumir (en gramos) para obtener una determinada potencia en kilovatios (kW) durante una hora (g/kWh). Según los datos obtenidos, se observa que el consumo específico de combustible para una potencia dada aumenta

con el porcentaje de biodiésel presente en el carburante, y permanece prácticamente invariable si se comparan los dos gasóleos provenientes del petróleo. La explicación a este fenómeno se debe a la diferencia de poder calorífico inferior (PCI) de los combustibles, siendo inferior en el biodiesel. Por otro lado, se aprecia que el consumo específico de combustible disminuye notablemente al aumentar el grado de carga, con lo que se eleva el rendimiento del motor. Es decir, cuanta más carga se demanda al motor, menos combustible se necesita para obtener cada kW.

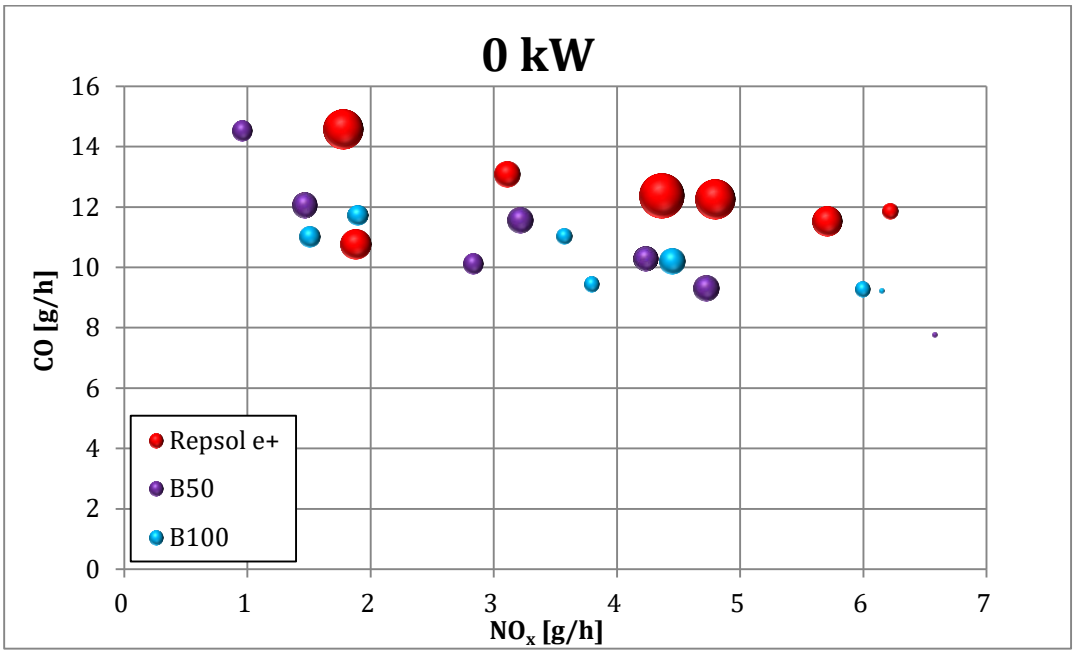


Figura 2. CO - NO_x - Concentración de partículas para 0 kW de carga.

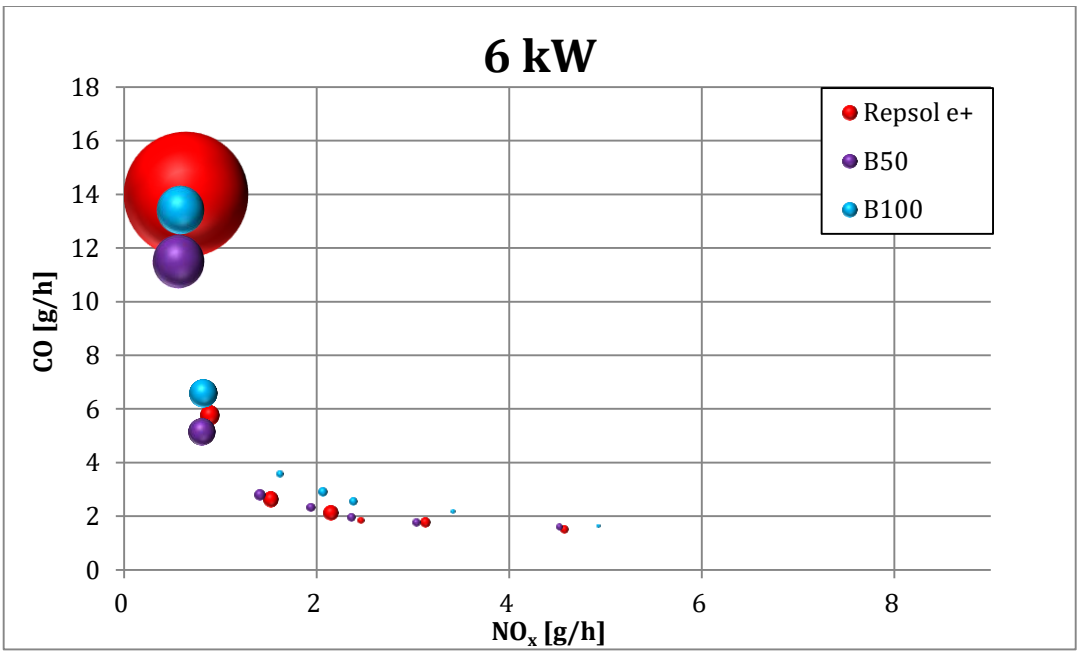


Figura 3. CO - NO_x - Concentración de partículas para 6 kW de carga.

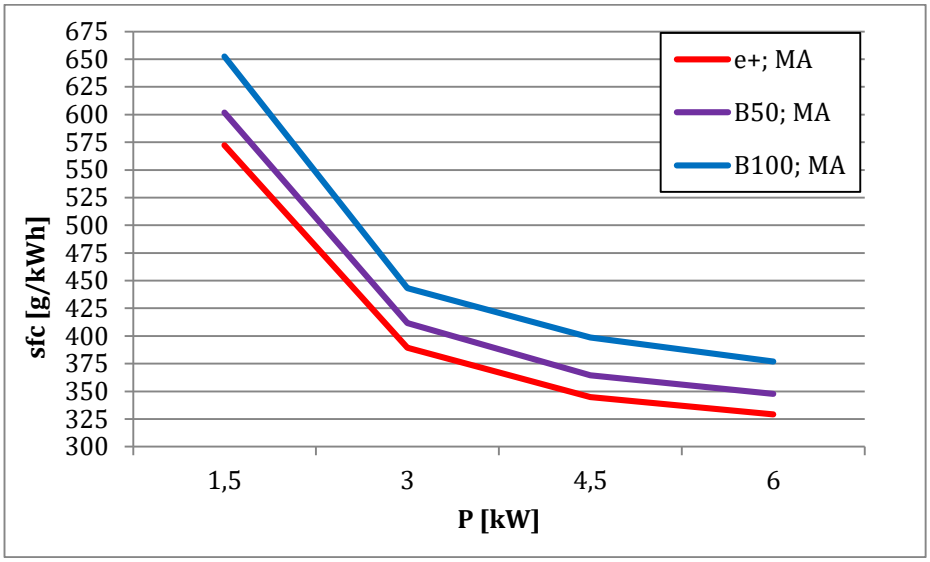


Figura 4. Consumo específico de combustible (sfc) frente a la potencia (P).

4. Conclusiones

El exceso de aire y el porcentaje de oxígeno en los humos son independientes del tipo de combustible.

De los datos obtenidos en estos ensayos se deduce que un mayor porcentaje de biodiésel en el combustible provoca una mayor emisión de CO y una menor producción de NO_x. Esto contradice los resultados de otros estudios realizados en este ámbito. El motivo se atribuye a que el motor tiene una bomba de inyección mecánica que está ajustada para trabajar con gasóleos provenientes del petróleo. Con un correcto ajuste de la inyección se podrían obtener unos valores más coherentes.

El uso de biodiésel produce una menor cantidad de partículas, que se hace más patente cuánto mayor es la carga y la recirculación de gases. En este fenómeno tiene un papel clave el oxígeno extra aportado por los biocombustibles. Una correcta combinación de biodiésel y el uso de sistemas de recirculación de gases de escape podrían reducir simultáneamente las emisiones de NO_x y hollín, manteniendo valores muy aceptables de CO.

El consumo específico de combustible se ve aumentado considerablemente al elevar el contenido de biodiésel en los carburantes, debido a su menor PCI.

5. Referencias

[1] C. Carraretto, A. Macor, A. Mirandola, A. Stoppato and S. Tonon, "Biodiesel as alternative fuel: experimental analysis and energetic evaluations," *Energy*, vol. 29, pp. 2195-2211, 2004.

[2] M. S. Graboski and R. L. McCormick, "Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 24, pp. 125-164, 1998.

[3] J. Hill, E. Nelson, D. Tilman, S. Polasky and D. Tiffany, "Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 103, pp. 11206-11210, Jul 25, 2006.

[4] A. K. Agarwal, "Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 33, pp. 233-271, 2007.

[5] A. Monyem, J. Van Gerpen and M. Canakcl, "The effect of timing and oxidation on emissions from biodiesel–fueled engines," *Carbon*, vol. 44, pp. 35-42, 2001.

Extracción y análisis de bioaceite pirolítico a partir de biomasa: una fuente de energía alternativa para motores a reacción, diésel y quemadores

Gutiérrez Bravo, Javier [1,*], González González, Juan Félix [2], Galán González, Carlos Alberto [2], García Pérez, Ana Isabel [3], Gonzalo de Grado, Jesús [3] y Suárez Mejías, Rocío [2]

[1] Academia Básica del Aire. Ejército del Aire. La Virgen del Camino, 24198-León. Email: *jgutbra@ea.mde.es* (J.G.B.)

[2] Departamento de Física Aplicada. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Extremadura. 06071-Badajoz. Emails: *jfelixgg@unex.es* (J.F.G.G.), *cgalango@unex.es* (C.A.G.G.)

[3] Departamento de Química y Física Aplicadas. Escuela de Ingenierías Industrial e Informática. Universidad de León. 24071-León. Emails: *ana.garcia@unileon.es* (A.I.G.P.), *jesus.gonzalo@unileon.es* (J.G.G.)

***** Autor Principal y responsable del trabajo: *jgutbra@ea.mde.es* (J.G.B.)

Abstract: La mayoría de los procesos que convierten biomasa a combustibles líquidos comienzan con un proceso de pirólisis seguido de craqueo catalítico para mejorar los bioaceites líquidos resultantes. Pocos estudios se han enfocado sobre el uso de los bioaceites generados en el proceso de pirólisis, que involucran menores tasas de polución que otras alternativas energéticas. En este trabajo se presenta un Proyecto de Tesis Doctoral registrado en el Programa de Doctorado de Ciencia y Tecnologías del Medio Ambiente y Procesos de la Universidad de León que involucra, además de a ésta, a las Universidades de Extremadura y de Calgary (Canadá), así como a la Academia Básica del Aire. Se centra en el aprovechamiento de bioaceites pirolíticos obtenidos a partir de diferentes biomasas para el estudio de mezclas con queroseno en motores a reacción y en turbinas de gas, incluyendo resultados de pruebas sobre motor a reacción a escala del mencionado Proyecto previas a la optimización del biocombustible extraído. Se valorará el uso análogo del biocombustible en turbinas de gas para co-generación, así como también en otros dispositivos térmicos que utilicen queroseno o gasóleo como combustible principal como pueden ser motores diésel y calderas. Se contemplará además un estudio sobre la viabilidad de incluir un proceso de extracción con CO2 supercrítico como método alternativo, habida cuenta de su nulo impacto medioambiental, de la conservación de las propiedades del extracto y de la posibilidad de maximizar el rendimiento total del proceso de extracción de bioaceite.

Keywords: biocombustible; propulsión; sostenibilidad, energías renovables; cogeneración.

---

1. Introducción

El elevado coste de los combustibles fósiles y sus efectos en la contaminación ambiental han llevado a algunos países a intensificar la búsqueda de combustibles y fuentes de energía alternativos, de modo que sean más baratos, que permitan reducir las emisiones de gases contaminantes y que sean energéticamente rentables. La biomasa es, precisamente, uno de los recursos renovables que permite la obtención de biocombustibles.

Además de la considerable autonomía en cuanto al consumo energético que aportaría a España el uso de biocombustibles de fabricación propia, la posible implicación del Ministerio de Defensa en el desarrollo de biocombustibles para autoabastecimiento y desempeño de sus funciones de una manera sostenible demostraría públicamente su compromiso indiscutible con el medio ambiente.

La mayoría de los procesos de transformación de biomasa en combustibles líquidos comienzan con la pirólisis (descomposición térmica de un material en atmósfera inerte resultando tres fracciones: sólida, líquida y gaseosa), seguida por craqueo catalítico para mejorar los bioaceites líquidos resultantes. Pocos estudios se han enfocado sobre el uso de catalizadores para el craqueo de biomasa para generar productos químicos de interés, así como sobre el uso de los bioaceites generados en el proceso de pirólisis. Además, la industria conservante de la madera en los países desarrollados está interesada en encontrar productos derivados de los residuos a bajo coste y medioambientalmente aceptables, que puedan ser sustitutos de los combustibles actuales o sean substancias químicas de interés industrial [2]. La descomposición pirolítica de madera produce un gran número de productos químicos, algunos de los cuales pueden ser usados como sustitutos de los combustibles convencionales.

El bioaceite pirolítico, como combustible limpio, tiene varias ventajas medioambientales sobre los combustibles fósiles. Los bioaceites son CO2/GHG neutros. Por tanto, pueden generar créditos de CO2. No producen prácticamente emisiones de SOx ya que las plantas de biomasa contienen insignificantes cantidades de azufre. El bioaceite, por tanto, no está sujeto a tasas de SOx. Los bioaceites generan menos del 50% de las emisiones de NOx que el diésel en una turbina de gas.

Por otra parte, el bioaceite producido localmente puede ser generado en países con grandes volúmenes de residuos orgánicos. Así, los biocombustibles son más limpios y son causa de menores tasas de polución [3,4]. La conversión termoquímica de biomasa (pirólisis, gasificación, combustión) se presenta como una prometedora forma de energía no nuclear en un futuro próximo [5].

Los resultados obtenidos de los análisis del bioaceite obtenido nos dan una idea en línea con lo esperado, por lo que proseguimos con la prueba en una aplicación práctica como es un motor a reacción para ensayos. Dicho motor, nos valdrá para poder comparar los datos obtenidos usando diferentes mezclas de bioaceite con queroseno (al 5%, 10% y 20%) con el patrón de medida que será el rendimiento obtenido utilizando 100% queroseno. Debido a la modesta disponibilidad de recursos y la fabricación artesanal del motor para ensayos, se espera poder adquirir un banco de pruebas y una microturbina de flujo axial para realizar las pruebas con la mayor exactitud posible.

Se midieron diferentes parámetros durante las pruebas en el motor a reacción:

-*Empuje*: el motor construido no dispone de tobera, por lo que no está optimizado para esta prueba pero sí que nos dará una idea de la posible diferencia de rendimiento.

-*Presión de combustible*: al utilizar un inyector continuo, el régimen de funcionamiento del motor se puede variar dependiendo de la presión de combustible, lo que está en relación directa con el caudal de combustible que se introduce al motor y, en consecuencia, con la potencia que se obtiene. Este parámetro se va a tener en cuenta para garantizar que durante las pruebas con las diferentes

mezclas se mantiene el consumo y las condiciones de funcionamiento, para poder valorar las diferencias de rendimiento del motor.

-*Presión del compresor*: teniendo el dato del consumo de combustible, divergencias en cuanto a la presión que está produciendo el compresor (a su vez movido por la turbina que obtiene su impulso gracias a al combustible quemado) nos indicarían una deficiencia en la combustión, yendo en línea con variaciones del empuje total al estar relacionados ambos parámetros con el consumo de aire del motor.

-*Temperatura de gases de escape (EGT Exhaust Gas Temperature):* Nos da una idea de la combustión del motor, y sus variaciones indicarán diferencias en la relación aire-combustible óptima.

Se estudiará el desempeño del bioaceite en mecanismos que requieren muchas menos exigencias en cuanto al combustible a utilizar, como son las calderas de calefacción y ACS (mayores tolerancias de los mecanismos y condiciones de funcionamiento menos hostiles) por lo que se podría reducir el total de emisiones contaminantes de otros aprovechamientos.

Además del estudio en cuestión, en el supuesto de que las pruebas de extracción con CO2 supercrítico fuesen satisfactorias ello daría lugar a una futura línea de investigación para obtener el biocombustible de un modo más limpio y eficiente.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

El objetivo principal de este estudio es la prueba del bioaceite en el motor a reacción. Una vez obtenido el bioacetie pirolítico, se realiza la extracción de la fracción que nos es de interés con disolventes orgánicos (éter etílico y acetato de etilo), y se procede a realizar una valoración previa a la prueba real en el motor a escala de laboratorio. Ver procedimiento global en la Figura 1.

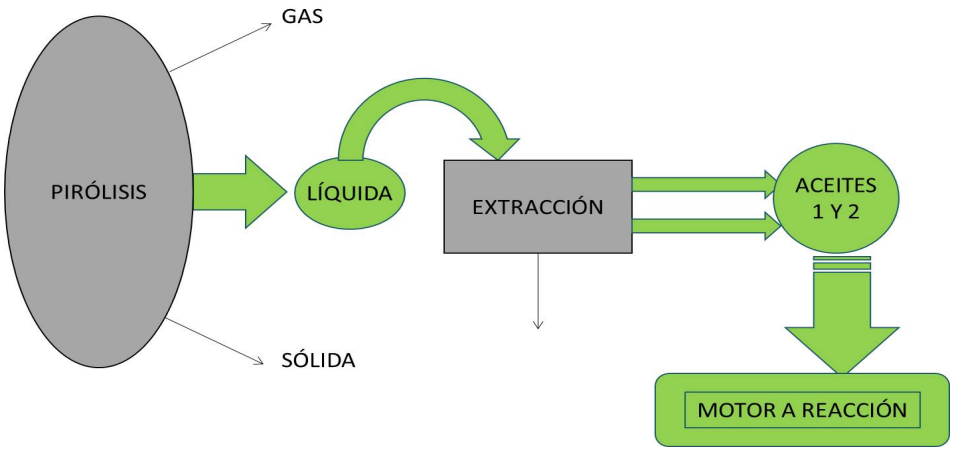


Figura 1. Procedimiento experimental de la extracción con disolventes orgánicos

En cuanto a los ensayos en el motor a reacción a escala, éstos se realizan una vez el motor ha alcanzado las condiciones óptimas de funcionamiento, en el mismo día para que no influyan las posibles variaciones atmosféricas. Se disponen de cuatro recipientes con 4 litro cada uno de combustible, el primero de ellos es queroseno al 100%, el resto son mezclas de queroseno y bioaceite al 5%, 10% y 20%.

Primeramente se arranca el motor y se le permite llegar a la temperatura de funcionamiento, monitorizando siempre las presiones y temperaturas del sistema de lubricación para asegurar que no va a producir fallos mecánicos. Una vez en ese punto, se pone a máximo régimen (máxima presión de combustible) y se mide la presión del compresor, el empuje y la temperatura de los gases de escape.

Estas mismas mediciones se hacen con cada una de las mezclas restantes, para poder analizar las diferencias de rendimiento resultantes.

3. Resultados y discusión

3.1. Obtención de biocombustible y análisis previo.

Como resultado de la pirólisis de cardo y hueso de aceituna a 700 ºC durante una hora se obtiene más de una tercera parte en masa de bioaceites del total pirolizado. Esta fracción líquida obtenida se somete a un proceso de extracción con disolventes orgánicos para separar la fase oleosa (bioaceite, fase de interés) de la fase acuosa, la cual se encuentra en elevada proporción en dicha fracción líquida. Se obtiene un rendimiento del 34.72%. Se estudiará la posibilidad de realizar la extracción con CO_2 supercrítico para mejorar el rendimiento de extracción global a la vez de minimizar la presencia de disolventes en el producto.

3.2. Ensayos en motor a reacción.

Para llevar a cabo el estudio de los diferentes combustibles se realizan ensayos en un motor a reacción de fabricación propia de compresor y turbina centrífugos (turbocompresor de automoción), encendido de chispa continua y alimentación de combustible por inyector mecánico. La cámara de combustión se ha diseñado con dos zonas diferenciadas para permitir una mayor riqueza de combustible en la zona central con el objetivo de mantener la llama, y una zona de circulación de aire del compresor exteriormente para refrigerar las paredes y permitir un caudal total de aire mayor, así como una mezcla progresiva de este aire con la mezcla rica central antes de la entrada a la turbina.

Las pruebas se han realizado con unas condiciones de temperatura ambiente de 20 ºC y presión atmosférica 1015 mbar, con el motor en ligera pendiente para evitar desplazamientos excesivos (motivo del bajo empuje, además de no poseer tobera específica para optimizar dicho parámetro). La presión de combustible a máxima potencia ha sido de 6 bar, lo que da un caudal de combustible de 262.5 cc/min para el inyector utilizado. Teniendo el combustible una densidad de 0.82 kg/l, el caudal en unidades de masa es 0.0036 kg/s en unidades del SI.

Con los datos anteriores y los recogidos en las pruebas (Tabla 1), obtenemos que la eficiencia del turbocompresor se mantiene en el entorno del 74%, con una velocidad de giro rondando las 200.000 rpm y un caudal de aire cercano a 12 lb/min, que equivale a 0.091 kg/s en unidades del SI. Para tomar referencias, estos valores corresponden a una potencia aproximada de 100cv para el uso de este turbocompresor en automoción.

Porcentaje Bioaceite	0 %	5 %	10 %	20 %
Presión Compresor	1,65 bar	1,65 bar	1,60 bar	1,60 bar
EGT	803 ºC	803 ºC	801 ºC	800 ºC
Empuje	475 g	475 g	470 g	465 g

Tabla 1. Resultados pruebas en motor a reacción, a 20 ºC y 1,015 bar atmosféricos.

Una vez realizadas las pruebas se procede al desmontaje para comprobar el estado de los diferentes elementos de interés, de lo que se pueden sacar las siguientes CONCLUSIONES:

- No quedan residuos carbonosos en la parte caliente del motor.

- La bujía sale limpia y color café, indicando una correcta combustión de la mezcla.
- El filtro de la bomba de combustible contiene impurezas debido a la poca miscibilidad del bioaceite.
- Los resultados a priori son satisfactorios, con un rendimiento similar al obtenido con queroseno puro, incluso con la mezcla con un porcentaje de bioaceite del 20% sobre el total (Tabla 1).

Obtenidos estos resultados, la siguiente investigación que se llevará a cabo será una mejora de la miscibilidad del bioaceite mediante el uso de tensioactivos, se hará un estudio para realizar la extracción de la fracción de interés con CO_2 supercrítico (ver Figura 2) para optimizar el proceso lo que presenta una serie de ventajas añadidas:

- Es seguro para el medio ambiente y no es tóxico para el ser humano.
- Disponible fácilmente en una pureza >99,9% y de forma barata.
- No son necesarias condiciones extremas de trabajo para conseguir el estado supercrítico.
- No genera líquidos residuales y es eliminable fácilmente por evaporación (100% de sequedad).
- No interfiere con el agua de la fracción líquida, pues es relativamente inerte y no oxidable.
- Es un disolvente débil para moléculas de elevado peso molecular, pudiendo usar esta característica a nuestro favor si se requiere la separación de distintas sustancias por pesos.
- Los hidrocarburos pueden ser separados de otros según la longitud de cadena modificando las condiciones de P y T

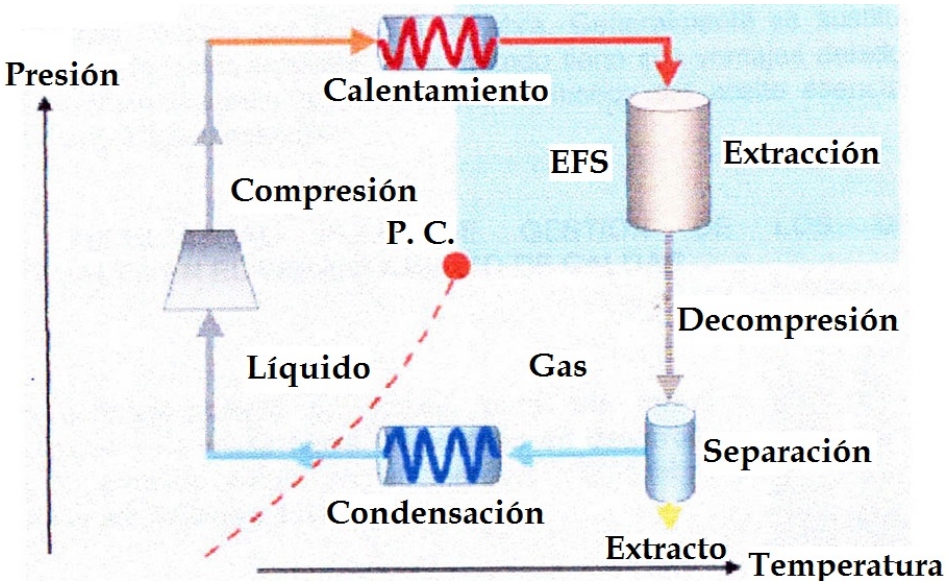


Figura 2. Proceso de extracción con fluidos supercríticos (sena.edu.co).

Finalmente se realizará un craqueo catalítico a la fracción restante más pesada para obtener así mayor cantidad de bioaceite dentro del rango de puntos de destilación que nos son de interés del total de la masa pirolizada, lo que mejorará el rendimiento global de la extracción.

Además, se comprobará la viabilidad del uso de bioaceite pirolítico en motores diésel y calderas (esto último como posible solución también para los eficientes ciclos combinados, Figura 3), dispositivos normalmente con menores exigencias en cuanto a propiedades del combustible que los motores a reacción.

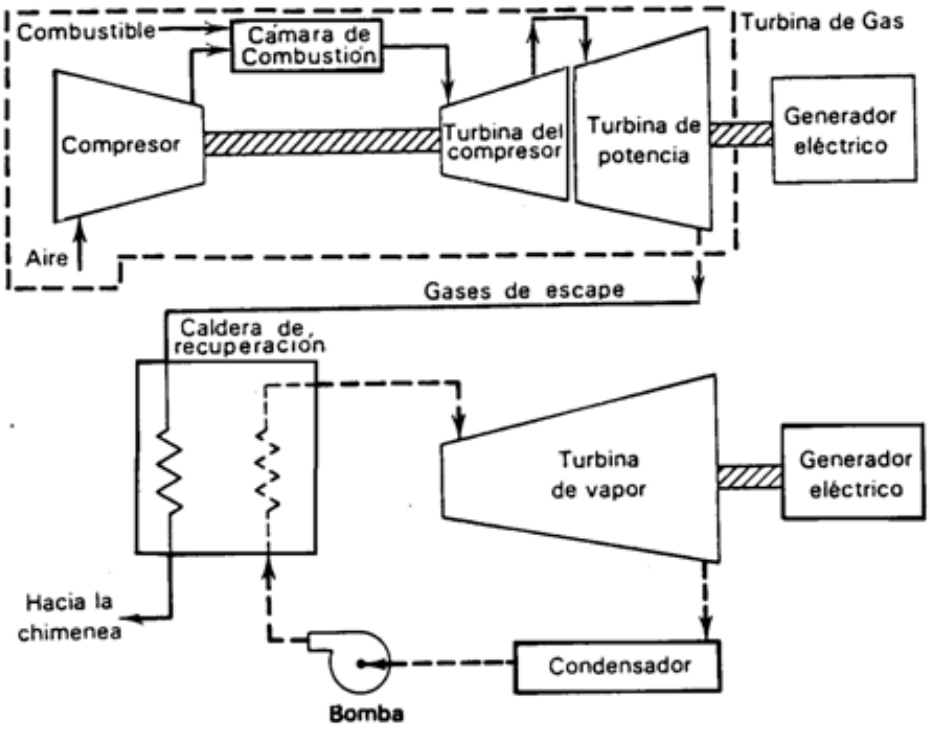


Figura 3. Ciclo combinado mediante caldera de recuperación (termodispositivos.com.es).

Agradecimientos

Los autores desean hacer constar su agradecimiento al Dr. Nader Mahinpey, del Departamento de Ingeniería Química y del Petróleo de la Universidad de Calgary (Alberta, Canadá), por su interés y predisposición en que el Doctorando desarrolle alguna fase del presente trabajo en el seno del Grupo de Investigación *Energy and Environment Research Group*, bajo su dirección en la *Schulich School of Engineering*. Asimismo, a Dª Melissa Valdés Vázquez, de la Agregaduría de Educación de la Embajada de España en Canadá, por el inestimable apoyo institucional en lo concerniente a las relaciones con el entorno universitario de la provincia de Alberta. Finalmente, a la Academia Básica del Aire del Ejército del Aire por su predisposición y colaboración efectiva para facilitar la planificación y el desarrollo de este Proyecto.

Referencias

1. Mohan, D.; Pittman, C.U. Jr; Steele, P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy and Fuels* **2006**, *20*, 848-889.
2. Gutiérrez Bravo, J.; Suárez Megías, R.; Galán González, C. A.; González González, J. F.; González Valenzuela, F. J. Analysis and extraction of bio-oil by biomass pirólisis: an alternative fuel source for jet engines and gas turbines; International Congress on Water, Waste and Energy Managemen, Oporto, Portugal, **2014**; pp 244.
3. Maniatis K., Buekens A, Bridgwater A.V., Eds.; Elsevier Applied Science: Londres, Reino Unido, **1989**; pp. 326-333.
4. Putun, E. *Energy Sources* **2002**, *24(3)*, 275-285
5. Gutiérrez Bravo, J.; Galán González, C. A.; González González, J. F.; García Pérez, A. I.; Gonzalo de Grado, J. Proyecto de aprovechamiento de bioaceite pirolítico en motores a reacción y turbinas de gas: aspectos preliminares; Congreso en DESE I+D, Madrid, España, **2013**.
6. Bridgwater, A.V. *Chem. Eng. J.* **2003**, *91*, 87-102.
7. Amen-Chen, C.; Pakdel, H.; Roy, C. *Biomass Bioenergy* **2001**, *79*, 277-299.

8. Boocock, D.G.B.; Konar, S.K.; Glaser, G. The formation of petrodiesel by the pyrolysis of fatty acid methyl esters over activated alumina. In *Progress in Thermochemical Biomass Con*V*ersion*; Bridgwater, A.V., Ed.; Blackwell Science: Londres, Reino Unido, 2001; pp. 1525-1539.
9. Lang, X.; Dalai, A.K.; Bakhshi, N.N.; Reaney, M.J.; Hertz, P.B. *Bioresour. Technol.* **2001**, *80 (1)*, 53-62.
10. Ikura, M.; Stanciulescu, M.; Hogan, E. *Biomass Bioenergy* **2003**, *24*, 221-232.
11. Strenziok, R.; Hansen, U.; Kunstner, H. Combustion of bio-oil in a gas turbine. In *Progress in Thermochemical Biomass Con*V*ersion*; Bridgwater, A.V., Ed.; Blackwell Science: Londres, Reino Unido, 2001; pp. 1452-1458.
12. Chiaramonti, D.; Bonini, M.; Fratini, E.; Tondi, G.; Gartner, K.; Bridgwater, A.V.; Grimm, H.P.; Soldaini, I.; Webster, A.; Baglioni, P. *Biomass Bioenergy* **2003**, *25 (1)*, 85-99.
13. Chiaramonti, D.; Bonini, M.; Fratini, E.; Tondi, G.; Gartner, K.; Bridgwater, A.V.; Grimm, H.P.; Soldaini, I.; Webster, A.; Baglioni, P. *Biomass Bioenergy* **2003**, *25 (1)*, 101-111.
14. Guéhenneux, B.G.P.; Brothier, M.; Poletiko, C.; Boissonnet, G. *Fuel* **2005**, *84 (6)*, 733-739.
15. Elliott, D.C.; Sealock, J.L.J. Low-temperature gasification of biomass under pressure. In *Fundamentals of Thermochemical Biomass Con*V*ersion*; Overend, R.P., Milne, T.A., Mudge, L.K., Eds.; Elsevier: Londres, Reino Unido, 1985; pp. 937-950.
16. Delgado, J.; Aznar, M.P.; Corella, J. *Ind. Eng. Chem. Res*. **1997**, *36*, 1535-1543.
17. Antal, M.J. Jr. Synthesis gas production from organic wastes by pyrolysis/steam reforming. In *Energy from Biomass and Wastes*; Klass, D.L., Ed.; Institute of Gas Technology (IGT): Chicago, Estados Unidos, 1978, pp. 495-524.
18. Antal, M.J. Jr. A review of the vapor phase pyrolysis of biomass derived volatile matter. In *Fundamentals of Thermochemical Biomass Con*V*ersion*; Overend, T.A., Milne, R.P., Mudge, L.K., Eds.; Elsevier: Nueva York, Estados Unidos 1985; pp. 511-537.
19. Gañán, J.; Abdulla, Al-K.; Miranda, A.B.; Turegano, J.; Correia, S.; Cuerda, E.M. *Renewable Energy* **2005**, *30 (11)*, 1759-1769.
20. Tomishige, K.; Asadullah, M.; Kunimori, K. *Catal. Today* **2004**, *89 (4)*, 389-403.
21. Hanaoka, T.; Inoue, S.; Uno, S.; Ogi, T.; Minowa, T. *Biomass Bioenergy* **2005**, *28 (1)*, 69-76.
22. The Sixth Italian Conference on Chemical and Process Engineering, June 8-11, 2003, Pisa, Italia (available at *http://www.aidic.it/icheap6*).
23. Huber, G.W.; Chheda, J.N.; Barrett, C.J.; Dumestic J.A. *Science* **2005**, *308*, 1446-1450.

Sesión III-D

Entorno, Sistemas y Modelado

Satélites artificiales terrestres propulsados con velas solares. Análisis de su evolución temporal y corrección orbital.

Casanova Ortega, Daniel [1,*], **Dena Arto, Ángeles** [1], **Elipe Sánchez, Antonio** [1] **y Tresaco Vidaller, Eva** [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa Zaragoza; casanov@unizar.es (DCO), adena@unizar.es (ADA), elipe@unizar.es (AES), etresaco@unizar.es (ETV),

* Autor responsable del trabajo; casanov@unizar.es (DCO)

Abstract: En la actualidad un tema que ha adquirido gran interés en la navegación espacial es la integración de velas solares en los satélites artificiales como medio de propulsión. En este trabajo analizamos la evolución temporal de un satélite artificial dotado con una vela solar en diferentes tipos de órbitas. Además, con el objetivo de minimizar la degradación natural a la que está expuesto un satélite artificial se introducen métodos de correción orbital.

Keywords: Satélites artificiales terrestres; Velas solares; Evolución temporal; Órbita geoestacionaria; Órbita congelada; Corrección orbital

---

1. Introducción

Los satélites artificiales son objetos que orbitan en torno a la Tierra y que permiten realizar actividades tan cotidianas como, comunicarnos por teléfono, obtener información de rutas de viaje, etc. Algunos de estos satélites son valiosos instrumentos que permiten llevar a cabo misiones de observación y reconocimiento del territorio y constituyen un interesante tema de investigación para el ámbito de Defensa.

Hasta hace una década el principal sistema de propulsión que utilizaban los satélites era el uso de motores. Sin embargo, en la actualidad esta cobrando gran interés el integrar las velas solares como medio de propulsión [7,10,11] . Esta novedosa tecnología ofrece desafiantes misiones espaciales ya que las naves no necesitan transportar consigo ni motor ni combustible, lo que permite colocar y mantener en órbita el satélite aligerando considerablemente su peso y pudiendo así, alcanzar mayor velocidad.

En este trabajo analizamos la evolución temporal de un satélite artificial dotado con una vela solar [4], en diferentes tipos de órbitas: geoestacionarias y bajas. En particular, las órbitas geoestacionarias

[9] se caracterizan por tener el periodo orbital igual al periodo de rotación terrestre, por lo que aparecen siempre en el mismo punto del cielo. Muchos sistemas modernos de comunicación están basados en este tipo de satélites. Las órbitas congeladas [2,5,8] son de gran interés en el marco de las misiones de observación y reconocimiento terrestre. La importancia de usar este tipo de órbitas viene marcada por la invariabilidad de la inclinación y la excentricidad de la órbita. Esto garantiza que las perturbaciones orbitales no alejarán demasiado la nave de su posición nominal, lo que implica el consiguiente ahorro de combustible.

Todo satélite esta expuesto a una degradación natural de su órbita. Con el objetivo de que dicha degradación no haga inviable la misión en un tiempo demasiado corto, con la consiguiente pérdida económica, se introducen métodos de corrección orbital.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera; en primer lugar se presenta el modelo dinámico que presenta una vela solar. A continuación se presenta la evolución temporal de dos velas solares con diferente ratio área sobre masa, denotado A/m, en dos altura distintas (una órbita baja y una órbita geoestacionaria). Finalmente se analiza la influencia del ratio A/m en la evolución temporal de la vela solar y se introduce un método de corrección órbital.

2. Modelo dinámico

En este trabajo abordaremos el problema de una vela solar orbitando en torno a la Tierra. Para ilustrar el movimiento utilizaremos un sistema de referencia ecuatorial denotado por $Oxyz$. Tomamos el plano del ecuador terrestre como el plano fundamental del sistema de referencia, denotado por (Oxy). La dirección del eje x es la dirección del equinocio vernal, que representa la intersección entre el plano del ecuador y el plano de la eclíptica, este último es el plano orbital del Sol como tercer cuerpo. El eje z coincidirá con la dirección del polo, y finalmente el eje y es el producto $y = z \times x$.

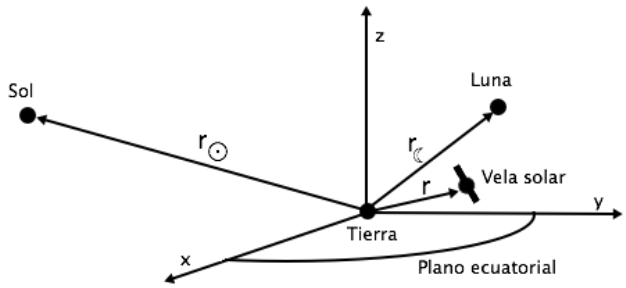
Este sistema de referencia se ilustra en la figura 1 donde se representa la Tierra, el Sol y la Luna como masas puntuales. Los vectores $\mathbf{r}$, $\mathbf{r}_{\odot}$, $\mathbf{r}_{\leftmoon}$ son el vector de posición de la vela solar, del Sol y de la Luna respectivamente.

Consideramos que el tercer cuerpo (Sol y Luna) recorre una órbita circular e inclinada en torno a la Tierra descrita mediante los elementos orbitales; semieje mayor ($a_{\odot}$ y $a_{\leftmoon}$), excentricidad ($e_{\odot}$ y $e_{\leftmoon}$), inclinación ($i_{\odot}$ y $i_{\leftmoon}$), argumento del perigeo ($\omega_{\odot}$ y $\omega_{\leftmoon}$), ascensión del nodo ($\Omega_{\odot}$ y $\Omega_{\leftmoon}$) y anomalía media ($M_{\odot}$ y $M_{\leftmoon}$). A su vez, la vela solar describe una órbita en torno a la Tierra cuyos elementos orbitales son semieje mayor (a), excentricidad (e), inclinación (i), argumento del perigeo (ω), ascensión del nodo (Ω) y anomalía media (M).

Las principales fuerzas que actúan sobre la vela solar son: la fuerza de atracción gravitatoria que la Tierra ejerce sobre ella ($\mathbf{r}_{GEO}$), la presión de radiación solar producida por el Sol sobre la superficie de la misma ($\mathbf{r}_{SRP}$), la fuerza que el Sol ejerce sobre la vela solar como tercer cuerpo ($\mathbf{r}_{Sol}$) y finalmente la fuerza que la Luna ejerce sobre la vela solar como tercer cuerpo ($\mathbf{r}_{Luna}$). Así, la ecuación del movimiento de la vela solar puede expresarse del siguiente modo

$$\ddot{\mathbf{r}} = \ddot{\mathbf{r}}_{GEO} + \ddot{\mathbf{r}}_{SRP} + \ddot{\mathbf{r}}_{Sol} + \ddot{\mathbf{r}}_{Luna}. \tag{1}$$

Figura 1. Representación del problema de la vela solar el sistema de referencia $Oxyz$.



Dichas fuerzas, bajo ciertos supuestos, son conservativas y por consiguiente pueden expresarse como el gradiente de una función potencial. En particular, la fuerza gravitatoria puede expresarse como el gradiente del potencial gravitatorio [1]. En este trabajo consideramos la componente Kepleriana del movimiento (esfericidad de la Tierra), el armónico zonal J_2 (achatamiento terrestre), el armónico zonal J_3 (asimetría entre hemisferios) y los correspondientes armónicos teserales y sectoriales (C_{21}, S_{21}, C_{22}, S_{22}, C_{30}, C_{31}, S_{31}, C_{32}, S_{32}, C_{33}, S_{33}) obviando los armónicos zonales, teserales y sectoriales de mayor orden. Por consiguiente, la fuerza gravitatoria puede expresarse mediante el gradiente de la siguiente función potencial:

$$\ddot{\mathbf{r}}_{GEO} = -\nabla U(\mathbf{r}), \tag{2}$$

donde $U(\mathbf{r})$ coincide con la expresión Hamiltoniana que viene dada por [1]

$$\mathcal{H}_{GEO}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{r} - \frac{\mu}{r}\sum_{n\geq 2}\left(\frac{r_p}{r}\right)^n \left[J_n P_n(\text{sen}\phi) - \sum_{j=1}^{n} P_{nj}(\text{sen}\phi)(C_{nj}\text{cos}j\lambda + S_{nj}\text{sen}j\lambda)\right] \tag{3}$$

donde $\mu = \mathcal{G}M$ siendo G la constante de gravitación universal y M la masa de la Tierra, $r = ||\mathbf{r}||$, P_{nj} son los polinomios de Legendre de grado n y orden j, los parámetros λ y ϕ representan la longitud y latitud del satélite respecto al sistema de referencia ecuatorial definido en la figura 1, y finalmente, los coeficientes C_{nj} y S_{nj} representan los armónicos teserales y sectoriales.

La fuerza que ejerce el Sol sobre la vela solar como tercer cuerpo viene dada mediante la siguiente expresión Hamiltoniana [1]

$$\mathcal{H}_{Sol} = \mu_\odot \left(\frac{1}{||\mathbf{r} - \mathbf{r}_\odot||} - \frac{\mathbf{r}\cdot\mathbf{r}_\odot}{||\mathbf{r}_\odot||^3}\right), \tag{4}$$

Finalmente, la fuerza que ejerce la Luna sobre la vela solar como tercer cuerpo viene dada mediante la siguiente expresión Hamiltoniana [1]

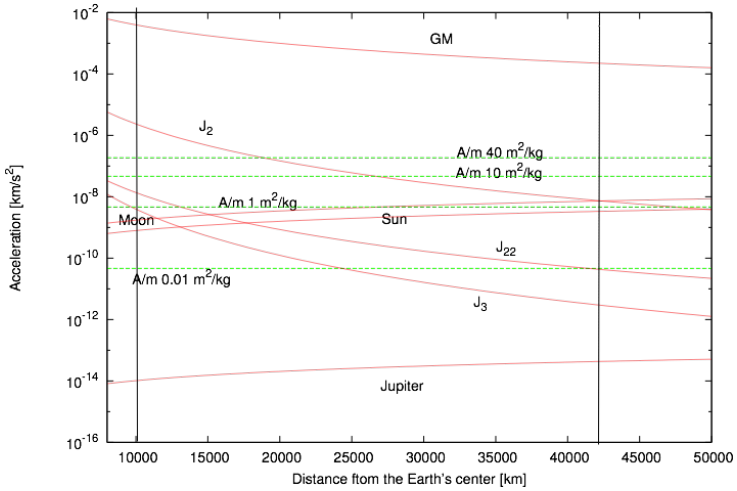
$$\mathcal{H}_{Luna} = \mu_\leftmoon \left(\frac{1}{||\mathbf{r} - \mathbf{r}_\leftmoon||} - \frac{\mathbf{r}\cdot\mathbf{r}_\leftmoon}{||\mathbf{r}_\leftmoon||^3}\right), \tag{5}$$

La presión de radiación solar puede modelizarse mediante el siguiente Hamiltoniano [1]

$$\mathcal{H}_{SRP} = -C_r P_r \frac{A}{m} a_\odot^2 \frac{1}{||\mathbf{r} - \mathbf{r}_\odot||}, \tag{6}$$

donde C_r es el coeficiente de presión de radiación solar, fijado en 1 en este trabajo. La constante $P_r = 4.56 \times 10^{-6}$ N/m^2 es la presión de radiación solar para un objeto situado a 1 AU. El valor $a_\odot$ es la distancia media entre el Sol y la Tierra y finalmente, el ratio A/m que representa el cociente entre la superficie de la vela solar y su masa. Este último parámetro juega un papel crucial en la determinación de la evolución temporal de la vela solar, ya que dependiendo de este ratio la presión de radiación solar puede convertirse en la perturbación dominante o ser prácticamente despreciable como observamos en la figura 2. Por ejemplo, los satélites de la constelación europea Galileo tienen un ratio área sobre masa de 0.11 m^2/Kg, mientras que la futura misión Sunjammer posee una vela solar cuyo ratio área sobre masa es de 40 m^2/Kg, convirtiéndose la presión de radiación solar en la perturbación más importante después del término Kepleriano.

Figura 2. Orden de magnitud de las perturbaciones para varios valores del ratio area-masa [13], $A/m = 0.01, 1, 10, 40$ m^2/kg.



Las dos líneas verticales que aparecen en la la figura 2 representan dos alturas en las que hemos situado una vela solar. Si la vela solar está situada en una órbita baja las perturbaciones que afectan a la vela solar de mayor a menor orden de magnitud serán el término Kepleriano, el efecto J_2, el efecto J_{22}, el efecto J_3, el efecto de la Luna como tercer cuerpo, el efecto del Sol como tercer cuerpo y finalmente la presión de radiación solar que depende del ratio A/m. Sin embargo, si la vela solar está situada en una órbita geoestacionaria las perturbaciones que afectan a la vela solar de mayor a menor orden de magnitud serán el término Kepleriano, el efecto J_2 y la influencia de la Luna como tercer cuerpo, que tienen un orden de magnitud similar, el efecto del Sol como tercer cuerpo, el efecto J_{22}, el efecto J_3 y finalmente al igual que en el caso de una órbita baja la presión de radiación solar que depende del ratio área sobre masa.

El movimiento de una vela solar en torno a la Tierra puede modelizarse mediante una formulación Hamiltoniana cuya expresión final viene dada por la suma de las ecuaciones (3), (4), (5) y (6).

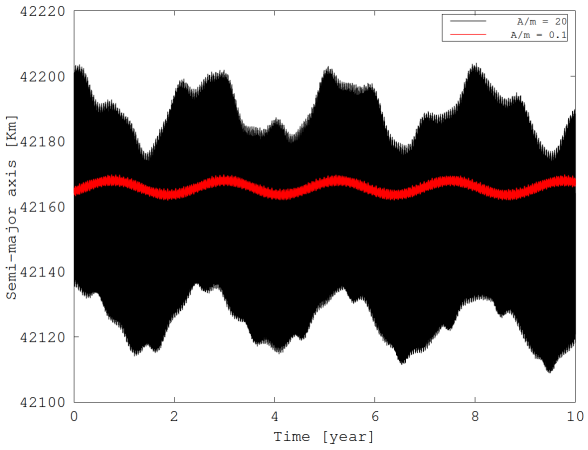
3. Resultados y Discusión

En esta sección ilustramos la evolución temporal de una misma vela solar situada en dos regiones distintas; una órbita baja y una órbita geoestacionaria. Además, analizamos su evolución temporal en función de su ratio A/m.

3.1. Satélite en GEO (Geostationary Earth Orbit)

Un satélite esta en una órbita geoestacionaria cuando su semieje mayor es de 42164 km. Esta órbita se caracteriza porque la vela solar sobrevuela siempre la misma región sobre la superficie terrestre. En este trabajo consideramos una vela solar cuyas condiciones iniciales son las siguientes: $a = 42164$ km, $e = 10^{-2}$, $i = 10^{-2}\,\mathrm{deg}$, $\Omega = \omega = M = 0\,\mathrm{deg}$. Propagamos la vela solar durante 10 años con dos valores distintos del parámetro área sobre masa, $A/m = 20$ m^2/Kg y $A/m = 0.1$ m^2/Kg.

Figura 3. Evolución del semieje mayor de una vela solar situada en una órbita GEO.

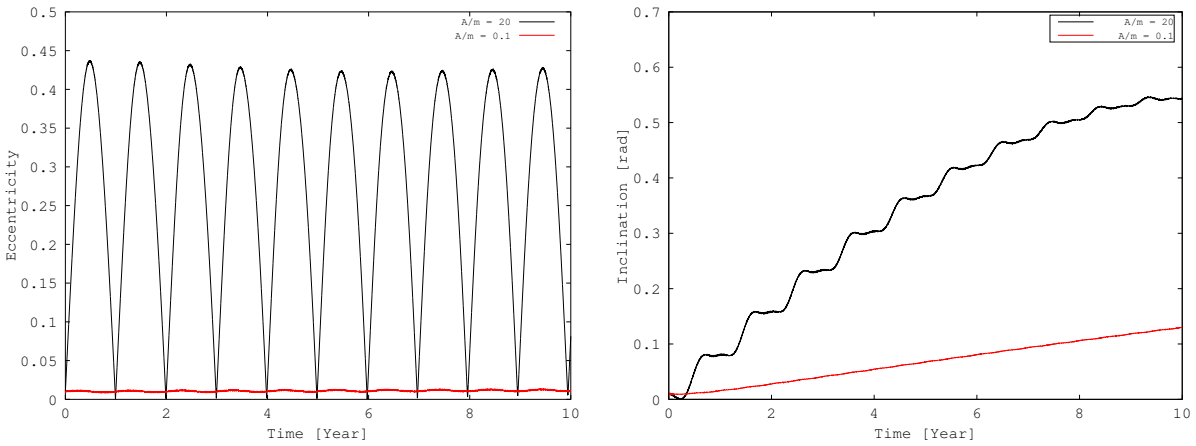


El semieje mayor de ambas velas solares presenta un movimiento periódico de aproximadamente 2.5 años. Observamos también que la variación del semieje mayor es proporcional al ratio A/m, si el ratio $A/m = 0.1$ la variación es de unos 10 km, mientras que si el ratio es $A/m = 20$ la variación llega a ser de unos 60 km aproximadamente. Por consiguiente, el parámetro área sobre masa es crucial para el estudio de la evolución temporal de una vela solar.

En la Figura 4(a) ilustramos la evolución de la excentricidad. Observamos nuevamente un movimiento periódico, y también la gran influencia del ratio área sobre masa. Notar que si la vela solar en el satélite es despreciable $A/m = 0.1$, la variación de la excentricidad es prácticamente nula. Mientras que para el caso de un satélite dotado con una gran vela solar $A/m = 20$ observamos que la excentricidad presenta un movimiento periódico de aproximadamente un año y de amplitud 0.45.

En la Figura 4(b) ilustramos la evolución de la inclinación. Necesitaríamos propagar más de 10 años para poder observar su carácter periódico. No obstante, ya se puede apreciar que la variación de la inclinación es proporcional al ratio A/m.

Figura 4. Evolución de la excentricidad e inclinación de una vela solar en una órbita GEO.

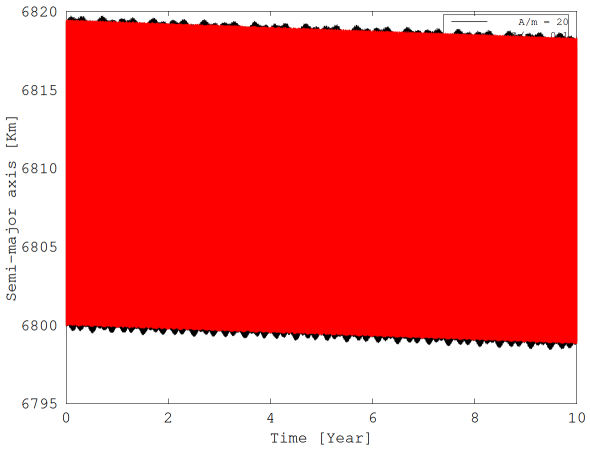


(a) Excentricidad (b) Inclinación

3.2. Satélite en LEO (Low Earth Orbit)

En este apartado ilustramos la evolución temporal de una vela solar en una órbita baja. En particular, consideramos una vela solar cuyas condiciones iniciales proporcionan una órbita congelada. Estas órbitas se caracterizan por mantener la misma altitud sobre los mismos puntos sobre la superficie terrestre, lo que proporcionan unas condiciones extraordinarias para abordar temas de cobertura regional.También se caracterizan porque la variación de la inclinación, y la excentricidad orbital es mínima. En este trabajo ilustramos la evolución temporal de una vela solar cuyas condiciones son [12]: $a = 6800$ km, $e = 0.0008$, $i = 90\,\text{deg}$, $\Omega = \omega = M = 0\,\text{deg}$. Propagamos la vela solar durante 10 años con dos valores distintos del parámetro área sobre masa $A/m = 20$ y $A/m = 0.1$.

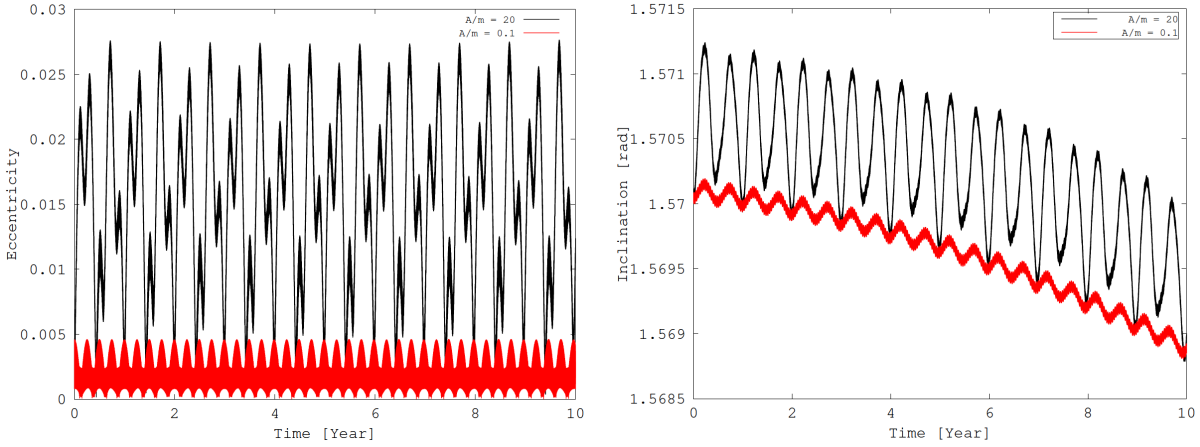
Figura 5. Evolución del semieje mayor de una vela solar en una órbita LEO congelada.



En el caso del semieje, observamos que independientemente de las características de la vela solar su variación es de unos 20 km.

En la figura 6(a) y la figura 6(b) ilustramos la evolución de la excentricidad e inclinación respectivamente. Observamos que efectivamente nos encontramos ante una órbita congelada, ya que independientemente del valor que tome el ratio A/m la variación de la excentricidad es del orden de

Figura 6. Evolución de la excentricidad e inclinación de una vela solar en una órbita LEO congelada.



(a) Excentricidad (b) Inclinación

10^{-2} y en el caso de la inclinación es del orden de 10^{-1} radianes. No obstante, y acorde con el resultado anterior, observamos que cuanto mayor es la vela solar, mayor variación sufren los elementos orbitales. Remarcar que este tipo de órbitas, como confirman los resultados, mantienen sus características durante largos periodos de tiempo, convirtiéndose en una buena herramienta para la cobertura regional.

4. Corrección orbital

En el caso de las órbitas congeladas el método utilizado para calcular las condiciones iniciales se basa en el promedio de un hamiltoniano reducido [12]. Por ello, deben utilizarse métodos de corrección orbital con el objetivo de mejorar las condiciones iniciales calculadas. A continuación se introduce el algoritmo Corrector Of Periodic Orbits (COPO) detallado en [3,6].

Una órbita periódica del sistema diferencial

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}); \quad \mathbf{x}(0) = (\mathbf{r}_0, \dot{\mathbf{r}}_0) = \mathbf{y}; \quad \mathbf{x} = (\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}) \in \mathbb{R}^6, \tag{7}$$

cuya solución es $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t; \mathbf{y})$, está definida por un vector $(\mathbf{y})$ de condiciones iniciales y un periodo T, tal que verifican la condición de periodicidad

$$\mathbf{x}(T; \mathbf{y}) - \mathbf{y} = \mathbf{0}. \tag{8}$$

Para encontrar las condiciones iniciales de la órbita periódica, es decir, las soluciones de la ecuación (8) usamos un método iterativo. Suponemos que en la iteración i-ésima tenemos las condiciones iniciales corregidas $(\mathbf{y}_i, T_i)$. A continuación, mejoramos estas condiciones iniciales añadiendo la corrección $(\Delta\mathbf{y}_i, \Delta T_i)$ tal que se verifica

$$||\mathbf{x}(T_i + \Delta T_i; \mathbf{y}_i + \Delta\mathbf{y}_i) - (\mathbf{y}_i + \Delta\mathbf{y}_i)|| < ||\mathbf{x}(T_i; \mathbf{y}_i) - \mathbf{y}_i||. \tag{9}$$

Desarrollando en serie de Taylor hasta orden uno la ecuación de periodicidad, se obtiene

$$\mathbf{x}(T_i; \mathbf{y}_i) - \mathbf{y}_i + (\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{y}} - I)\Delta\mathbf{y}_i + \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t}\Delta T_i = \mathbf{0}. \tag{10}$$

La matriz solución de las ecuaciones variacionales $\partial \mathbf{x}/\partial \mathbf{y}$ evaluada en $(\mathbf{y}_i, T_i)$ es una aproximación de la matriz de monodromía M de la órbita periódica y el vector columna $\partial \mathbf{x}/\partial t$ representa la derivada de la solución respecto del tiempo, $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$, que evaluado en $(\mathbf{y}_i, T_i)$ es $\mathbf{f}(\mathbf{y}_{T_i})$ con $\mathbf{y}_{T_i} = \mathbf{x}(T_i, \mathbf{y}_i)$. Por tanto se tiene

$$(M - I)\Delta \mathbf{y}_i + \mathbf{f}(\mathbf{y}_{T_i})\Delta T_i = -(\mathbf{y}_{T_i} - \mathbf{y}_i). \tag{11}$$

Además, se considera un desplazamiento ortogonal lo que significa que, $(\mathbf{f}\mathbf{y}_i))^T \Delta \mathbf{y}_i = 0$.

Finalmente, juntando esta última ecuación con la (11) se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones lineales $(n+1) \times (n+1)$.

$$\begin{pmatrix} M - I & \mathbf{f}(\mathbf{y}_{T_i}) \\ (\mathbf{f}(\mathbf{y}_i))^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{y}_i \\ \Delta T_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{y}_i - \mathbf{y}_{T_i} \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{12}$$

5. Conclusiones

Este trabajo analiza la evolución temporal de un satélite equipado con una vela solar. Observamos que el ratio área sobre masa es crucial para determinar su evolución temporal. Se han analizado dos tipos particulares de órbitas; geoestacionarias y bajas. En ambos tipos de órbita observamos un carácter periódico en la evolución de la excentricidad e inclinación. Además, se ha confirmado numéricamente el carácter congelado de la órbita baja escogida en este trabajo. Finalmente, se ha introducido un método de corrección orbital.

Agradecimientos

Trabajo parcialmente financiado por el proyecto CUD2013-15 del Centro Universitario de la Defensa y proyectos, ESP2013-44217-R y MTM2012-31883, del Ministerio de Economía y Competitividad.

Referencias

1. Abad, A., Astrodinámica, Bubok Publishing S.L., 2012.
2. Abad, A., Elipe, A., Tresaco E., J. Guid. Control Dynam., Vol. 32 (3), 888–898, 2009.
3. Abad, A., Barrio, R., Dena, A., Phys. Rev. E 84, 016701, 2011.
4. Casanova, D., Lemaitre, A., enviado a Celest. Mech. Dyn. Astr., 2014.
5. Coffey, S.L., Deprit, A., Deprit, E., Celest. Mech. Dyn. Astr., Vol. 59 (1), 37–72, 1994.
6. Dena, A., Rodríguez, M., Serrano, S., Barrio, R., Abstr. Appl. Anal. 1–12, 2012.
7. Farrés, A., Jorba, À., Celest. Mech. Dyn. Astr., Vol. 107, 233–253, 2010.
8. Elipe, A., Lara, M., J. Guid. Control Dynam., Vol. 26 (2), 238–243, 2003.
9. Lara, M., Elipe, A., Celest. Mech. Dyn. Astr., Vol 82 (3), 285–299, 2002.
10. Liu, X., Baoyin, H., Ma X., Astrophys Space Sci, Vol. 339, 295–304, 2012.
11. McInnes, C. R., Solar Sailing: Technology, Dynamics and Mission Appl., Springer-Verlag, 1999.
12. Tresaco, E., Casanova, D., Dena, A., Elipe, A., II Congreso DESEi+d, 2014.
13. Valk, S., Lemaître, A., Adv. Space. Res., 42, 1429–1443, 2009.

CITIUS - Command and control for interoperability of unmanned systems.

López García, Francisco [1,*], Columé Columé, Aurelio [2]

[1] López García, Francisco Jose. fjlopezg@navantia.es. FRL
[2] Columé Columé, Aurelio. acolume@navantia.es. AUC

***** Autor Principal y responsable del trabajo; López García, Francisco Jose. E-Mail: fjlopezg@navantia.es (FRL);

Abstract: El objetivo global y alcance del Proyecto de I +D CITIUS (Command and Control for Interoperability of Unmanned System) es el desarrollo de nuevas capacidades de mando y control para la interoperabilidad universal de sistemas no tripulados, autónomos o bajo control remoto, individualmente o de forma cooperativa, en escenarios de intervención complejos. El programa CITIUS representa un avance importante en el campo de los sistemas no tripulados, ha sido desarrollado por un consorcio de siete empresas dirigidas por Navantia Sistemas, y sitúa al mismo en la vanguardia de un sector nacional e internacional en auge para aplicaciones tanto civiles como militares.

Keywords: Navantia; CITIUS; USV, Mando y Control, no tripulados, interoperabilidad.

1. Introducción

La utilización de sistemas no tripulados en diferentes campos de aplicación civil y militar es hoy una realidad, y las aplicaciones crecen de manera exponencial día a día. Estos sistemas son a la vez causa y efecto de la evolución tecnológica. Los avances en inteligencia artificial, capacidad de proceso, comunicaciones, y generación y almacenamiento de energía, permiten a los vehículos no tripulados entrar en servicio con una elevada autonomía de acción y persistencia. Al no requerir forzosamente la supervisión constante de un operador humano, resultan más eficaces y rentables que los sistemas tradicionales en determinadas tareas.

Estos vehículos ya han demostrado su versatilidad, polivalencia, capacidad para operar en ambientes hostiles durante tiempos prolongados a un coste reducido, en comparación con otros sistemas alternativos que puedan desempeñar misiones análogas. Sin embargo, se requiere su operación coordinada y simultánea en espacios no segregados para una total incorporación al mercado y espacios comunes, así como resolver su funcionamiento conjunto con vehículos tripulados.

El objetivo general del proyecto CITIUS (del inglés, **C**ommand and control for **in**t**e**roperab**i**lity of **u**nmanned **s**ystems, Mando y control para interoperabilidad de sistemas no-tripulados) **es el desarrollo de nuevas capacidades de mando y control para interoperabilidad universal de sistemas no**

tripulados, autónomos o bajo control remoto, individual o cooperativamente en los escenarios de intervención complejos.

El programa CITIUS es un programa de I+D cofinanciado por el Centro para el desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), con el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y la Agencia para la Innovación y Desarrollo de Andalucía (IDEA).



Figura 1. Arquitectura de CITIUS.

El proyecto propone una arquitectura de futuro para escenarios de intervención complejos donde coexistan vehículos tripulados, vehículos no-tripulados y plataformas matrices, en todos los segmentos (aéreo, terrestre, marino de superficie y submarino) de manera simultánea. Es fundamental el desarrollo y prototipado de nuevas capacidades para un Sistema de Mando y Control que estandarice el concepto plug-and-operate. El proyecto busca satisfacer la necesidad de convergencia creada por el sólido cambio de tendencia, huyendo así de sistemas específicos para una misión o capacidad concretas y evitando dar soluciones independientes e inconexas, sino sistemas capaces de explotar componentes comunes.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

El proyecto se divide en cuatro actividades principales:

- WP1 - Mando y Control.
- WP2 – USV, Unmanned Surface Vehicle.
- WP3 - UGV, Unmanned Ground Vehicle.
- WP4 - Sistema de simulación para la formación de operadores.

2.1. WP1 - Mando y Control.

Con las actividades de "WP1. Mando y Control" se da continuidad a experiencias previas en el desarrollo de Sistemas de Mando y Control, identificando, desarrollando y validando nuevas capacidades sobre la arquitectura existente, además de realizar nuevos desarrollos software para posibilitar la incorporación de funcionalidades como la gestión de vehículos no tripulados o el control y housekeeping de los sensores.



Figura 2. Mando y Control de CITIUS.

Esta actividad incluye también la interoperabilidad entre Sistemas de Mando y Control, para aquellas operaciones en las que se precisa la intervención de sistemas C2 terrestres, aéreos y navales, para formar un **Sistema de Sistemas**.

Dentro de las actividades de desarrollo SW se incluye el planeamiento, la ejecución y el control de las misiones de los vehículos no tripulados. Todas estas tareas relacionadas con las misiones se especificaron usando el lenguaje C-BML. En la fase de definición de misiones, el coordinador es quien tiene la responsabilidad de planificar misiones y dispone de la posibilidad de asignarlas a los diferentes controladores de los vehículos.

Para la cooperación entre vehículos, una de las principales decisiones que se ha tomado es el uso del estándar JAUS para la gestión e interfaz con los vehículos no tripulados. JAUS (Joint Architecture for Unmaned Systems) es un sistema desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para promover la interfuncionalidad entre los diferentes componentes dentro de un sistema de un vehículo no tripulado. JAUS está orientado para usar en cualquier tipo de sistema no tripulado (Unmanned Systems). Frente a otros estándares, JAUS pretende ser un protocolo más extensible y configurable usando para ello los mensajes "experimentales" que pueden ser creados por los desarrolladores.

Dentro de estas tereas también se enmarcan las actividades de desarrollo SW del HMI de operador para la gestión de los vehículos y su payload. A modo de ejemplo se presentan en las siguientes figuras algunas de las ventanas resultantes de la implementación final para la gestión de los vehículos y las misiones.

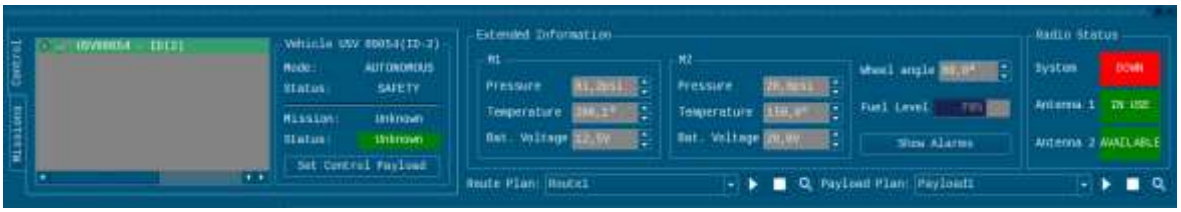


Figura 3. HMI gestión de vehículos y misiones.

Para las tareas de apoyo a operaciones científicas se ha realizado un desarrollo en el SW de la consola multifunción del sistema de mando y control de forma que permita la ejecución en otro escritorio de aplicaciones de terceros. Se ha implementado una solución de consola multifunción (MFC) con la posibilidad de tener tanto el CMS como software de terceros, en este caso de apoyo a operaciones científicas, en una misma consola de operador.

Por otro lado se definieron una serie de sensores simulados que llevaría el USV desarrollándose todo el HMI y SW táctico para el control de esos sensores que se han tratado como una payload más que pudiera llevar el USV relacionada con sensores de investigaciones científicas.

Otro de los objetivos que se marcaron dentro del proyecto es el desarrollo de misiones de rastreo de minas usando el vehículo USV. Para ello se ha definido el tipo de misión rastreo de minas dentro de las especificadas en el lenguaje de misión C-BML, y se ha incluido en el vehículo USV un sonar para la simulación que permita la detección de minas.

Para la interoperabilidad del sistema se ha desarrollado un servidor de misiones. Después de estudiar diversas formas de abordar las distintas posibilidades de análisis que ofrece esta tarea, se optó por desarrollar un pool de misiones distribuido que pudiera ser accesible por los distintos sistemas que debieran colaborar entre sí.



Figura 4. Alcance de las comunicaciones

La comunicación entre el Mando y Control y los vehículos es una tarea básica del proyecto. El funcionamiento a nivel radio es el mismo en cada nodo del sistema (UxV), sin embargo el mando y control es el punto de partida de todo el flujo de datos para realizar un seguimiento y control de la red así como el punto de referencia y de destino de toda la carga de trafico generada por cada nodo en la red. El SW de los equipos de comunicaciones está compuesto por una serie de capas que proporcionan el soporte para que todos los elementos de la red JAUS de CITIUS puedan acceder comunicarse entre ellos.



Figura 5. Integración GIS

La integración de información GIS dentro de las consolas de Mando y Control, permite la gestión de los vehículos no tripulados en un marco georreferenciado. En la figura se muestra como ejemplo el resultado final de la cartografía desarrollada dentro del proyecto CITIUS integrada dentro del layout de la consola de MyC.

Las pruebas en el entorno de desarrollo se realizaron usando simuladores de los vehículos. Estas pruebas se plantearon en cinco escenarios de demostración:

- Misión de búsqueda y rescate realizada por el simulador USV
- Misión de guerra de minas realizada por el simulador USV
- Misión de apoyo a operaciones científicas realizada por el simulador USV
- Misión de vigilancia realizada por el simulador UGV
- Misión de reconocimiento realizada por el simulador UGV

Para probar todas estas estas capacidades, se desarrollaron dos demostradores de vehículos no tripulados en los entornos marítimo (USV) y terrestre (UGV). Las pruebas en entorno real se realizaron usando los propios vehículos. Se plantearon en tres escenarios de demostración:

- Misión de reconocimiento realizada por el vehículo USV
- Misión de vigilancia realizada por el vehículo UGV
- Misión conjunta entre los vehículos UGV-USV

2.2. WP2 - USV, Unmanned Surface Vehicle.

Para comprender el Estado del Arte de los USV, hay que recordar su origen, dado que el empleo de este tipo de vehículos no es totalmente nuevo. Concretamente en las misiones MCM (Medidas Contraminas) se han venido empleando con mayor o menor éxito desde los años 60. A finales de esa década, se utilizaron en Vietnam USV en operaciones de contraminado naval. Posteriormente los USV

se utilizaron en algunos sistemas de rastra de minas. En España también se realizaron estudios previos y simulaciones de un sistema de dragaminas, basado en el mismo concepto (USV), el SIRAMICOR.

Pero si inicialmente la necesidad operativa que impulsó el desarrollo de los USV fueron las medidas contraminas, posteriormente pasó a serlo la seguridad marítima, sobre todo en aguas costeras. El empleo en misiones de seguridad, ha demostrado la utilidad y versatilidad de los USV equipados apropiadamente para zonas restringidas, y aunque esto no ha tenido influencia en las operaciones navales a gran escala, ha contribuido en general al desarrollo de muchas de las tecnologías aplicables a estos vehículos y muy en particular a la incorporación de sensores y actuadores estabilizadas en ellos.

A la hora de incorporar nuevos vehículos a escenarios de intervención navales, es importante tener un enfoque holístico en su más amplio sentido; un enfoque que considere en su conjunto los aspectos de interoperabilidad, tecnológicos, logísticos, de doctrina, instrucción y, sobre todo, de integración.

La interoperabilidad es un asunto especialmente importante para la incorporación de los vehículos USV, ya que si verdaderamente se quiere obtener todo el beneficio de un empleo conjunto de estos vehículos con el resto de los que coexisten en un escenario heterogéneo, todos ellos tendrán que compartir datos y Sistemas de Mando y Control.



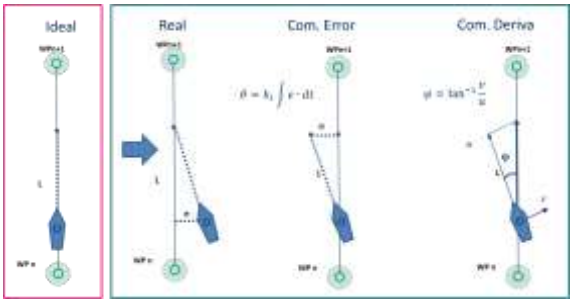
Figura 6. Unmanned Surface Vehicle (USV)

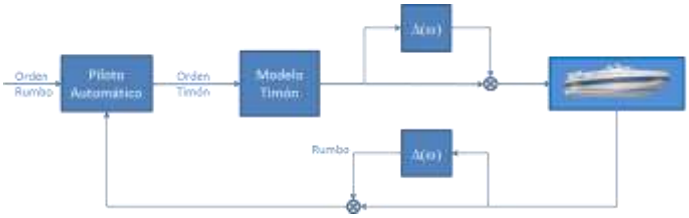
Con las actividades de "WP2. USV – Unmanned Surface Vehicle" se especifican y realizan adaptaciones sobre un vehículo naval tripulado existente, para obtener un demostrador tecnológico marino no tripulado, USV (Unmanned Surface Vehicle) que permita implementar y validar funciones de teleoperación así como estrategias de guiado autónomo. Esto incluye el control de la propulsión, el control del gobierno y auxiliares. Para ello se integraron los sistemas electro-hidráulicos y electro-mecánico en el cuadro local. También se implementó un interfaz gráfico para permitir el control local.

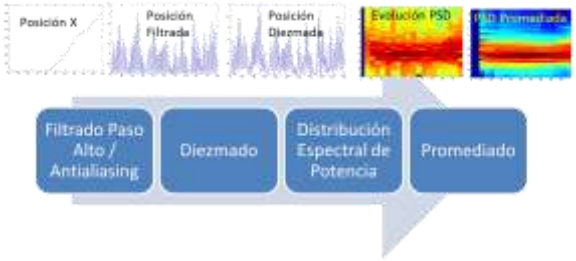


Figura 7. HMI del cuadro de control local.

El Sistema de guiado autónomo y control remoto incluye modelos dinámicos y algoritmia, mando y control y comunicaciones. Para la identificación del modelo dinámico de la plataforma partiendo de datos experimentales se usaron métodos de optimización QP con restricciones en los parámetros. Se implementaron algoritmos de control (método de Look-Ahead) y se validaron en pruebas.







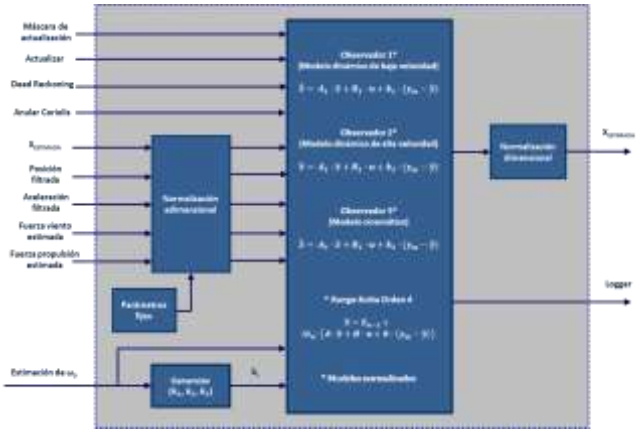


Figura 8. Algoritmos de control del USV

Entre otros el observador con filtro de olas y el algoritmo de estabilización de imágenes.

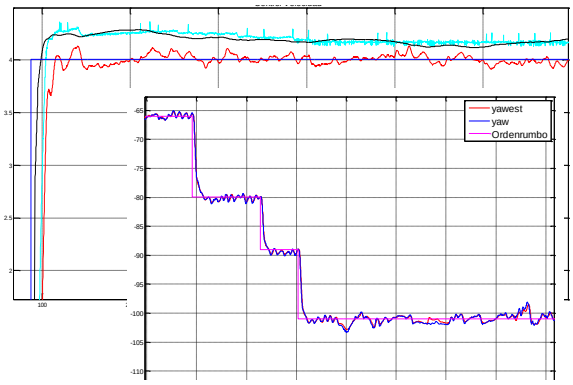


Figura 9. Control de velocidad y rumbo.

Para la comunicación entre el USV y el Mando y Control definieron e implementaron las interfaces bajo el estándar JAUS.

Mediante las pruebas en el entorno de desarrollo se verificaron estos algoritmos, que posteriormente fueron validados en el entorno operativo.

A modo de ejemplo las gráficas muestran los resultados obtenidos para el control de la velocidad y el control de rumbo.

2.3. WP3 - UGV, Unmanned Ground Vehicle.



Figura 10. UGV

Este paquete de trabajo comprende:

- Todas las tareas de ingeniería de sistemas del UGV (identificación de necesidades, especificación de requisitos del sistema, definición de una arquitectura apropiada para el UGV, asi como el diseño HW/SW de alto nivel).
- los trabajos asociados a la identificación, diseño y adaptación de la plataforma móvil usada de base para la construcción del UGV, así como los trabajos de definición y desarrollo de los equipos electrónicos que deban embarcarse sobre el vehículo.

- el desarrollo del SW y los equipos HW necesarios para que el vehículo disponga de la capacidad de ser telecomandado desde el sistema de mando y control: módulos de control de la plataforma, del sistema de observación, del sistema de alimentación y del sistema de comunicaciones, las controladoras de conducción, etc.
- las tareas para validar el comportamiento del sistema UGV desarrollado según las especificaciones dadas. En una primera fase en un entorno de laboratorio donde no se disponía del sistema completo. En una segunda fase con la plataforma móvil sumergida en un escenario real de operación.

2.4 WP4 - Sistema de simulación para la formación de operadores.

El objetivo de CITIUS en este paquete de trabajo es la búsqueda de soluciones al problema de interoperabilidad de simuladores en entornos de operaciones centrados en red. Este objetivo ha llevado a que varias empresas y agencias líderes de la industria, se hayan aliado en la iniciativa LSA (Layered Simulation Architecture) de SISO. Esta iniciativa tiene por objeto desarrollar una arquitectura abierta, desacoplada y distribuida, para los futuros sistemas de simulación. Esta nueva arquitectura deberá proporcionar un camino de convergencia para las arquitecturas de simulación actuales, facilitando la reusabilidad de los sistemas ya desarrollados.

Dentro de este paquete de trabajo se desarrolló además:

- un Sistema de Gestión del Nivel Formativo de los usuarios de CITIUS, que permite, además de integrar el producto NOTS (Navantia Operators' Training System), gestionar contenido "legacy" (video, presentaciones PowerPoint) y de terceros, así como integrar como parte de un cursos lecciones basadas en simulación.

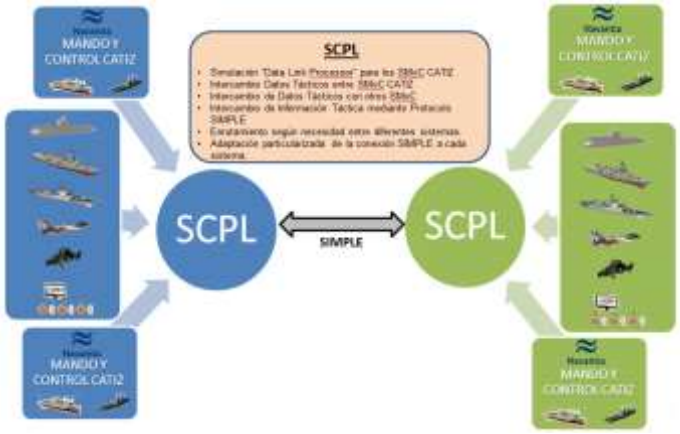


Figura 11. Arquitectura del SCPL

- un sw de cooperación entre plataformas vía link (SCPL). Este sw implementa la capacidad de intercambio de información táctica entre dos o más Sistemas de Mando y Control como el Sistema CATIZ, desarrollado por Navantia-Sistemas para su instalación en buques de superficie y submarinos. Además permite el intercambio de información táctica entre ambos sistemas y su almacenamiento en base de datos para su posterior análisis.

3. Resultados y Discusión

El programa ha durado dos años. El 26 de febrero de 2015 tuvo lugar una jornada de demostración de prototipos del proyecto en las instalaciones de Navantia en San Fernando (Cádiz). Además de una representación de todas las empresas participantes, a dicha jornada acudió la Responsable de Seguimiento del proyecto designada por CDTI.

En dicha jornada, el vehículo USV se hizo a la mar y fue sometido a diversas pruebas funcionales: salida en modo semiautomático, definición desde Mando y Control de ruta de camino inverso y vuelta en modo autónomo.

Así mismo, en la jornada se demostró el funcionamiento del UGV, conduciendo el vehículo desde el Mando y Control y demostrando la funcionalidad del payload de observación.

En lo relativo a la simulación y el adiestramiento, se realizaron pruebas del entorno de simulación MSDL / DIS / JAUS, con Simware, NSS y Catiz, pruebas del SCPL y pruebas del entorno elearning.

En conclusión, los demostradores superaron con éxito las pruebas funcionales ejecutadas. Estas pruebas se realizaron bajo a inspección de CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), que destacó el alto nivel de funcionalidad y madurez alcanzados.

4. Conclusiones

La utilización de sistemas no tripulados requiere su **operación coordinada y simultánea en espacios no segregados**, así como resolver su funcionamiento conjunto con vehículos tripulados, para lograr una total incorporación al mercado y espacios comunes.

El programa CITIUS viene a cubrir esta demanda creciente de sistemas interoperables en escenarios coordinados potenciando las correspondientes capacidades requeridas por los Sistemas de Mando y Control

La tendencia tecnológica actual, sin embargo, es la de potenciar principalmente las capacidades de los vehículos no tripulados, especialmente su autonomía y resistencia, descuidando de forma notoria su interoperabilidad, es decir, su capacidad para.

El programa CITIUS representa un importante avance en el campo de los sistemas no tripulados. NAVANTIA Sistemas se coloca de este modo a la vanguardia de un sector en auge a nivel nacional e internacional y con importantes aplicaciones tanto civiles como militares.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a las empresas del consorcio CITIUS: ABANCE, ELIMCO, GTD, MDU, NADS, TTI. A los Organismos públicos de investigación: Universidad de Sevilla, Universidad de Cádiz y Aicia. Los organismos públicos: CDTI, MINECO, y Agencia IDEA de Andalucía.

Referencias

1. Daniel Savitsky; On the Subject of High-Speed Monohulls. Presented to the Greek Section Of the Society Of Naval Architects and Marine Engineers. Athens, Greece. October 2, 2003.
2. Fossen, T. I. Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Marine Cybernetics. Trondheim, Norway. (2002).
3. Perez, T. Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Reduction using Rudders and Fins. Advances in Industrial Control. Springer-Verlag, London. (2005).

Plataforma de Comunicaciones Multi-UAV Multi-Servicio para Aplicaciones de Protección, Seguridad y Defensa

Vidal Fernández, Iván [1,*], Garcia-Reinoso, Jaime [1], Valera Pintor, Francisco [1], Fernández García, Norberto [2], Barragáns Martínez, Belén [2], Oliva Ballega, Lucia [1] y Azcorra Saloña, Arturo [1,3]

[1] Universidad Carlos III de Madrid; ividal@it.uc3m.es (I.V.F.), jgr@it.uc3m.es (J.J.G.R.), fvalera@it.uc3m.es (F.V.P.), 100284106@alumnos.uc3m.es (L.O.B.), azcorra@it.uc3m.es (A.A.S.),

[2] Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar de Marin; norberto@cud.uvigo.es (N.F.G.), belen@cud.uvigo.es (B.B.M.)

[3] IMDEA Networks Institute; arturo.azcorra@imdea.org (A.A.S.)

***** Autor responsable del trabajo; ividal@it.uc3m.es

Abstract: Este artículo presenta el estado actual del desarrollo de una plataforma de comunicaciones multi-servicio, realizado en el contexto del proyecto nacional DRONEXT, para soportar las aplicaciones de protección, seguridad y defensa de las sociedades seguras del futuro. La plataforma se basa en el uso de vehículos aéreos no tripulados de distintos tamaños y capacidades, que operan de forma colaborativa, y en técnicas de virtualización que permiten el despliegue flexible, rápido y adaptable de servicios y funcionalidades sobre dichos vehículos. El artículo analiza un conjunto representativo de los casos de uso de la plataforma, en los ámbitos civil y militar, realizado conjuntamente por investigadores de la Universidad Carlos III de Madrid y el Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar de Marín. Finalmente, se muestran un conjunto de resultados experimentales preliminares que evalúan la viabilidad práctica de la plataforma.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Micro Air Vehicle (MAV); sociedades seguras

---

1. Introducción

En el contexto actual, Europa afronta grandes retos sociales que requieren el uso de recursos y de conocimientos relativos a diversos campos heterogéneos. Entre éstos, se encuentra el reto fundamental de utilizar las nuevas tecnologías de la información y de las comunicaciones para construir sociedades seguras. Este reto comprende las actividades de investigación e innovación necesarias para mejorar

la capacidad de la sociedad para asumir con flexibilidad situaciones límites producidas por desastres naturales o provocados por el hombre, luchar contra el crimen y el terrorismo o mejorar las operaciones de vigilancia y de seguridad de fronteras, entre otras.

En este contexto, actualmente asistimos al desarrollo de plataformas innovadoras de micro vehículos aéreos o MAVs (*Micro Air Vehicles*), las cuales están obteniendo un interés creciente por parte de la comunidad investigadora y de la industria. Con un coste económico y un consumo energético reducidos, en comparación con los vehículos aéreos no tripulados (en adelante UAVs, *Unmanned Aerial Vehicles*) tácticos de mayor tamaño, estos pequeños vehículos aéreos abren un nuevo abanico de posibilidades para desarrollar aplicaciones colaborativas orientadas a misión [1]. Así, las plataformas de MAVs se han propuesto para dar asistencia en operaciones de búsqueda cooperativa [2,3], generación colaborativa imágenes en situaciones de emergencia [4] o para la creación de redes de sensores aéreas como ayuda en la gestión de catástrofes [5]. También se ha considerado la utilización de los UAVs como relays de comunicaciones [6]. Nuestro trabajo previo incluye el diseño y la implementación de un sistema de comunicaciones TCP/IP evolucionado [7,8] para el UAV táctico SIVA[1], fabricado bajo la dirección del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial español (INTA).

Este artículo presenta el estado actual del trabajo que se desarrolla en el marco del proyecto nacional DRONEXT ("*Despliegue rápido de una infraestructura de comunicaciones multiservicio para protección, seguridad y defensa*", TEC2014-54335-C4-2-R, Enero 2015 - Diciembre 2016), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, y cuyo principal objetivo es el diseño de una plataforma de comunicaciones multi-servicio para las aplicaciones de protección, seguridad y defensa de las sociedades seguras del futuro. Esta plataforma soportará el despliegue rápido de múltiples servicios heterogéneos en zonas geográficas delimitadas, utilizando para ello una infraestructura de UAVs de distintos tamaños y capacidades. En particular, la solución contemplada se basa en la operación colaborativa de MAVs y UAVs tácticos de mayor tamaño, y permite el despliegue adaptable de servicios de valor añadido mediante el uso de técnicas de virtualización. Asimismo, el artículo analiza un conjunto de los escenarios y casos de uso habilitados mediante el uso de la plataforma, realizado en colaboración entre la Universidad Carlos III de Madrid y el Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar de Marín, al objeto de ilustrar el potencial de la misma para soportar la ejecución de aplicaciones avanzadas de protección, seguridad y defensa en los ámbitos civil y militar.

2. Virtualización en entornos multi-UAV

La virtualización consiste en la instanciación de una versión virtual (no real) de algún recurso de un ordenador, de forma parcial o completa. De esta forma, se puede virtualizar la CPU de un ordenador, la memoria, periféricos, elementos de red o un conjunto de ellos, o incluso virtualizar completamente un ordenador, lo que denominamos máquina virtual. Todo esto se puede conseguir gracias a la abstracción de los recursos hardware por medio de una capa llamada *hypervisor*, que utiliza estos recursos hardware de la máquina anfitrión (host) para poder ser utilizados por una o más máquinas virtuales o equipos invitados (guest). Las máquinas virtuales, gracias al hypervisor, creen tener acceso directo a todos los recursos del host de manera aislada, aunque no sea así en la práctica.

[1] Sistema táctico de vigilancia SIVA: http://www.inta.es/doc/programasaltatecnologia/avionesnotripulados/siva_web.pdf

La plataforma de comunicaciones que se está desarrollando en el marco del proyecto DRONEXT soporta la ejecución de múltiples servicios, mediante el uso de plataformas hardware con soporte para la virtualización. A tal efecto, existen diversas placas y procesadores, incluso de tamaño reducido, con dicho soporte y con la capacidad de incorporar los periféricos necesarios (eg. cámara de grabación de vídeo) para la provisión de los servicios considerados. El servicio de virtualización permite simplificar las actividades de desarrollo de los servicios, que pueden ser realizadas independientemente de las características software y hardware de las unidades UAV, y posibilita además la apropiada validación y prueba de los mismos sobre entornos virtualizados controlados. Además, el uso de técnicas de virtualización permite el despliegue rápido de los servicios desarrollados, mediante la ejecución de las máquinas virtuales pertinentes en las unidades UAV necesarias como paso previo al inicio de la misión. La virtualización también permite modificar, de forma dinámica, los recursos asignados a una máquina virtual, por lo que se puede reaccionar ante el incremento o decremento de la carga generada durante la ejecución de los servicios. Por otro lado, en entornos multi-UAVs, donde la infraestructura hardware se mueve físicamente de una localización a otra, la posibilidad de mover máquinas virtuales entre diferentes UAVs es una característica muy importante de la virtualización. De acuerdo con la literatura evaluada, no existe ninguna implementación de este tipo de plataformas para UAVs.

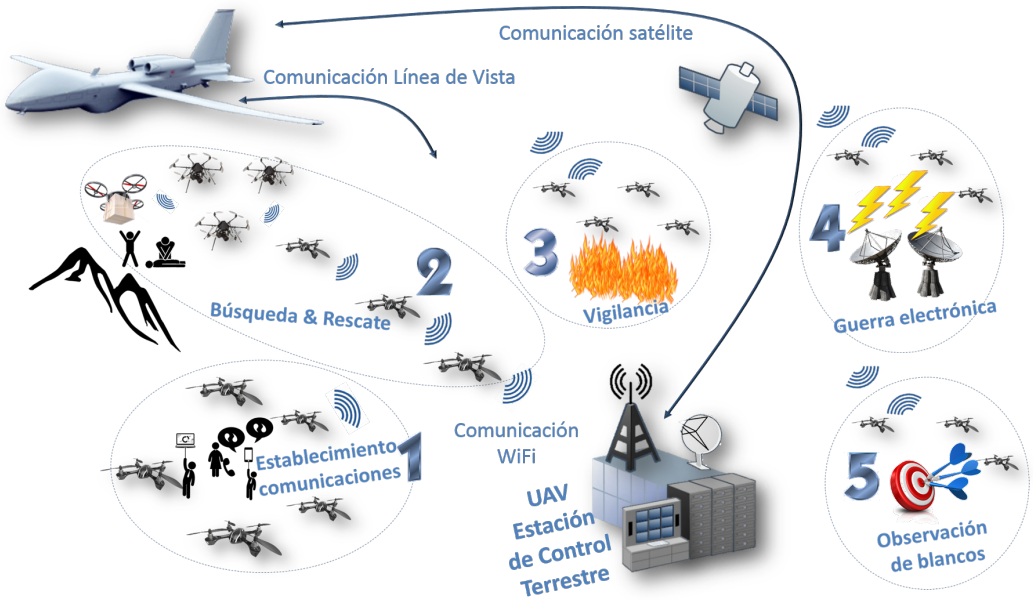
La integración de las técnicas de virtualización en nuestra arquitectura multi-UAV permitirá a los desarrolladores de servicios utilizar todas las características descritas anteriormente: independencia del hardware, escalado de recursos y transferencia de máquinas virtuales. Así, se podrán crear servicios novedosos y con mayores funcionalidades, algunos de los cuales se ilustran en la siguiente sección.

3. Descripción y casos de uso de la plataforma de comunicaciones multi-servicio

La plataforma de comunicaciones multi-servicio que actualmente se desarrolla en el proyecto DRONEXT se basa en la utilización de múltiples UAVs de distintas capacidades. En particular, nuestra solución utiliza una infraestructura de MAVs para proporcionar cobertura de comunicaciones y de servicios en zonas geográficas delimitadas en las que no existe una infraestructura de comunicaciones apropiada para la aplicación objeto del despliegue, bien por ser ésta inexistente, o por la ausencia de disponibilidad de la misma, por ejemplo a causa de un desastre natural. Adicionalmente, la plataforma bajo desarrollo soporta la utilización de UAVs tácticos de mayor tamaño para comunicar zonas geográficas distantes, sobre las que se proporciona cobertura de comunicaciones mediante MAVs, con centros de control encargados de coordinar la ejecución de las operaciones objeto de despliegue de la red. La plataforma utiliza técnicas de virtualización para soportar el despliegue y la actualización rápida y adaptable de funcionalidades y de servicios sobre la infraestructura de MAVs (ej. servicios de Voz sobre IP, encaminamiento y retransmisión de información, algoritmos de posicionamiento, grabación y transmisión de video, recogida de información sensorizada, etc.). El despliegue será controlado mediante un sistema de planificación.

A continuación se describe un conjunto representativo de los casos de uso, relacionados con aplicaciones de protección, seguridad y defensa, habilitados mediante la utilización de la plataforma de comunicaciones objeto de estudio (véase Figura 1).

Figure 1. Casos de uso de la plataforma de comunicaciones multi-servicio



3.1. Establecimiento de comunicaciones en situaciones de emergencia

Como primer caso de uso, nuestra plataforma permite proporcionar comunicaciones de voz y de vídeo en situaciones de emergencia, en las cuales no existen infraestructuras de telecomunicaciones operativas para soportar el establecimiento de dichas comunicaciones. En este escenario, la solución objeto de este trabajo permitirá desplegar una infraestructura de MAVs, equipados con tecnologías de comunicaciones inalámbricas, sobre el área geográfica en la que se desea proveer cobertura de los servicios de voz y de vídeo. Estos MAVs se configurarán para formar una topología de red basada en conexiones inalámbricas con distintos puntos de acceso sobre el área geográfica del despliegue, lo que posibilitará el intercambio de tráfico de datos en dicha zona. Adicionalmente, un subconjunto de estos MAVs será seleccionado para ejecutar los distintos componentes de un servicio de voz-sobre-IP (en adelante VoIP, *voice-over IP*). Estos componentes se instanciarán como máquinas virtuales en los MAVs seleccionados. De este modo, los equipos de emergencia provistos de terminales VoIP podrán establecer comunicaciones de voz y de vídeo interactivas en tiempo real dentro de la zona de cobertura. El intercambio de información con centros de operaciones externos a la zona de despliegue también es posible mediante el uso de UAVs tácticos, que podrán actuar como relay de comunicación para el tráfico de voz y de vídeo entre dichos centros y los equipos en el área de cobertura de los MAVs.

Por otro lado, debido a las restricciones existentes en la autonomía de vuelo de los MAV, derivadas del uso de baterías de capacidad limitada, siempre existe la posibilidad de que distintos MAVs deban cesar en su operación o entrar en un modo de consumo energético reducido. En ambos casos, se reduce la capacidad de la plataforma para la ejecución de servicios virtualizados. Nuestra solución afronta este aspecto mediante el uso de sistemas MAV redundantes. Estos MAVs serán configurados, a medida que son necesarios, para ejecutar las funcionalidades de los vehículos aéreos que sean necesarias. Es importante destacar que las herramientas de virtualización poseen el potencial necesario para afrontar esta tarea, posibilitando la iniciación de nuevas funcionalidades y servicios en equipos MAV nuevos o

existentes, o incluso la transferencia de funciones virtualizadas existentes, por ejemplo un proxy de VoIP en un MAV, que va cesar en su operación, a otro que actuará como reemplazo del primero. De este modo, es posible garantizar la operación de la plataforma atendiendo al principio fundamental de resiliencia.

3.2. Operaciones de reconocimiento, búsqueda y rescate

Adicionalmente, la plataforma considerada permite facilitar la ejecución de operaciones de búsqueda y rescate. Por un lado, y más allá de las posibilidades de explotación de la plataforma anteriormente mencionadas, es posible instanciar distintas estrategias de búsqueda cooperativa sobre infraestructura de MAVs, de acuerdo con los requisitos impuestos por el centro responsable de las operaciones objeto del despliegue. Por otro lado, distintos MAVs pueden realizar distintas funcionalidades, mediante la ejecución de distintas máquinas virtuales. Así, un subconjunto de los MAVs podría ser seleccionado para ejecutar procesos de grabación y transmisión de vídeo en tiempo real durante operaciones de reconocimiento o de búsqueda. Otro subconjunto de los MAVs podría realizar tareas relacionadas con el procesamiento del vídeo, generando alarmas en caso de encontrar patrones de búsqueda predeterminados (ej. localización de personas o instalaciones). Estas alarmas podrían ser transmitidas a un centro de control con mayor prioridad que el resto del tráfico de datos que circula por la infraestructura de MAVs. En el caso de operaciones de rescate, un subconjunto de los MAVs podría realizar tareas relacionadas con el transporte de equipamiento médico o de supervivencia a localizaciones determinadas.

Finalmente, el soporte de virtualización permite desplegar distintos mecanismos para habilitar la comunicación de información desde los MAVs hacia su centro de operaciones correspondiente.

3.3. Operaciones de vigilancia

Por otro lado, nuestra solución habilita la ejecución de las distintas operaciones de vigilancia involucradas en aplicaciones heterogéneas de protección, seguridad y defensa, como es el caso de la vigilancia de bosques y fronteras, o la lucha contra el crimen. A este respecto, y de forma análoga a los casos de uso anteriores, el soporte de virtualización proporcionado por la infraestructura de MAVs permite instanciar distintas estrategias de inspección, así como distintas funcionalidades y servicios que puedan ser necesarios, como el soporte de grabación, procesamiento y transmisión de vídeo.

3.4. Operaciones de guerra electrónica

Dada la gran importancia que los sistemas electrónicos y de comunicaciones tienen a día de hoy en cualquier ejército moderno, en los últimos tiempos ha cobrado especial relevancia la denominada *guerra electrónica*. Este tipo de guerra se podría definir como[2] cualquier actividad tecnológica y electrónica que permite determinar, explotar, reducir o impedir el uso hostil del espectro electromagnético por el adversario y, a la vez, conservar la utilización de dicho espectro en beneficio propio.

La plataforma descrita en el presente artículo tendría también aplicación en este tipo de escenarios. Así por ejemplo, los UAVs podrían servir para detectar, localizar e identificar los sistemas electrónicos que el adversario ha desplegado en el campo de batalla (operaciones ESM, *Electronic Support Measures*),

[2] http://www.ejercito.mde.es/unidades/Madrid/rew31/Organizacion/index.html

así como también para emplear contramedidas electrónicas (ECM, *Electronic Counter-Measures*) con el objetivo de impedir o reducir la utilización de estos sistemas. La ventaja que ofrece en estos escenarios nuestra plataforma es su gran flexibilidad, consecuencia del uso de máquinas virtuales altamente configurables a la hora de desplegar el software necesario. De este modo sería posible adaptar dinámicamente la instalación software de un UAV para, por ejemplo, activar y configurar contramedidas específicas para un sistema electrónico cuyo uso por parte del adversario se haya previamente detectado.

3.5. Operaciones de combate

Finalmente, sería posible aplicar la plataforma en escenarios y operaciones de combate. Algunos ejemplos de operaciones de este tipo podrían ser la observación de blancos de artillería (obteniendo las coordenadas precisas en las que se encuentra el blanco para su supresión), la designación de blancos (empleando por ejemplo marcadores láser para armas guiadas) o las misiones en las que el UAV llevaría a cabo el ataque dirigido a objetivos de alto valor estratégico usando sus propias armas.

En este sentido resultaría de interés la posibilidad ofrecida por nuestra plataforma de migrar máquinas virtuales entre distintos vehículos autónomos. Así por ejemplo, en el caso de que un UAV detectase un blanco y no dispusiese de los medios necesarios para atacarlo (bien por haber terminado su munición, bien por carecer del armamento necesario), podría ser reemplazado por otro con las capacidades operativas requeridas, migrando la máquina virtual del primer UAV al segundo para mantener la información de contexto de la operación.

4. Exploración inicial de viabilidad

En esta sección describiremos los primeros pasos que se han dado para estudiar la viabilidad de la propuesta. Dadas las limitaciones existentes en las plataformas de MAVs en cuanto a peso, tamaño, consumo energético, conectividad y potencia de cómputo, se ha optado por utilizar para las pruebas placas Raspberry Pi 2 Model B (https://www.raspberrypi.org/), con procesador Broadcom ARM 7, 4 cores 900 MHz, 1 GB RAM, 4 puertos USB2 y puerto micro SD. Esta placa, de tamaño y consumo energético reducido, nos permitirá evaluar la viabilidad de ejecutar herramientas de virtualización sobre plataformas hardware de capacidad similar a las que podrían utilizarse en entornos de MAVs (a modo de ejemplo, NAVIO+ Raspberry Pi Linux autopilot: http://www.emlid.com).

En una primera fase, después de instalar el sistema operativo Raspbian (Debian específico para procesadores ARM) en la placa, se procedió a configurar un nuevo kernel de Linux para activar las funcionalidades de virtualización que no están disponibles en el kernel original. Una vez que la placa ya ejecuta el nuevo kernel, se instalaron las diferentes aplicaciones necesarias para proveer funcionalidades de virtualización, siendo la más importante la de QEMU (http://www.qemu.org/), que permite la emulación de diferentes plataformas. En nuestro caso, utilizaremos máquinas virtuales ARM, con el fin de contar con la aceleración que provee KVM (http://www.linux-kvm.org/). KVM forma parte del núcleo de Linux desde la versión 2.6.20, y permite que las máquinas virtuales puedan acceder al hardware a bajo nivel. Una vez instaladas todas las aplicaciones necesarias, se procedió a instalar una imagen de OpenSuse específica para ARM, y que será la imagen utilizada para todas las máquinas

Table 1. Comparativa del gasto energético

	Estrés		**Iperf**	
Procesos	VMs (s)	Host (s)	VMs (mA)	Host (mA)
1	19.73	6.1	345	296
2	21	6.1	361	296
3	23	6.15	372	296
4	24 (2 proc.) y 40 (2 proc.)	6.3 (2 proc.) y 11.3 (2 proc.)	382	298

virtuales. Finalmente, comprobamos que dada la limitación de memoria de 1GB de RAM, el número de máquinas virtuales que se pueden lanzar, cada una de ellas con 256 MB de memoria, es de cuatro.

En la segunda fase del estudio de viabilidad se buscó comprobar cuál es la penalización, por usar máquinas virtuales, en términos de consumo energético y potencia de cálculo. Para medir el consumo energético de las placas se utilizó el vatímetro de la compañía Monsoon (https://www.msoon.com/LabEquipment/PowerMonitor/). La intensidad que consume la placa en reposo (sin ninguna máquina ejecutándose) es de 291 mA, valor que usaremos como referencia en el resto de pruebas. Como primera prueba se lanzan las máquinas virtuales una a una y se mide el consumo energético en cada paso (se deja el core 1 para el host y el resto de cores para las MVs, una máquina por core siempre que sea posible). La intensidad es de 293 mA para cualquier número de máquinas virtuales.

En una segunda prueba, se ejecuta en cada máquina virtual un proceso de estrés, consistente en una aplicación que eleva el consumo de CPU al 100% ejecutando un número predeterminado de operaciones. En el experimento se calcula el tiempo medio de ejecución de dicha aplicación a medida que el número de máquinas virtuales se incrementa desde 1 hasta 4. Los resultados se recogen en la columna *Estrés* de la Tabla 1. En el caso de cuatro procesos hay que destacar que dos máquinas virtuales comparten el mismo core, por lo que el tiempo empleado por esas aplicaciones es casi el doble que en las anteriores (40s en la tabla). Tras repetir el experimento sin máquinas virtuales, se observa que el uso de éstas introduce una penalización de prestaciones, reflejada en el aumento del tiempo medio de ejecución.

Para finalizar la segunda fase, se calculará el gasto energético al ejecutar el programa *iperf* (https://iperf.fr/) en una maquina virtual, el cual se configura para transmitir un tráfico UDP de 400kbps a un servidor en otra Raspberry. Los resultados se recogen en la columna *Iperf* de la Tabla 1, mostrando el consumo energético de la placa Raspberry a medida que el número de máquinas virtuales varía entre 1 y 4. Como en el caso anterior, tras repetir el experimento sin máquinas virtuales, se observa que el uso de las mismas produce una penalización en el consumo energético que se incrementa con el número de máquinas.

En la última fase medimos el consumo energético de la placa Raspberry actuando como punto de acceso inalámbrico. Aunque otras configuraciones son posibles, en la primera fase de nuestro proyecto desplegaremos la red inalámbrica utilizando algunos de los MAVs como puntos de acceso. En este experimento tenemos un despliegue sencillo con tres equipos, estando dos de ellos conectados al tercero, que hace de punto de acceso. En el experimento medimos el consumo energético del punto de acceso para tasas de transmisión de $b = [0.5, 1, 1.5, 2]$ Mbps. Los resultados de la intensidad consumida por la placa son de $I = [362, 373, 394, 397]$ mA, respectivamente, reflejando un aumento razonable del consumo a medida que aumenta el tráfico cursado.

5. Conclusiones

Las pruebas exploratorias preliminares realizadas demuestran la viabilidad de utilizar herramientas de virtualización sobre dispositivos hardware de capacidad limitada, si bien todavía es necesario realizar nuevas pruebas para verificar el rendimiento de servicios virtualizados (eg. VoIP, grabación y transmisión de vídeo, etc.), así como evaluar las prestaciones ofrecidas por otras placas hardware de capacidad limitada en nuestra maqueta de pruebas. Como parte del flujo de trabajo del proyecto DRONEXT, se cubrirán estos aspectos, así como el diseño de la plataforma de comunicaciones para soportar los casos de uso presentados, la implementación de la misma y su validación mediante un demostrador.

Agradecimientos

El trabajo realizado en este artículo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, mediante el proyecto DRONEXT (TEC2014-54335-C4-2-R). Los autores desean agradecer a Miguel A. Díaz su colaboración en el estudio del estado del arte de dicho proyecto.

Referencias

1. M. Quaritsch, E. Stojanovski, C. Bettstetter, G. Friedrich, H. Hellwagner, B. Rinner, M. Hofbaur, M. Shah, Collaborative microdrones: applications and research challenges, In Proceedings of the 2nd International Conference on Autonomic Computing and Communication Systems (Autonomics '08), Article 38, Brussels, Belgium.
2. J. Scherer, S. Yahyanejad, S. Hayat, E. Yanmaz, T. Andre, A. Khan, V. Vukadinovic, C. Bettstetter, H. Hellwagner, B. Rinner, An Autonomous Multi-UAV System for Search and Rescue, In Proceedings of the First Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications for Civilian Use (DroNet '15), ACM, pp. 33-38, New York, USA.
3. I. Maza and A. Ollero, Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms, in Distributed Autonomous Robotic Systems, pp. 221-230, Springer, 2007.
4. M. Quaritsch, R. Kuschnig, H. Hellwagner, B. Rinner, A. Adria, U. Klagenfurt, Fast aerial image acquisition and mosaicking for emergency response operations by collaborative UAVs, In Proceedings of the 8th International ISCRAM Conference, pp. 1-5, 2011.
5. M. Quaritsch, K. Kruggl, D. Wischounig-Strucl, S. Bhattacharya, M. Shah, B. Rinner, Networked UAVs as aerial sensor network for disaster management applications, e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, vol.127, no.3, pp.56-63, 2010.
6. I. Rubin, R. Zhang, Placement of UAVs as Communication Relays Aiding Mobile Ad Hoc Wireless Networks, IEEE Military Communications Conference, 2007 (MILCOM 2007), pp.1-7, Oct. 2007.
7. F. Valera, I., M. A. Diaz, M. Bagnulo, C. Vidal, A. Lopez, C. Crego, D. Gonzalez, L. de Berrazueta, D. Diez, J. Diez, Diseño de red de comunicaciones para UAVs de nueva generación, Congreso de I+D en Defensa y Seguridad (DESEi+d 2013), November 2013, Madrid, Spain.
8. I. Vidal, F. Valera, M. Diaz, M. Bagnulo, Design and practical deployment of a network-centric remotely piloted aircraft system, Communications Magazine, IEEE, vol.52, no.10, pp.22-29, 2014.

Un nuevo método numérico basado en el modelo de redes para simular el problema de persecución-evasión de sistemas autopropulsados.

Gimeno Bellver, Fernando [1]*, Caravaca Garratón, Manuel [1], Soto Meca, Antonio [1], Vera López, Juan Antonio [1] y Fernández Martínez, Manuel [1].

[1] Centro Universitario de la Defensa, Academia General del Aire. c/ Coronel López Peña s/n, 30720, Santiago de la Ribera, Murcia.

Email: manuel.caravaca@cud.upct.es (MCG); antonio.soto@cud.upct.es (ASM)

* Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: fernando.gimeno@cud.upct.es (FGB)

Abstract: En este trabajo se estudia el problema de caza-evasión de dos sistemas autopropulsados que se desplazan en un espacio bidimensional. El objetivo del perseguidor es situarse en la posición óptima para capturar al evasor. Por el contrario la estrategia del evasor consiste en evitar esa situación. Estas dos estrategias combinadas conducen a un problema de ecuaciones diferenciales acopladas. Se ha llevado a cabo la resolución numérica de un problema concreto de persecución por movimiento de camuflaje y evasión clásica mediante el software SimKinet, basado en el Método de Simulación por Redes, desarrollado por miembros de nuestro grupo. Dicho método establece una analogía entre las ecuaciones diferenciales que gobiernan un proceso físico y una red eléctrica equivalente. Su eficiencia lo convierte en una alternativa óptima para el estudio de modelos complejos de caza-evasión.

Keywords: caza-evasión, Network Simulation Method, simulación numérica

---

1. Introducción

Los fenómenos de persecución y evasión aparecen en una gran cantidad de sistemas complejos, tanto biológicos, como captura de presas, luchas por territorio o comportamiento de apareamiento; en sistemas ingenieriles como sistemas robóticos o teoría de control; o en sistemas militares como el combate aéreo o el auto-guiado de misiles. Las estrategias de caza y evasión son un campo de estudio aplicable a las tecnologías de doble uso.

Se conocen diferentes estrategias de persecución y de evasión; cada estrategia consiste en una diferente ley diferencial de comportamiento. Ejemplos comunes son la persecución clásica, el movimiento de camuflaje o de orientación constante. En el caso de comportamientos de evasión encontramos la evasión clásica, de movimiento aleatorio o la detección óptica [1, 2].

En este estudio preliminar se analiza una estrategia de persecución por movimiento de camuflaje frente a la estrategia de evasión clásica [3]. El perseguidor (P) y el evasor (E) son partículas autopropulsadas a velocidad constante que se desplazan en el plano *xy* de acuerdo a sus estrategias de movimiento, que vienen dadas por un conjunto de ecuaciones diferenciales acopladas. La velocidad de P siempre es superior a la de E, ya que esa condición garantiza que siempre se producirá el alcance. Para un radio de captura $\varepsilon > 0$, y para cada condición inicial $r_P(0)$ y $r_E(0)$ tales que $|r(0)| = |r_P(0) - r_E(0)| > \varepsilon$ siempre existe un tiempo finito de captura T tal que $|r(T)| = \varepsilon$ [2, 3].

La estrategia de movimiento de camuflaje es una estrategia de persecución en la cual P se dirige hacia E de forma que se mantiene constante el ángulo de aproximación. Con esta estrategia el perseguidor parece estacionario desde el punto de vista de la presa (movimiento de paralaje nulo), a excepción del cambio de tamaño de la sección transversal. Si este efecto es despreciable debido a sus dimensiones frente a la distancia, como es el caso de un caza o de un misil, el evasor es incapaz de discernir el movimiento del agresor, que aparece estacionario frente al fondo [4]. Asimismo, la ley de control de la evasión clásica conduce al evasor hacia una trayectoria que se aleja directamente del perseguidor, alineando el vector velocidad con la línea de unión de ambos [5].

Estas dos leyes de control de movimiento se han planteado y resuelto numéricamente mediante el software SimKinet, basado en el método de simulación por redes (*Network Simulation Method*, NSM), método numérico basado en la analogía eléctrica de los procesos de transporte [6]. La versatilidad y potencia del NSM facilita la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales complejos [7], de forma que se puede aplicar a sistemas de persecución más realistas y en tres dimensiones, temas en los que se encuentran trabajando actualmente los autores.

2. Modelo matemático

A continuación se exponen las ecuaciones diferenciales del movimiento del perseguidor. Estas leyes de control, basadas en el movimiento de camuflaje, son [1]:

$$\frac{dx_P}{dt} = \cos\theta_P \tag{1}$$

$$\frac{dy_P}{dt} = \operatorname{sen}\theta_P \tag{2}$$

$$\frac{d\theta_P}{dt} = -\frac{\mu}{\sqrt{(x_P - x_E)^2 + (y_P - y_E)^2}}\left[(x_P - x_E)(\nu \operatorname{sen}\theta_E - \operatorname{sen}\theta_P) - (y_P - y_E)(\nu\cos\theta_E - \operatorname{sen}\theta_P)\right] \tag{3}$$

Las ecuaciones diferenciales del movimiento del evasor, basadas en la evasión clásica [1], son:

$$\frac{dx_E}{dt} = \nu\cos\theta_E \tag{4}$$

$$\frac{dy_E}{dt} = \nu \operatorname{sen}\theta_E \tag{5}$$

$$\frac{d\theta_E}{dt} = \frac{\mu}{\sqrt{(x_P - x_E)^2 + (y_P - y_E)^2}}\left[(x_P - x_E)(\operatorname{sen}\theta_E) - (y_P - y_E)(\cos\theta_E)\right] \quad (6)$$

En estas expresiones (x_P, y_P) y θ_P son la posición cartesiana y el ángulo de orientación del perseguidor, mientras que (x_E, y_E) y θ_E representan, correspondientemente, la posición y orientación del evasor. El parámetro μ es una constante de control de dirección y ν es la relación de velocidades entre el evasor y el perseguidor. Como la velocidad del perseguidor está normalizada a 1, ν será siempre menor que 1 para cumplir la condición de alcance. El control de dirección μ modifica la velocidad angular de giro, por lo que se trata de una aceleración normal que depende del tipo de mecanismo autopropulsado. En nuestro ejemplo se han elegido valores idénticos para el perseguidor y el evasor, pero las ecuaciones se pueden generalizar para constantes diferentes.

Las condiciones iniciales del evasor se eligen en el origen de coordenadas con ángulo inicial nulo, y las coordenadas y ángulo del perseguidor se eligen al azar. En nuestras simulaciones se han escogido los valores $x_P(0) = 1$, $y_P(0) = 1$ y $\theta_P(0) = \pi$, $\mu = 5$ y $\nu = 0.5$.

3. Método de Simulación por Redes. Software SimKinet

El método de simulación por redes es un método numérico que establece una analogía formal entre un sistema de ecuaciones diferenciales y una red eléctrica. El origen de esta metodología se encuentra en los primeros años setenta, desarrollada a partir del estudio de sistemas termodinámicos a través de los algoritmos conocidos como *network thermodynamics* [7]. A día de hoy, su aplicación a diferentes campos resulta muy extendida, incluyendo estudios de transferencia de calor, difusión-reacción y estudio de esquemas cinéticos complejos en sistemas químicos, flujo de aguas subterráneas, problemas inversos o sistemas ecológicos, entre otros [7].

Para resolver un problema de ecuaciones diferenciales por medio del NSM es necesario diseñar, en primera instancia, el modelo de red eléctrica equivalente al problema matemático concreto, para después simular el circuito mediante un software adecuado de análisis de circuitos, tal como PSpice. Para diseñar la red eléctrica, primeramente se asigna un circuito eléctrico independiente a cada ecuación diferencial del modelo, que estará conectado con el resto de circuitos a través de un nodo común. Por lo tanto, el problema global equivale a una red eléctrica que contiene tantos circuitos como ecuaciones. Cada sumando de cada ecuación diferencial se considera como una rama de corriente que converge en un nodo apropiado, en el cuál se satisface la ley de los nodos de Kirchhoff. Debido al signo matemático de los sumandos de cada ecuación, sus corrientes asociadas serán de dos tipos: ramas de corriente entrantes (signo negativo) y salientes (signo positivo). La analogía eléctrica establece que, para el problema que nos ocupa, el voltaje de dicho nodo es precisamente el valor de la variable que aparece en la derivada temporal de cada ecuación.

Cada rama de corriente de la red se implementa mediante un determinado dispositivo eléctrico. En general, se emplean tres:

(a) Un condensador, asociado a la derivada de la variable en las ecuaciones (1-6). La corriente I_c en los extremos del capacitor es $I_c = c\ \mathrm{d}V/\mathrm{d}t$, por lo que las derivadas de cada una de nuestras ecuaciones pueden modelarse con un condensador de 1F, con corriente saliente, dado que sus signos se tomarán siempre como positivos.

(b) Fuentes de corriente controladas por voltaje. Estos dispositivos permiten definir en su circuito una función que dependa de cualesquiera voltajes de la red, aun cuando se encuentren en otros circuitos. De este modo, todos los sumandos que sean función de una o más de las variables incógnita de las ecuaciones diferenciales pueden modelarse sencillamente con estas fuentes. Para el criterio de signos, atenderemos al signo global del sumando en la ecuación.
(c) Un resistor de valor muy alto, que se emplea únicamente para garantizar la convergencia en el circuito.

Con todos estos ingredientes estamos en disposición de modelar por completo el equivalente eléctrico del problema (1-6). Como ejemplo, tomemos la ecuación (6), que reescribimos en la forma de la ley de Kirchhoff de los nodos:

$$\frac{d\theta_E}{dt} - \frac{\mu}{\sqrt{(x_p - x_E)^2 + (y_p - y_E)^2}}[(x_p - x_E)(\text{sen}\,\theta_E) - (y_p - y_E)(\cos\theta_E)] = 0$$

Como se observa en la Figura 1, el circuito asociado a esta ecuación contiene un condensador de capacidad 1F conectado a tierra. Por lo tanto, el voltaje del nodo es precisamente el valor de θ_E, y la corriente es saliente. El otro sumando es una función compleja de las variables del problema. No tenemos más que implementar dicha función en la fuente de corriente controlada por voltaje, G y, finalmente, acoplar el circuito global a la tierra común. Debido a su signo, la corriente de la fuente es entrante hacia el nodo. Para terminar el circuito, colocamos el resistor de alto valor en la última rama en paralelo, tal y como se muestra en la figura 1.

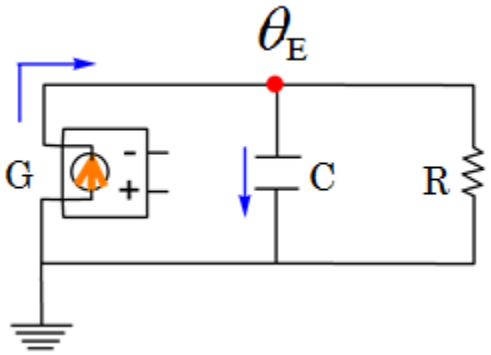


Figura 1. Circuito eléctrico equivalente a la ecuación diferencial (6).

Para completar la red, repetiremos el proceso para cada ecuación, y así tendremos una red eléctrica con seis circuitos principales, de dos nodos cada uno: uno común (tierra) y el nodo independiente cuyo voltaje es, en cada momento, el valor de la variable independiente. Tras este proceso, únicamente hemos de fijar los valores iniciales de los condensadores.

El software SimKinet, desarrollado por los autores, presenta una ventaja ya que, bajo una interfaz sencilla, implementa de manera automática el modelo de red una vez que el usuario ha introducido las ecuaciones en el entorno del programa. A partir de ese punto, ninguna manipulación matemática ha de llevarse a cabo, ni sobre las ecuaciones, ni sobre los parámetros de ajuste del paso del método numérico. El software posee una interfaz gráfica propia, aunque también puede exportar los datos en diferentes formatos [8]. En los últimos años, el NSM se ha investido como uno de los métodos numéricos de mayor eficiencia y rapidez [9], y bajo el entorno SimKinet, su manejo se facilita hasta el

punto de que puede emplearse como herramienta para la docencia en cursos universitarios y pre-universitarios.

4. Resultados y discusión

En esta sección se muestran los resultados de la persecución y evasión detallados en los apartados anteriores. En la Figura 2 se muestra el mapa de persecución en dos dimensiones correspondiente a la estrategia de persecución en movimiento de camuflaje y evasión clásica. La curva negra corresponde al persecutor y la roja al evasor. A raíz de los resultados se observa que el movimiento de ambos cumple el tipo de trayectoria prevista. El evasor, a partir del inicio, gira rápidamente para escapar del perseguidor y, en algunos determinados instantes cambia repentinamente su trayectoria para seguir alejándose, lo que es compatible con la evasión clásica. Por su parte, se observa como el perseguidor mantiene un paralaje aproximadamente constante con un acercamiento permanente al blanco, coherente con el movimiento de camuflaje.

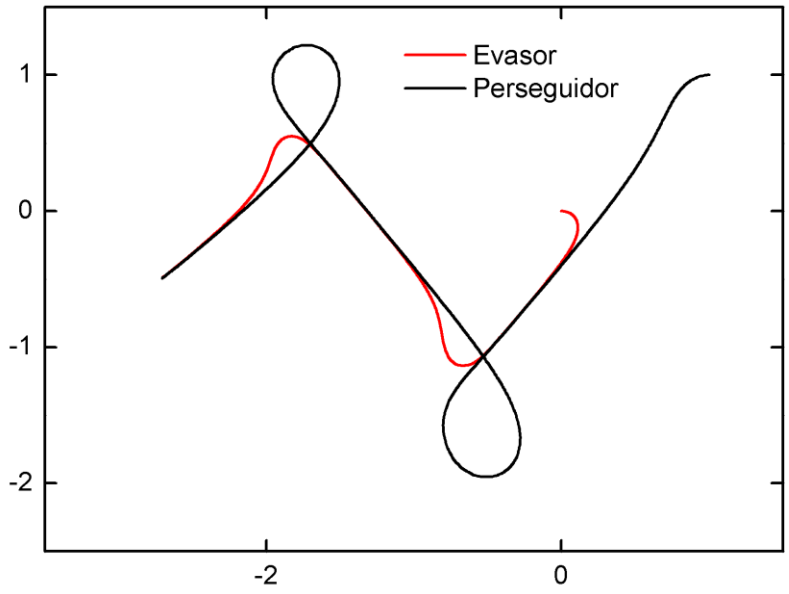


Figura 2. Mapa de persecución-evasión en 2D para las estrategias de persecución por movimiento de camuflaje (curva negra) y evasión clásica (curva roja).

En la Figura 3 se muestra un detalle de la Figura 2 para el primer tramo de acercamiento de la trayectoria, hasta un tiempo de 2.5 s. Los puntos numerados muestran las posiciones del persecutor y el evasor a tiempos iguales. En esta figura se observa con más detalle la estrategia de paralaje constante del atacante, mientras que el evasor trata de escapar rápidamente del centro en los tiempos iniciales.

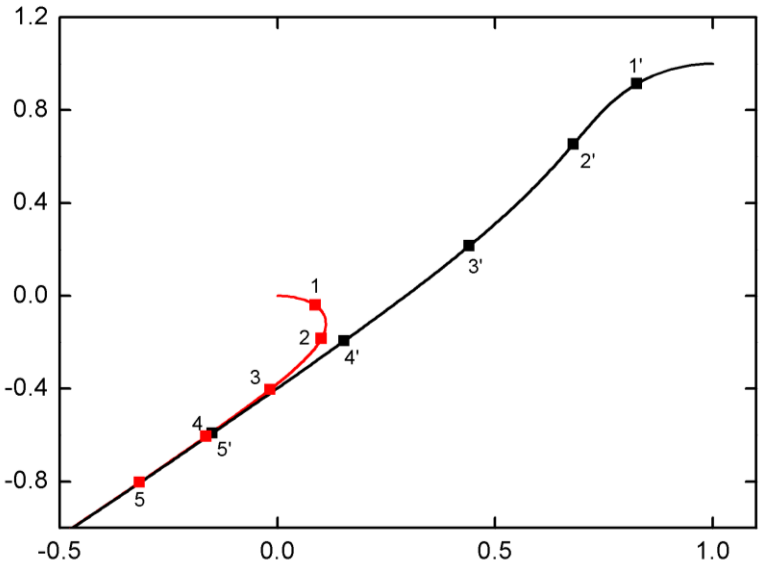


Figura 3. Detalle de la Figura 2 hasta tiempo $t = 2.5$ s. Los pares de números representan las posiciones instantáneas del persecutor y el evasor a tiempos idénticos.

A partir de la Figura 2 se observan tres distancias de mínimo acercamiento. En la Figura 4 se representa la distancia relativa entre persecutor y evasor en función del tiempo. El mínimo de distancia absoluto se encuentra a tiempo $t = 2.54$ s, con un valor $d = 0.001$. Como criterio de intercepción se debe escoger una distancia mínima que represente el impacto o la detonación del dispositivo, en su caso. Para nuestras simulaciones la intercepción se realizaría en primer mínimo citado, que en función de nuestras unidades resulta una distancia coherente.

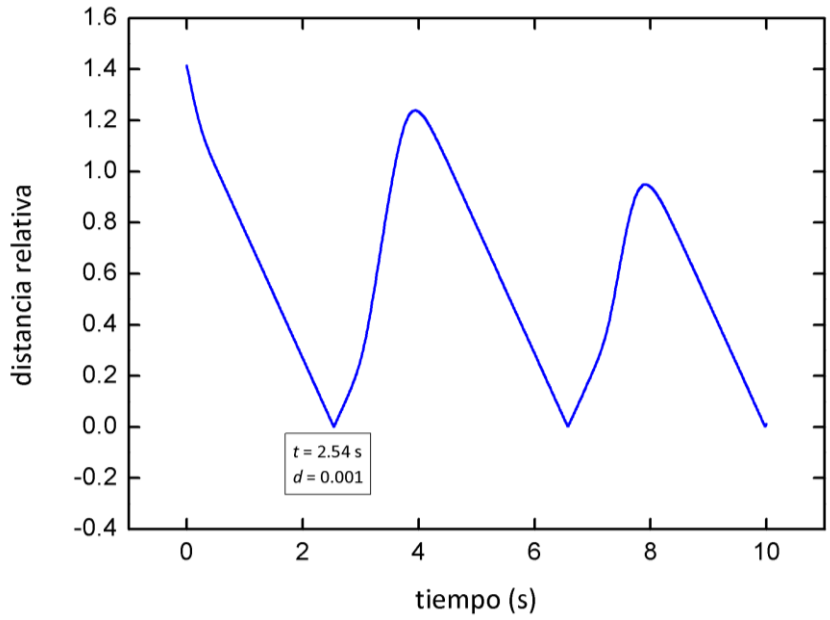


Figura 4. Dependencia de la distancia relativa entre perseguidor y evasor con el tiempo. El mínimo absoluto se encuentra en $t = 2.54$ s, y posee un valor $d = 0.001$.

5. Conclusiones

Las estrategias de caza y evasión son un campo de alto interés aplicable a las tecnologías de doble uso. La complejidad de los modelos matemáticos reales hace necesario el empleo de software especializado con gran capacidad de cálculo. El NSM se establece como una alternativa rápida y muy eficiente para la resolución de complejos sistemas de ecuaciones diferenciales, y posee una utilidad directa en la resolución de modelos de caza y evasión, dado que la analogía eléctrica facilita el tratamiento del problema sin necesidad de tener en cuenta manipulaciones sobre el tiempo de paso del método numérico, un gran problema de los algoritmos de simulación aun cuando sean de paso de tiempo variable.

El software SimKinet construye automáticamente el modelo de red y resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales sin más que introducirlas a través de su interfaz, lo cual facilita el tratamiento del problema y lo hace apto para el empleo de una gran variedad de usuarios.

En la actualidad, los autores se encuentran trabajando en el estudio de un sistema más realista de caza y evasión, que incluya movimiento en tres dimensiones y características reales del perseguidor y evasor, aplicados concretamente al entorno del Ejército del Aire.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro Universitario de la Defensa de San Javier y la Academia General del Aire su estrecha colaboración con este proyecto.

Referencias

1. Wei, E.; Justh, E.W.; Krishnaprasad, P.S. Pursuit and an Evolutionary Game, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **2009,** *465*, 1539–59.
2. Justh, E.W.; Krishnaprasad, P.S. Steering Laws for Motion Camouflage, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **2006**, *462*, 3629–43.
3. Pais, D.; Leonard, N.E. Pursuit and Evasion: Evolutionary Dynamics and Collective Motion, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference (American Institute of Aeronautics and Astronautics)*, **2010**.
4. Rawlins, A.D. A Note on a Camouflage Pursuit Problem, *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics* **2011**, *2*.
5. Scott, W.; Leonard, N.E. Pursuit, herding and evasion: A three-agent model of caribou predation, en *American Control Conference (ACC)* **2013**, 2978-83.
6. Gonzalez-Fernandez, C. F.; Alhama, F.; Horno, J.; Lopez-Garcia, J. J. *Network Simulation Method*; Research Singpost: Trivandrum, 2002.
7. Caravaca, M.; Sanchez-Andrada, P.; Soto, A.; Alajarin, M. The network simulation method: a useful tool for locating the kinetic–thermodynamic switching point in complex kinetic schemes. *Physical Chemistry Chemical Physics* **2014**, *16*, 25409-25420.
8. Escorihuela, J. *Determinación del punto de switch cinético termodinámico en esquemas cinéticos mediante el software SimKinet*; Trabajo Fin de Grado CUD, 2015.

9. Moya, A.A. Theory of the formation of the electric double layer at the ion exchange membrane–solution interface. *Physical Chemistry Chemical Physics* **2015**, *17*, 5207-5218.

Capacidades del Túnel Aerodinámico del Centro Universitario de la Defensa de San Javier

Serna-Serrano, José[1,*], López-Belchí, Alejandro[1] y Sánchez-Velasco, Francisco Javier[1]

[1] Centro Universitario de la Defesa de San Javier
C/ Coronel López Peña s/n
30720 Santiago de la Ribera – Murcia (ESPAÑA).
jose.serna@cud.upct.es(JSS), alejandro.lopez@cud.upct.es (ALB), fjavier.sanchez@cud.upct.es (FJSV)

***** Autor Principal y responsable del trabajo: jose.serna@cud.upct.es (JSS)

Abstract: El túnel de viento del CUD de San Javier es una instalación aerodinámica de circuito abierto a impulsión para estudios de flujos subsónicos. El nivel de homogeneidad de la corriente en la entrada de la sección de ensayos es del 99% salvo las regiones de capa límite (muy reducidas) y con un nivel de fluctuaciones medio inferior al 1% del flujo libre, reduciéndose drásticamente este valor para las frecuencias de interés en la mayor parte de flujos aeronáuticos. En lo referente a instrumentación, para las medidas de presión, temperatura y anemometría intrusiva, se dispone de sensores de presión de muy alta resolución, un escáner de presión de 16 canales, varios termopares, y un sistema de anemometría de hilo caliente. Adicionalmente, se dispone de medios para la caracterización óptica (no intrusiva) del flujo mediante un muy avanzado sistema de estéreo-anemometría por imagen de partículas (stereo-PIV), consistente en un láser pulsado de 145 mJ, dos cámaras de captura ultra rápida de doble fotograma y un complejo software de calibración y control. Es interés de los autores la realización de estudios de flujos transicionales que puedan devenir en sistemas de control de flujo sobre superficies aerodinámicas, estando abiertos a cualquier tipo de estudio que resulte de interés para el sector aeronáutico/Defensa.

Keywords : túnel aerodinámico; PIV; calidad de flujo; flujos transicionales; ensayos a escala ;

---

1. Introducción

En los últimos cincuenta años la potencia de cálculo de los ordenadores ha aumentado exponencialmente (ley de Moore), con lo que una gran cantidad de problemas de diseño

fluidodinámico se han podido afrontar gracias a simulaciones numéricas CFD (Computational Fluid Dynamics). Es un hecho que el CFD ha supuesto un gran ahorro económico en los primero estadios de diseño de elementos aerodinámicos, sin embargo, estos problemas se caracterizan por la disparidad de escalas existentes, lo que obliga a que la resolución a todos los niveles del campo fluido sea, a fecha de hoy, imposible mediante la simulación CFD en problemas complejos. Supongamos que queremos resolver el campo fluido alrededor de una aeronave comercial, en estas el número de Reynolds ($\mathrm{Re} = \frac{\mathrm{L_c V_c}}{\nu}$), principal parámetro que condiciona el comportamiento aerodinámico, es del orden Re ~ 10^8[1]. Este parámetro tiene en cuenta el tamaño típico de la aeronave, que será de unas decenas de metros L_c ~ 10 (m). En estas condiciones, se conoce [1] que existen regiones próximas a la aeronave, denominadas capas límites, que tienen un comportamiento turbulento, siendo relevantes movimientos en escala η, tales que $\mathrm{Re}_\eta = \frac{\eta \mathrm{V_c}}{\nu} \sim 1$ [2]. Resulta, que a estas regiones se deben comportamientos tan críticos como la resistencia global de la aeronave (que impacta en el consumo de combustible) o la entrada en pérdida. Por tanto, para conocer con precisión qué ocurre alrededor de la aeronave hay que resolver tamaños η, que son 10^8 menores que el tamaño global del problema, siendo necesarios para la simulación numérica, del orden de miles de millones de nodos (puntos en los que se discretizan las ecuaciones), a lo que hay que sumar el carácter no estacionario de los fenómenos. Este hecho se traduce en unos tiempos de cálculo inviables con los desarrollos con los tiempos característicos que emplea la industria. Por ello, los ensayos en túnel aerodinámico siguen siendo claves en las últimas etapas de diseño de aeronaves y en las investigaciones de comportamientos fluidodinámicos.

Un túnel aerodinámico es una instalación cuya finalidad es la obtención de un flujo (en el caso que nos ocupa, de aire) en condiciones conocidas, controladas, y con una "calidad" de flujo elevada, entendiendo por "calidad" homogeneidad en la vena fluida y nivel de fluctuaciones bajo, tanto modulaciones potenciales como fluctuaciones debidas a turbulencia [3]. Según el tamaño característico de los estudios que se deseen acometer, y la velocidad deseada, el diseño de la instalación se verá condicionado. Para estudios subsónicos de investigación, una posible solución, económica en cuanto a diseño, son las instalaciones abiertas, en que se puede prescindir de uniones acodadas y cambiadores de calor [3]. En particular, la instalación recientemente construida en el Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier, está concebida para este tipo de estudios de investigación y complemento a la actividad formativa de los futuros oficiales del Ejército del Aire (EA) en las asignaturas de carácter aeronáutico que, por las características específicas del EA, siguen en sus años en la Academia General del Aire.

2. Descripción y consideraciones de diseño de la instalación

La instalación diseñada consiste en un túnel abierto a impulsión (Figura 1). La planta de potencia es un ventilador centrífugo Soler&Palau CMT4.500-205/15 de 15 kW, que, gracias a un rectificador/inversor Siemens Micromaster M430, controlado vía software permite el funcionamiento de la instalación en un amplio rango de velocidades. La selección del ventilador ha tenido en cuenta la pérdida de carga en los distintos elementos de la instalación [4] y el caudal de aire necesario.



Figura 1. Fotografía de la instalación a su recepción (sin sección de ensayos).

A continuación del ventilador, el difusor permite la deceleración del flujo para minimizar la pérdida de carga en el elemento siguiente. Buscando que la instalación sea compacta y, al mismo tiempo, se evite la separación del flujo en este elemento, el difusor se subdivide en 9 canales internos, cada uno de los cuales tiene un ángulo de apertura en cada dirección del espacio de 15º.

El acondicionador de flujo, teniendo en cuenta las indicaciones de [3,5, 6], consiste en 2 núcleos de paneles de abeja de tamaños de celda/anchura de 6/60 mm y 3/20 mm respectivamente, seguidos de 4 rejillas de laminarización de tamaño de malla de 1 mm y transparencia 0.5. Para las separaciones de los distintos elementos se ha tenido en cuenta la ley de caída de turbulencia isotrópica generada en las rejillas [6]. El sistema de construcción y montaje permite la rápida extracción de estos elementos para su limpieza y/o sustitución.

Finalmente, la contracción, realizada con una estructura de costillas y revestimiento tiene una relación de áreas de 9:1, valor suficiente para reducir, por *stretching*, la vorticidad remanente del flujo y obtener un flujo altamente laminar al final de la misma. Los perfiles de la contracción en las 2 direcciones del espacio son sendos polinomios de 5º grado que garantizan la continuidad $\mathscr{C}^1$ en los puntos de unión con contracción y con el módulo siguiente, como grado de libertad queda el punto de inflexión de los polinomios, cuya posición se ha optimizado para minimizar los gradientes de presión adversos que se generan en las zonas de unión de los elementos anterior y posterior de modo que se evita la separación local del flujo y la consecuente introducción de perturbaciones no estacionarias propias de la eyección de vorticidad en las zonas de flujo separado [7,8].

2.1. Técnicas de Medida Disponibles

La Tabla 1 recoge los equipos de medida disponibles con las magnitudes fluidodinámicas que se pueden obtener de los mismos. De especial relevancia es el equipo avanzado de anemometría estéreo PIV que permite obtener el vector velocidad tridimensional en un plano de medida. Este equipo, mostrado en la Figura 2 consta de un láser de doble pulso de 145 mJ (Litron/Bernoulli), y dos cámaras

de doble fotograma (DANTEC FlowSense EO 4M: 2048x2048px 20.4fps) con sistema de montaje de óptica de Scheimpflug para permitir la visión estereoscópica. Además, se dispone de toda la óptica de alta potencia (ajustable) para generación de plano láser, objetivos y filtros fotográficos, y el software de adquisición y postproceso de los campos de velocidad adquiridos, así como de un sistema de generación de sembrado no tóxico. Con la configuración actual se pueden realizar medidas con tamaños de campo del orden de 100x100 mm.

Equipo	Magnitud a medir	Detalles Técnicos	Información obtenida
Cámara de Alta Velocidad	Imágenes	AOS Technologies AC 1000 fps 1024x1024px.	Cualitativa. Caracterización temporal de líneas de corriente (visualización de flujos)
Sistema de Adquisición de Datos	Este sistema digitaliza las señales de otros equipos	Sistema de National Instruments Bastidor: NICDaq 9178 – Módulos: NI9215, NI9213, NI9402, NI9205	Permite la digitalización de señales analógicas (presión, hilo caliente, termopares), la adquisición de señales digitales(disparos de láser de estéreo-PIV) y la generación de señales digitales para la sincronización de diferentes equipos en un mismo ensayo
Escáner de Presión	Presión Diferencial (en 16 puntos)	Scanivalve DSA 3217	Medida de presión diferencial entre 16 canales y puerto de referencia
Sensor de Presión	Presión diferencial (en 1 punto)	GE DRUCK LP 1000 series FS = 500 Pa (Incert: 0.1% FS)	Medida de presión diferencial en 1 punto (usado para medida de velocidad con sistema de pitot-estática con baja resolución temporal debido a la línea neumática)
Anemómetro de Hilo Caliente	Velocidad (1D) del aire (en 1 punto)	DANTECMiniCTA y sonda recta (4-36 ohm)	Velocidad puntual del aire con alta resolución temporal (resuelve hasta kHz) necesario para la caracterización de velocidades de perturbación en flujos transicionales y turbulentos
Estéreo-PIV	Velocidad (3D) del aire en 1 plano de medida	DANTEC (detalles en el texto y Figura 2)	Campo de velocidades con resolución temporal hasta 15 Hz.

Tabla 1. Equipos de medida disponibles en CUD-AGA.

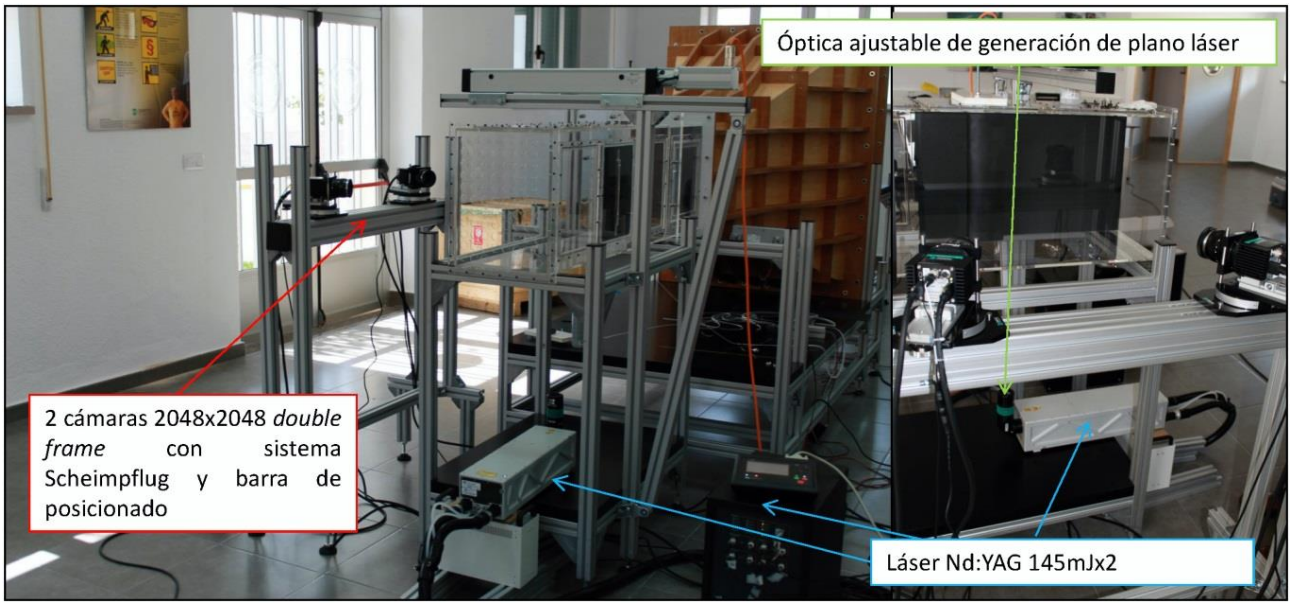


Figura 2. Equipo de anemometría estéreo-PIV.

2.2. Capacidad de desarrollo de modelos

Para la generación de los modelos a ensayar, el CUD dispone de los elementos recogidos en la Tabla 2.

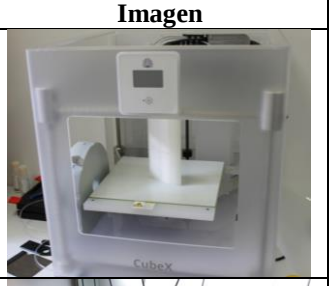
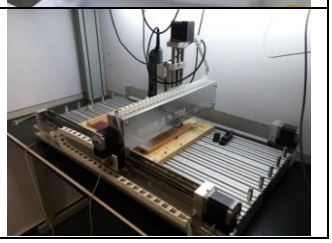
Elemento	Descripción Técnica	Imagen
Impresora 3D	CubeX 3D Tamaño de hilo 2 mm aprox Material: Plástico ABS	
Escáner 3D y fresadora de control numérico	HEIZ HIGH-Z 720 X = 720mm, Y = 420 mm, Z = 110 mm Dx = Dy = Dz = 10 µm	

Tabla 2. Equipos para el desarrollo y fabricación de modelos en CUD - AGA.

3. Caracterización del flujo obtenido en la instalación

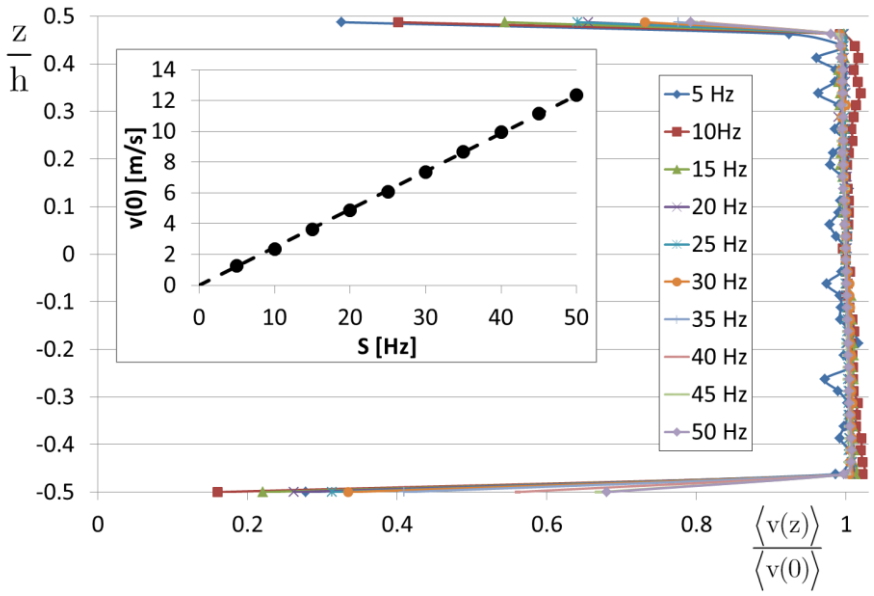


Figura 3. Caracterización de flujo. Perfiles de flujo medio para distintas velocidades y curva de funcionamiento de la instalación.

Para caracterizar el flujo de la instalación se ha realizado un barrido en una sección de ensayos diáfana por medio de un tubo de pitot de 2 mm de diámetro, con una toma de presión estática en la propia sección de ensayos. La diferencia de presión entre la toma de pitot y estática se ha medido con un captador de presión diferencial GE DRUCK de fondo de escala (FS) 500 Pa e incertidumbre (no linealidad y repetitividad) del orden de 0.1% FS. Los perfiles de velocidad, adimensionalizados con la velocidad en el centro del canal se muestran en la Figura 3, donde se muestra la curva de

funcionamiento de la instalación (serie de puntos negros), que relaciona la frecuencia comandada a la planta de potencia con la velocidad en el centro del canal. Se puede observar que para el rango de velocidades estudiado (desde 1.5 hasta 12 m/s), el flujo es homogéneo en la sección de ensayos. Las capas límites de las paredes superior e inferior tienen un espesor inferior al 5% de la altura del canal de flujo, con lo que su efecto de bloqueo se puede considerar despreciable. El caso de menor velocidad (S=5Hz, v(0)~1.5m/s) presenta un rizado mayor, este rizado no parece sintomático de una peor homogeneidad de la corriente sino que se debe a la resolución del captador de presión, obsérvese que la presión dinámica del flujo es del orden de $\mathrm{p_d} = \frac{1}{2}\rho \mathrm{v}^2 \sim 1.4\mathrm{Pa}$, siendo medida con un captador que tiene una incertidumbre de 0.5 Pa.

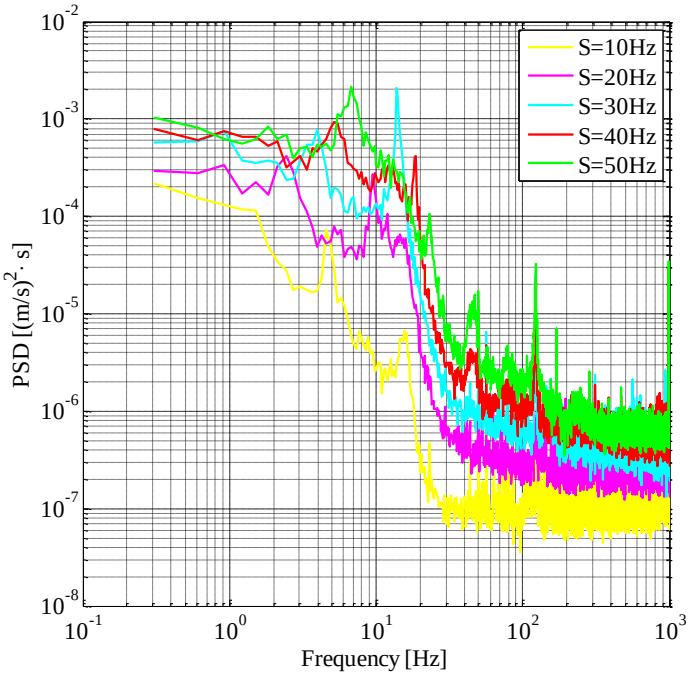


Figura 4. Caracterización de flujo. Espectros de fluctuaciones de velocidad en punto medio s.e.

La Figura 4 muestra la densidad espectral de potencia (PSD) en el punto central de la sección de ensayos determinada a partir de medidas de hilo caliente. En particular, la adquisición se ha realizado a 10 kHz durante un tiempo de 120 s, promediando 32 espectros para cada una de las series mostradas. De estas gráficas se puede extraer el nivel de fluctuación de la corriente con suficiente resolución temporal, información que no se puede obtener de las medidas con tubo de pitot. En todos los casos, el nivel de fluctuación es del orden del 0.9% del valor medio de la velocidad. Sin embargo, a la vista de la Figura 4, el mayor nivel de fluctuaciones corresponde a frecuencias inferiores a los 30 Hz. La integración de los espectros mostrados en la Figura 4 para frecuencias mayores de 30 Hz, sitúa el nivel de fluctuación en torno al 0.5%, este nivel se puede deber al propio ruido electrónico de la técnica de medida pues no se detectan escalados de frecuencia propios de los flujos turbulentos. En cuanto al nivel de fluctuación de baja frecuencia, estas perturbaciones no se prevé que influyan en los flujos que se desean estudiar, por ejemplo, en flujos transicionales separados o de capas de cortadura, para los tamaños a estudiar en la instalación, las frecuencias excitadas / amplificadas son del orden de centenares de Hz [9].

4. Secciones de ensayos

Las primeras secciones de ensayos disponibles en el CUD de San Javier consisten en unos cajones de metacrilato, material elegido por sus propiedades ópticas para la realización de anemometría láser, acabados en una placa perforada para conseguir una mayor pérdida de carga y permitir ensayos a baja velocidad con el ventilador funcionando a un régimen de revoluciones suficientemente elevado. En estas secciones de ensayo se insertarán los modelos a analizar, se dispone de

- Perfil NACA 0015. Fabricado en impresora 3D y con acabado superficial controlado. Sobre este perfil se harán ensayos de flujos desprendidos para la detección de "stallcells" [10] y la determinación de los mecanismos de inestabilidad que dan lugar a las mismas. Para ello se dispondrá de un sistema de control/variación del ángulo de ataque del modelo y una guía controlada por software para el posicionado del mismo.
- Cilindro hemiesférico. Fabricado con la misma técnica que el perfil anterior, este modelo simula un submarino / torpedo. En estos sistemas, cuando avanzan a ángulo de ataque elevado se forman estructuras tridimensionales en la zona delantera [11] cuyo conocimiento es necesario para desarrollar técnicas de control de las mismas, de modo que se disminuya la resistencia al avance y por tanto se incremente el alcance de estos sistemas.

La Figura 5 muestra la sección de ensayos actualmente fabricadas y los modelos que están listos para ser ensayados.

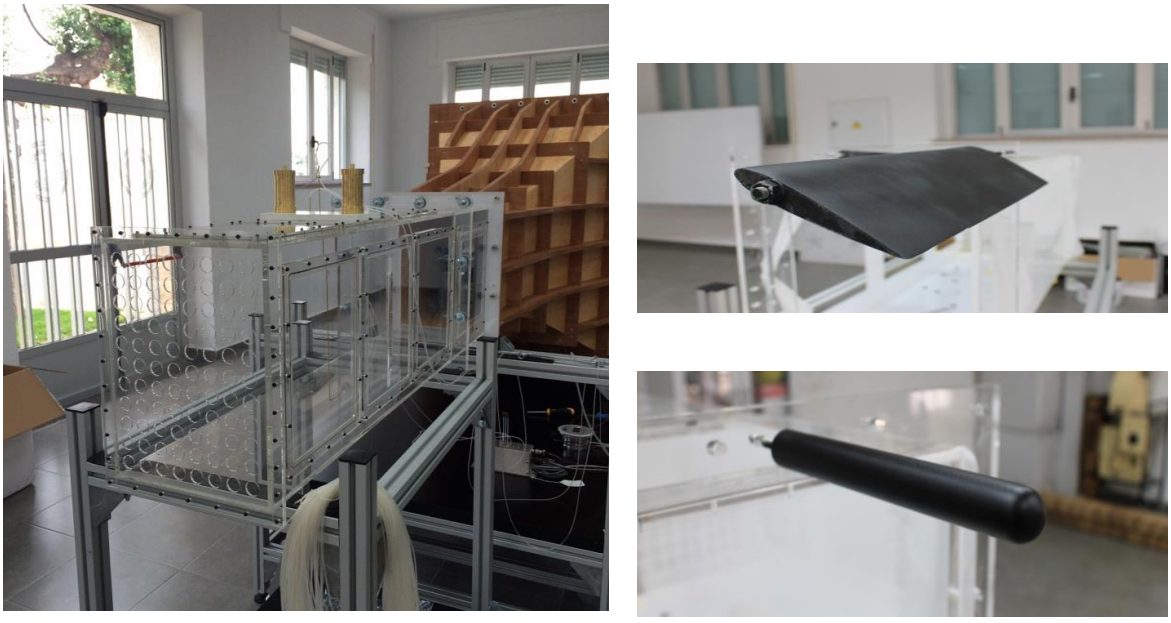


Figura 5. Izquierda: Secciones de ensayos para caracterización de flujo y montaje de modelos. Derecha superior: Perfil NACA 0015. Derecha inferior: Cilindro hemiesférico.

5. Conclusiones

El presente trabajo muestra que el Centro Universitario de la Defensa de San Javier dispone de una instalación con suficiente calidad para el estudio de flujos subsónicos en que se produzcan fenómenos transicionales, dado el nivel de homogeneidad y de fluctuaciones de la corriente en la zona habilitada para la sección de ensayos. Adicionalmente, se han presentado las técnicas de medida disponibles con

sus capacidades y limitaciones y las secciones de ensayos que se han fabricado con la finalidad de comenzar las tareas investigadoras en la instalación. La instalación permite realizar estudios sobre geometrías que tengan un comportamiento quasi-bidimensional en longitudes de 300 ó 400 mm (ancho y alto de la sección de ensayos respectivamente), o cuerpos 3D de dimensiones características 30 – 50 mm, para evitar fenómenos de interferencia con las paredes. El uso de la instalación por parte del personal del CUD de San Javier, está abierto a posibles colaboraciones con otros grupos que sean de interés para los ámbitos de Defensa y de las Tecnologías de Doble Uso.

Agradecimientos

La fabricación de esta instalación y su dotación de equipos experimentales ha sido financiada con fondos propios del Centro Universitario de la Defensa de San Javier. J. Serna agradece al Dr. Ezequiel González Martínez (ETSIA – UPM) su asesoramiento en el desarrollo de software y su autorización para el uso del software de control del ventilador; también agradece a D. Fernando Fernández Arcas y D. José Miguel Velasco Gómez su asesoramiento en referencia a suministradores y labores de fabricación. Así mismo, los autores quieren agradecer a D. José Luis Roca y D. Fernando Gimeno (CUD San Javier) su colaboración en la fabricación de maquetas.

Referencias

1. Torenbeek, E. *Advanced Aircraft Design: Conceptual Design, Technology and Optimization of Subsonic Civil Airplanes.* July 2013. Ed. Wiley. 436 pp.
2. Frisch, U. *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov.* November 1995. Ed. Cambridge University Press. 296 pp.
3. Barlow, J.B., Rae, W.H. & Pope, A. *Low-Speed Wind Tunnel Testing.* 3rd Edition. March 1999. Ed. Wiley. 728 pp.
4. Serna, J. *Experimental Studies on Transitonal Separated Boundary Layers.* Ph.D. Thesis. Universidad Politécnica de Madrid. February 2013.
5. Mehta, R.D. & Bradshaw, P. Design rules for small low speed wind tunnels. *Aeronautical Journal*, **1979**, 443 – 449.
6. Farell, C. & Youssef, S. Experiments on turbulence management using screens and honeycombs. *Journal of Fluids Engineering*, **1996**, *118*, 26 - 32.
7. Downie, J.H., Jordinson, R. & Barnes, F.H. On the design of three – dimensional wind tunnel contractions. *Aeronautical Journal*, **1994**, 287 – 295.
8. Mikhail, M.N. Optimum Design of Wind Tunnel Contractions. *AIAA Journal*, **1979**, 17(5) 471 – 477.
9. Serna, J. & LázaroB.J. The final stages of transition and the reattachment region in transitional separation bubbles. *Experiments in Fluids* **2014**, 55(4), 1-17.
10. Rodríguez, D. & Theofilis, V. On the birth of stall cells on Airfoils. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, **2010**, 25, 105-117.
11. Le Clainche, S., Li, J.I., Theofilis, V. & Soria, J. Flow around a hemisphere-cylinder at high angle of attack and low Reynolds number. Part I: Experimental and numerical investigation. *Aerospace Science and Technology*, **2015**, 44, 77-87.

Modelado DPM aplicado a sistemas supresores de firma IR por agua nebulizada en exhaustaciones de turbinas de gas marinas

Pernas Urrutia, Julio Manuel [1,*] y Riola Rodríguez, Jose Maria [2]

[1] Ingeniero Naval y Oceánico, UDC, Doctor por la ETSIAN, Jefatura de Apoyo Logístico – Dirección de Construcciones Navales (JAL – DIC); Email: jperur1@fn.mde.es

[2] Doctor Ingeniero Naval, UPM, Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación – Dirección General de Armamento y Material; Email: jriorod@fn.mde.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo;

Resumen: De las firmas del buque de guerra destaca la firma IR, con una contribución muy significativa de los gases de exhaustación en la banda 3 – 5 μm del espectro utilizada por misiles auto-guiados IR. Las últimas líneas de investigación encaminadas a reducir la temperatura de los gases de exhaustación contemplan sistemas híbridos, añadiendo rociadores de agua a los sistemas tradicionales o pasivos (mediante mezcla con aire ambiente). El presente artículo resume la metodología empleada para el modelado, con técnicas de mecánica de fluidos computacional, de los fenómenos físicos relacionados con la interacción entre fases derivada de inyectar agua nebulizada en el interior de conductos de exhaustación de turbinas de gas marinas con el fin de reducir la temperatura de los gases y, por lo tanto, su contribución a la firma IR del conjunto de la plataforma.

Keywords: firma infrarroja; agua nebulizada; modelo fase discreta; turbina de gas marina;

---

1. Introducción

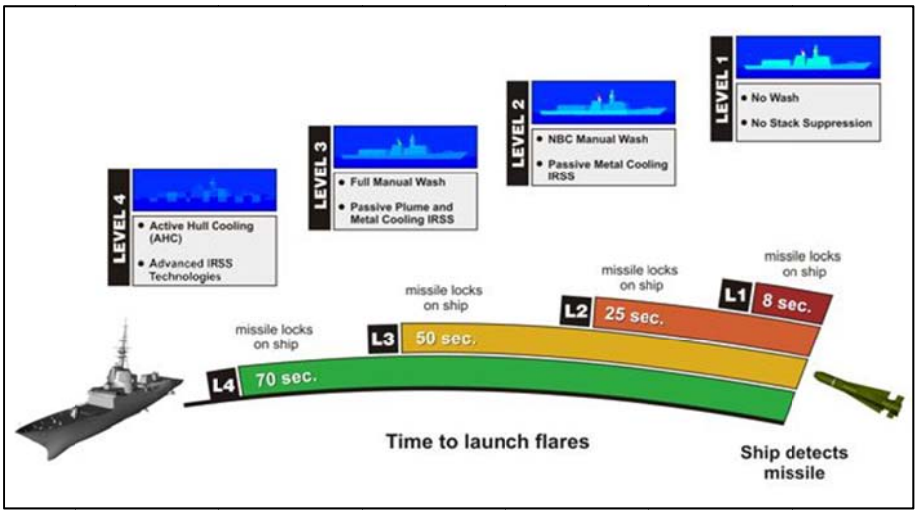
A la hora de evaluar la capacidad de supervivencia del buque de guerra actual habrá que considerar, entre otros aspectos, la susceptibilidad o incapacidad de la unidad para evitar ciertos sensores. La susceptibilidad dependerá, a su vez, del espectro de energía emitido y/o reflejado y de la modificación de parámetros físicos, encontrándose intrínsecamente relacionada con las *firmas del buque* [1].

De las firmas del buque de guerra destaca la firma infrarroja (IR), la cual tiene que ver con la radiación emitida y/o reflejada en dicha franja del espectro electromagnético. La firma IR tendrá un impacto negativo en la supervivencia del buque de guerra por constituirse en fuente de guiado de misiles IR, a la vez que permitirá su detección, clasificación y seguimiento.

Dentro de las fuentes fundamentales de radiación IR del buque de guerra, destacan los gases de exhaustación de las turbinas de gas, con una contribución muy significativa en la banda de los 3 a 5 µm del espectro (utilizada por misiles auto-guiados IR). También contribuirán, en menor medida, en la banda de los 8 a 12 µm, banda empleada por los sistemas de visión nocturna para la detección, clasificación y seguimiento mediante el empleo de cámaras termográficas tipo *flir* [2].

Si bien existen diversos sistemas para la reducción de la firma IR generada por los gases de exhaustación en turbinas de gas marinas, la solución mayoritaria pasa por emplear aire ambiente para la refrigeración, por efecto eductor-difusor, tanto de los penachos de gases como de las superficies visibles de los conductos de exhaustación, en base a la instalación de elementos estructurales de tipo *pasivo* en el último tramo del conducto de exhaustación, reduciendo la temperatura de los gases por debajo del nivel de supresión de firma IRSS III – 523 K [3].

En la actualidad, diferentes fabricantes se encuentran probando prototipos de tipo híbrido, consistentes en añadir rociadores de agua al sistema de enfriamiento tradicional o pasivo y consiguiendo, de esta forma, rebajar la temperatura de los gases emitidos a la atmósfera por debajo del nivel de supresión de firma IRSS IV – 423 K [4]. La siguiente ilustración muestra el tiempo disponible para el lanzamiento de contramedidas en función del nivel de supresión de firma IRSS adoptado:



2. Técnicas numéricas aplicadas al problema fluido

2.1 Ecuaciones de continuidad, momento y energía

Los modelos matemáticos de la mayoría de los fenómenos físicos se pueden expresar a partir de sistemas de ecuaciones en derivadas parciales cuasi-lineales de primer o segundo orden. En este sentido, a la hora de modelar el flujo de los gases en el interior de conductos de exhaustación se emplearán las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, añadiendo una tercera ecuación al anterior sistema de ecuaciones (ecuación de conservación de la energía) para el estudio de la interacción entre fases (gases exhaustación – partículas de agua), con el fin de contabilizar los fenómenos relacionados con la transferencia y/o intercambio de masa, momento y calor entre fases. La ecuación de conservación de la masa (continuidad) se puede expresar de la siguiente forma [5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \tag{1}$$

La anterior expresión será válida tanto para flujos compresibles como para flujos incompresibles. El termino S_m representa la masa añadida a la fase continua (gases de exhaustación) desde la segunda fase dispersa (gotas de agua). La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento respecto de un sistema de referencia inercial (no acelerado), adoptará la siguiente forma [5]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \tag{2}$$

donde el término p representa a la presión estática y los términos $\rho\vec{g}$ y $\vec{F}$ representan a las fuerzas gravitacionales y a la resultante de fuerzas externas que actúan sobre el volumen fluido respectivamente. El tensor de esfuerzos viscosos $\bar{\bar{\tau}}$ será igual a:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \tag{3}$$

donde μ es la viscosidad molecular, I es el tensor unidad y el segundo término a la derecha de la igualdad representa el efecto de expansión volumétrica.

A la hora de contabilizar fenómenos relacionados con la transferencia de calor o la compresibilidad de gases, habrá que plantear la siguiente ecuación, conocida como ecuación de conservación de la energía [5]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot \left(\vec{v}(\rho E + p) \right) = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + \left(\bar{\bar{\tau}}_{eff} \cdot \vec{v} \right) \right] + S_h \tag{4}$$

donde k_{eff} es la conductividad efectiva $\left[k_{eff} = (k + k_t) \right]$, $k_t$es la conductividad térmica turbulenta $\vec{J}_j$ y es el flujo de difusión de especies j.

2.2 Modelo de turbulencia para la fase gaseosa

Un modelo de turbulencia es un procedimiento numérico que permite relacionar los valores medios de las fluctuaciones de las variables con los valores promedio, lo que se conoce como cierre del sistema de ecuaciones. Dentro de los modelos de turbulencia disponibles, se encuentran los de promedio de las ecuaciones de gobierno RANS (*Reynolds Averaged Navier – Stokes*), que permitirán conocer los efectos de la turbulencia sobre los valores medios de las variables velocidad y presión, dando lugar a un campo de flujo promediado y simulado más uniforme y reduciendo drásticamente el número de puntos de la discretización espacial/temporal necesario para la obtención de las variables buscadas. Una de las variantes, la *realizable k - ε*, presenta las siguientes formas para el cálculo de la energía cinética turbulenta *ε* y su tasa de disipación *k* [6]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) == \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S\varepsilon - \frac{\rho C_2 \varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b + S_\varepsilon \tag{6}$$

donde: $C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta+5}\right], \eta = S\frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$

La turbulencia viscosa, μ_t, se computará de la siguiente forma:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{7}$$

siendo en este caso C_μ:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S\frac{kU^*}{\varepsilon}} \tag{8}$$

donde:

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \tag{9}$$

y donde $\overline{\Omega}_{ij}$ es el tensor ratio de rotación media respecto de un sistema de referencia móvil con una velocidad angular ω_k. Las constantes A_0 y A_S son, respectivamente $A_0 = 4.04$ y $A_S = \sqrt{6}\cos\phi$.

2.3 Modelado DPM de la fase discreta

Los modelos de fase discreta DPM consisten en considerar la fase gaseosa como un medio continuo donde se resuelven las ecuaciones de gobierno, mientras que la fase discreta se resuelve mediante el seguimiento de un número elevado de gotas de pequeño tamaño a través del medio gaseoso, intercambiando con este masa, momento y energía. El cálculo de la trayectoria de las partículas se realiza a partir de la integración del balance de fuerzas que actúan sobre cada una de éstas [6]:

$$\frac{du_P}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_P) + \frac{\vec{g}(\rho_P - \rho)}{\rho_P} + \vec{F} \tag{10}$$

donde $\vec{F}$ es la aceleración adicional (fuerza/unidad de masa) y $F_D(\vec{u} - \vec{u}_P)$ es la fuerza de arrastre por unidad de masa, siendo F_D:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_P d_P^2}\frac{C_D Re}{24} \tag{11}$$

donde $\vec{u}$ es la velocidad del gas, $\vec{u}_P$ es la velocidad de la gota, μ es la viscosidad molecular del gas, ρ es la densidad del gas, ρ_P es la densidad de la gota y d_P es el diámetro de la gota.

2.4 Modelo *wave* para generación de sprays

Considerando una inyección con forma cilíndrica de radio a de un líquido a través de un orificio circular a velocidad v contra un gas incompresible y no viscoso de densidad ρ, una superficie axisimétrica, infinitesimal y arbitraria de líquido presentará la forma (polar) [6]:

$$\eta = \eta_0 e^{ikz+\omega t} \tag{12}$$

Para una relación de dispersión $\omega = \omega(k)$, que relaciona la parte real del ratio de crecimiento ω con su número de onda $k = 2\pi/\lambda$, se tienen las soluciones de onda:

$$\phi_1 = C_1 I_0(kr) e^{ikz+\omega t} \tag{13}$$

$$\psi_1 = C_2 I_1(Lr) e^{ikz+\omega t} \tag{14}$$

donde ϕ_1 y ψ_1 son la velocidad potencial y la función de corriente, C_1 y C_2 son constantes de integración, I_0 e I_1 son funciones de Bessel de primera especie, $L^2 = k^2 + \omega/v_1$, y v_1 es la viscosidad cinemática del líquido. A partir de las ecuaciones del gas, se pueden obtener sus fluctuaciones de presión a una distancia $r = a$:

$$-p_{21} = -\rho_2(U - i\omega k)^2 k\eta \frac{K_0(ka)}{K_1(ka)} \tag{15}$$

donde K_0 y K_1 son funciones de Bessel de segunda especie y u la velocidad relativa entre el líquido y el gas. Las condiciones de contorno linealizadas serán:

$$\frac{\partial u_1}{\partial r} = -\frac{\partial v_1}{\partial z} \quad \left(v_1 = \frac{\partial \eta}{\partial t}\right) \quad (v_2 = 0) \tag{16}$$

$$-p_1 + 2\mu_1 - \frac{\sigma}{a^2}\left(\eta + a^2\frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2}\right) + p_2 \tag{17}$$

referidas a la superficie libre y a las continuidades en los esfuerzos cortantes y normales, u_1 y v_1 serán las velocidades de perturbación axial y radial al líquido respectivamente y σ la tensión superficial.

Sustituyendo los valores de presión y velocidad de la anterior ecuación, se obtiene la siguiente relación de dispersión:

$$\omega^2 + 2v_1 k^2 \omega \left[\frac{I_1'(ka)}{I_0(ka)} - \frac{2kL}{k^2+L^2}\frac{I_1(ka)}{I_0(ka)}\frac{I_1'(La)}{I_1(La)}\right] = \\ = \frac{\sigma k}{\rho_1 a^2}(1-k^2a^2)\left(\frac{L^2-a^2}{L^2+a^2}\right)\frac{I_1(ka)}{I_0(ka)} + \frac{\rho_2}{\rho_1}\left(U - i\frac{\omega}{k}\right)^2\left(\frac{L^2-a^2}{L^2+a^2}\right)\frac{I_1(ka)}{I_0(ka)}\frac{K_0(ka)}{K_1(ka)} \quad (18)$$

Las siguientes funciones de valores de crecimiento máximo, Ω, y longitudes de onda, Λ, suponen una solución numérica a la anterior expresión:

$$\frac{\Lambda}{a} = 9.02\frac{(1+0.45Oh^{0.5})(1+0.4Ta^{0.7})}{\left(1+0.87{We_2}^{1.67}\right)} \quad (19)$$

$$\Omega\left(\frac{\rho_1 a^3}{\sigma}\right) = \frac{\left(0.34+0.38{We_2}^{1.5}\right)}{(1+Oh\ \ )(1+1.4Ta^{0.6})} \quad (20)$$

donde $Oh = \sqrt{We_1}/Re_1$ es el número de Ohnesorge y $Ta = Oh\sqrt{We_2}$ es el número de Taylor, $We_1 = \rho_1 U^2 a/\sigma$ y $We_2 = \rho_2 U^2 a/\sigma$ son los números de Weber del líquido y el gas respectivamente y $Re_1 = Ua/\nu_1$ es el número de Reynolds.

2.5 Modelos para el intercambio de calor y masa entre fases

El modelo de calentamiento inerte de la gota se aplicará con una temperatura de gota inferior a la de vaporización y después de que su fracción volátil se haya consumido [6]:

$$T_P < T_{vap} \quad (21)$$

$$m_p \leq (1-f_{v,0})m_{p,0} \quad (22)$$

donde T_P es la temperatura de la gota, $m_{p,0}$ es la masa inicial de la gota y m_p es la masa actual. Relacionando temperatura de partícula con calores transferidos:

$$m_P c_P \frac{dT_P}{dt} = hA_P(T_\infty - T_P) + \varepsilon_P A_P \sigma(\theta_R^4 - T_P^4) \quad (23)$$

donde c_P es el calor específico de la partícula, A_P es el área de la superficie de la partícula, T_∞ es la temperatura de la fase continua (gas), h es el coeficiente de transferencia de calor convectivo, ε_P es la emisividad de la partícula, σ es la constante de Stefan-Boltzmann y θ_R es la temperatura de radiación. Alcanzada la temperatura de vaporización, ésta seguirá aumentando hasta alcanzar el punto de ebullición, T_{bp} o hasta que la fracción volátil haya sido consumida:

$$T_{vap} \leq T_P < T_{bp} \quad (24)$$

$$m_p > (1-f_{v,0})m_{p,0} \quad (25)$$

Durante el proceso de evaporación de la gota, su temperatura se irá actualizando de acuerdo a la transferencia de calor sensible en calor convectivo y latente en el gas:

$$m_P c_P \frac{dT_P}{dt} = hA_P(T_\infty - T_P) - \frac{dm_P}{dt} h_{fg} + A_P \varepsilon_P \sigma(\theta_R^4 - T_P^4) \quad (26)$$

donde dm_P/dt representa al ratio de evaporación y h_{fg}:

$$h_{fg} = -\int_{T_P}^{T_{bp}} c_{p,g} dT + h_{fg,bp} + \int_{T_P}^{T_{bp}} c_{p,p} dT \quad (27)$$

donde $h_{fg,bp}$ es el calor latente en el punto de ebullición y $c_{p,g}$ y $c_{p,p}$ son los calores específicos de la fase gaseosa y líquida respectivamente.

La ebullición de la gota se producirá cuando ésta alcance la temperatura de ebullición, T_{bp}, y su masa exceda de la fracción no volátil:

$$T_P \geq T_{bp} \quad (28)$$

$$m_p > (1 - f_{v,0}) m_{p,0} \quad (29)$$

En el momento en el que la temperatura de la gota alcanza el punto de ebullición:

$$\frac{d(d_P)}{dt} = \frac{4k_\infty}{\rho_P c_{P,\infty} d_P} (1 + 0.23\sqrt{Re_d}) \ln\left[1 + \frac{c_{P,\infty}(T_\infty - T_P)}{h_{fg}}\right] \quad (30)$$

donde $c_{P,\infty}$ es el calor específico del gas, ρ_P es la densidad de la gota y k_∞ es la conductividad térmica del gas.

3. Resultados

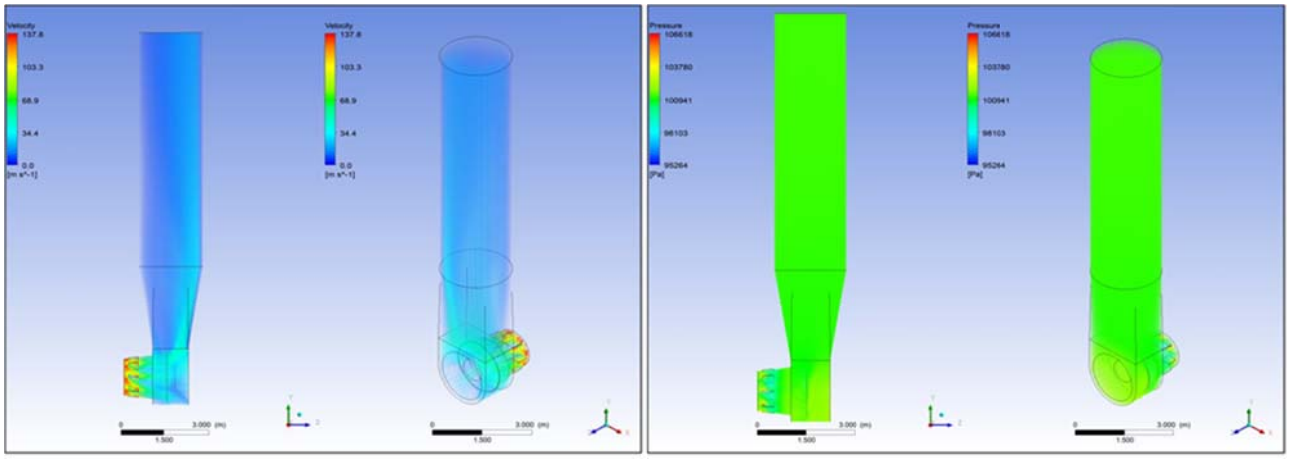
El principal objetivo de la simulación consistió en evaluar la capacidad de refrigeración de los gases de exhaustación de una turbina de gas General Electric LM 2500 mediante la inyección de agua nebulizada en el interior del conducto de exhaustación. Además se estudió:

- Incidencia de la velocidad inicial V de gotas en la altura h alcanzada por la fase discreta.
- Incidencia del parámetro N (Rosin-Rammler) en la altura h alcanzada por la fase discreta.
- Incidencia del semiángulo del cono de inyección θ en la altura h alcanzada por la fase discreta.

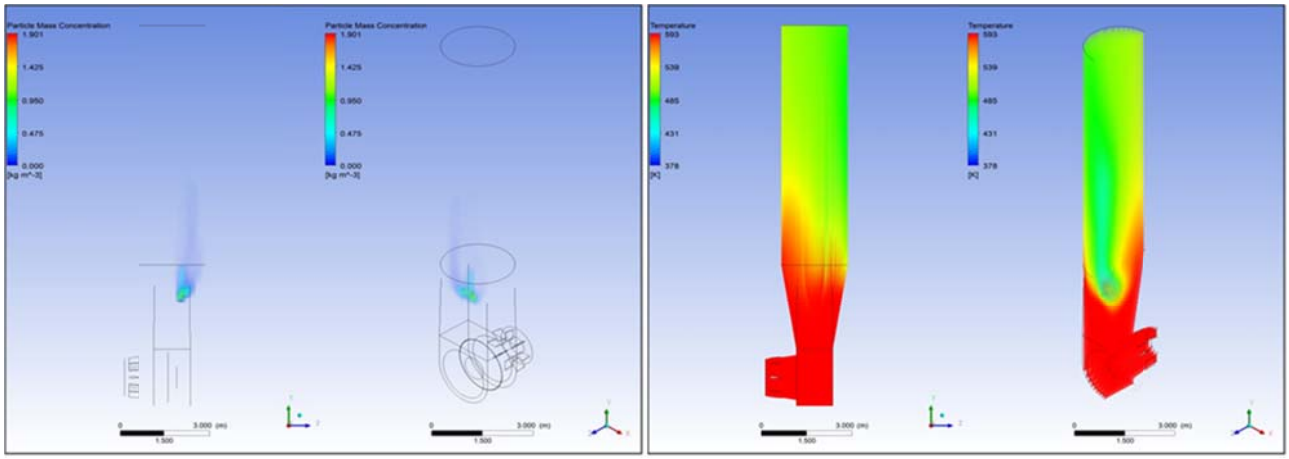
Todo este proceso se llevó a cabo en dos etapas, una primera en la que se procedió a la modelización del flujo a la salida de la turbina de potencia, con el fin de determinar las características del flujo (campos de velocidades y presiones) y una segunda en la que se estudió la interacción entre fases, mediante la variación de forma secuencial de los diferentes parámetros anteriormente expuestos.

La cantidad de fase discreta inyectada para cada posición de palanca (régimen de turbina) fue la necesaria para reducir la temperatura de los gases de exhaustación por debajo del nivel de supresión de firma IRSS III (523 K), a partir de la evaporación total de la misma.

A la hora de modelar los sprays utilizados en las simulaciones, se seleccionó la configuración geométrica de cono hueco, con velocidades *V* de partícula 3x, 4x y 5x (relativas y en sentido opuesto a la de paso de los gases por el punto de inyección), distribuciones de partículas Rosin-Rammler con tamaños de gota Ø de 50 a 150 µm, parámetros de distribución *N* de 4, 8 y 12, y semiángulos de cono de inyección *θ* de 15º, 30º y 45º. La siguiente ilustración muestra, a modo de ejemplo, los resultados gráficos obtenidos para las variables v y P (velocidad y presión) para la condición de palanca 50:

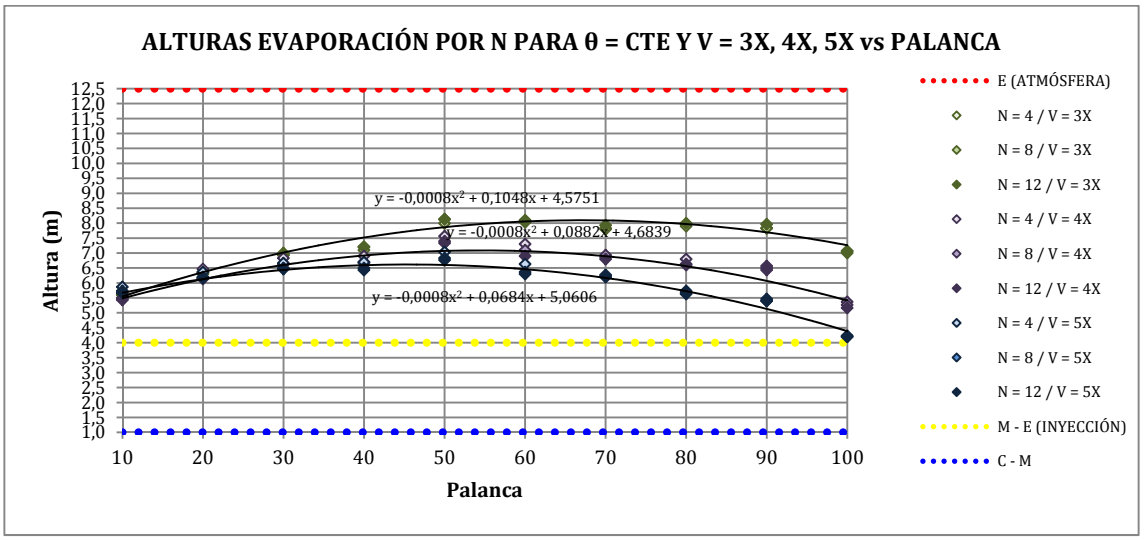


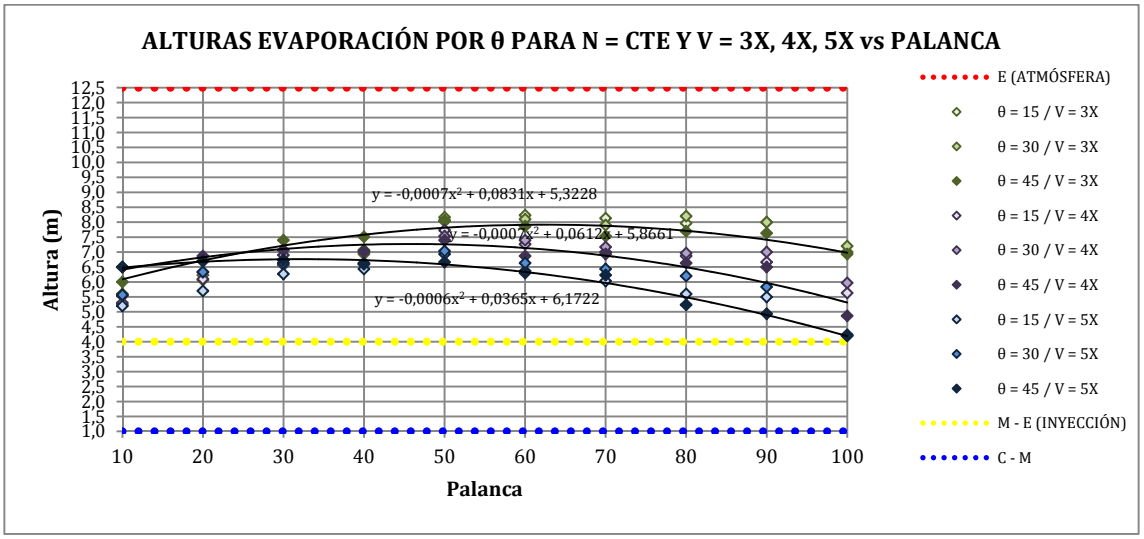
La siguiente ilustración muestra, a modo de ejemplo, los resultados del modelo DPM de concentración de fase discreta y temperatura resultante de los gases de exhaustación, para la configuración de fase discreta FL_{DPM} = 0,9 kg/s, T_{gota} = 289 K, θ = 15º, N = 12 y V = 77,5 m/s y régimen turbina de gas PALANCA 40:



Las siguientes gráficas resumen los resultados obtenidos de alturas h de fase discreta alcanzadas, previa evaporación total, en el conducto de exhaustación en base a dos grupos:

- Parámetros N, V y altura de fase discreta h.
- Parámetros θ, V y altura de fase discreta h.



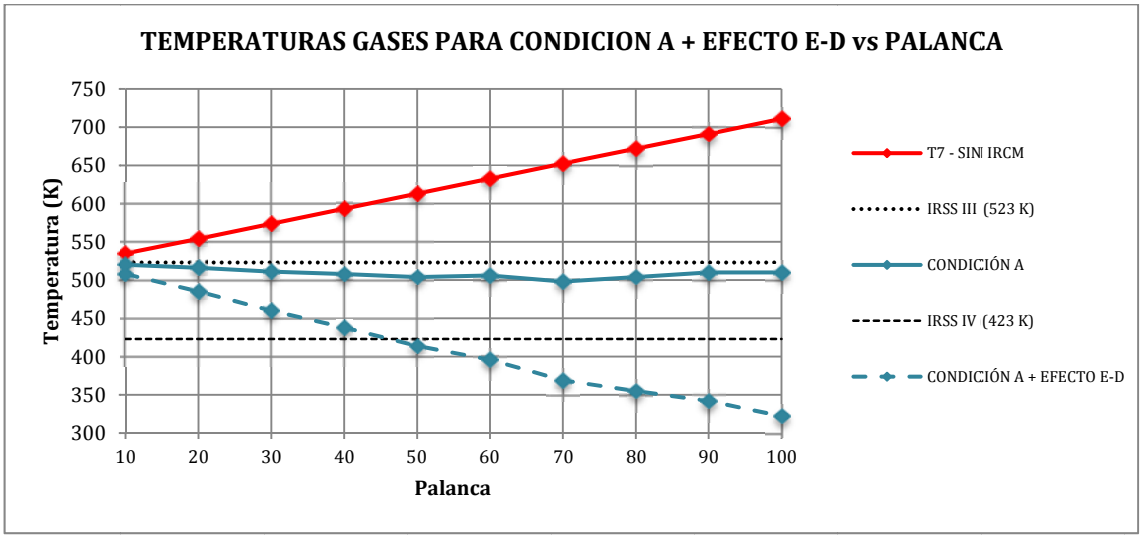


4. Conclusiones

La incidencia de los parámetros V, θ y N en la altura h alcanzada por la fase discreta, previo a su evaporación total, es la siguiente:

- Velocidad inyección V, en relación inversa.
- Semiángulo de inyección θ, en relación inversa
- Parámetro de distribución de gotas N, en relación inversa.

La siguiente gráfica resume los valores de temperatura de los gases de exhaustación sin ningún sistema de refrigeración IRCM, la temperatura resultante de los gases con configuración óptima de spray – *condición A* ($V = 5\text{x}$, $\theta = 45$ y $N = 12$) y la temperatura resultante de los gases por superposición del efecto del sistema pasivo eductor-difusor. Como se puede comprobar, el sistema híbrido de refrigeración de gases aquí propuesto permite rebajar la temperatura de los mismos por debajo del nivel de supresión de firma IRSS IV (423 K), a partir de un régimen de turbina de gas correspondiente a la posición de palanca 40.



Referencias

[1] Casanova Rivas, E., (2009). El Buque de Guerra. Madrid, España: Fondo Editorial de Ingeniería Naval.

[2] Vílchez, F. y Sierra, H., (1999). Detectabilidad de Buques de Combate. Congreso Panamericano de Ingeniería Naval, COPINAVAL 99, Colombia.

[3] Thompson, J., Vaitekunas, D., (2000). IR Signature Suppression of Modern Naval Ships. Davis Engineering Ltd., Ottawa, Canadá.

[4] Hiscoke, B., (2000). IR Suppression – Exhaust Gas Cooling by Water Injection. Davis Engineering Ltd., Ottawa, Canadá.

[5] Crespo Martínez, A., (2006). Mecánica de Fluidos. Madrid, España: Thomson Editores Spain Paraninfo S.A.

[6] ANSYS, Inc., (2011). FLUENT Theory Guide Release 14.0. Canonsburg, USA.

Sesión III-E

Sociedad, Economía y Humanidades

Demostrador de Conceptos de Radiofrecuencia en V-U-SHF mediante equipos SDR. Diseño y Aplicaciones Didácticas.

Mascareñas y Pérez-Iñigo, Carlos[1,*], Palma Guerrero, Juan José[1], Vázquez Mejías, Ana Isabel[1] y Bermúdez Travieso, Tomás[1]

[1]Grupo de Investigación TIC 191. Señales, Sistemas y Comunicaciones Navales. Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación. Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos. Universidad de Cádiz. 11510 Puerto Real. Cádiz

* Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: carlos.mascarenas@uca.es

Abstract: En este artículo se presenta un equipo electrónico para investigación y enseñanza desarrollado y patentado por investigadores del Grupo Señales, Sistemas y Comunicaciones Navales con el fin de proporcionar a los alumnos del Grado de Ingeniería Radioelectrónica una plataforma de ensayo en la que afianzar sus conocimientos, mediante prácticas regladas o prácticas sugeridas a iniciativa de los propios alumnos, o desarrollar sus Proyectos de Fin de Grado, Máster e incluso Tesis Doctorales. Estos instrumentos electrónicos, que normalmente son receptores de radiofrecuencia adaptados a sistemas computerizados de presentación en pantalla, representan un alto coste de adquisición y mantenimiento y son impensables en talleres de enseñanza de una pequeña Universidad Pública, lo que obliga a agudizar el ingenio del profesorado con el fin de conseguir la mejor preparación técnica, teórica y práctica, de su alumnado mediante plataformas de bajo coste. La experiencia de este Grupo de Investigación, ya demostrada desde 2012 mediante el Demostrador de Conceptos Marconi (http://marconi.uca.es)[1], ha permitido diseñar un sistema de frecuencias superiores en el cual se adaptan los dispositivos RTL-SDR a antenas servocontroladas en las bandas de VHF, UHF y SHF, siendo posible aplicar el nuevo demostrador a casi todas las asignaturas "de Radio".

Keywords: Software Defined Radio, Radiotecnia, Enseñanza, Entrenamiento, Competencia.

1. Introducción

De todos es sabida la gran dificultad que supone la detección, localización, medición, análisis, clasificación e identificación de los campos electromagnéticos radiados entre los que nos movemos diariamente. Dado que los sentidos del ser humano trabajan en frecuencias distintas a las de la radio, aquellas que se encuentran por debajo de 3.000 GHz[2], y por lo tanto son necesarios instrumentos electrónicos que permitan representar de una forma comprensible para el alumno qué es lo que se está recibiendo por la antena.

El Ingeniero Radioelectrónico, futuro Oficial Radioelectrónico de la Marina Mercante, debe ser capaz, según el Ministerio de Fomento[3], la UIT[2] y la Organización Marítima Internacional[4], no sólo de operar y mantener los equipos radioelectrónicos bajo su mando en el buque en el que navegue, sino también de los que se le encargue su instalación o reparación desde bases de mantenimiento en tierra. Así mismo es el técnico competente de los diseños de reforma de instalaciones radioeléctricas en buques civiles españoles, e incluso a veces de nueva construcción, cuando el buque porte bandera española, se construya en España para la exportación o se importe desde el extranjero hacia España[3].

Dicho esto, nos encontramos ante un alumnado que no es físicamente capaz de sentir las señales que va a utilizar y por lo tanto, adquirir el concepto correcto de las mismas es extremadamente importante. No es necesario comparar exhaustivamente “Radioelectrónica” con Puente o Máquinas Navales, mientras que los segundos “sienten” la velocidad de caída del buque, “ven” la diferencia de latitud con las estrellas, “miden” el calado a proa y popa, y los terceros “toman” temperaturas y presiones, “sienten” las vibraciones y “oyen” los ruidos generados por la máquina o por los auxiliares, el Radioelectrónico ni ve, ni oye, ni toca, ni siente las ondas de radio o los bits que circulan por una red de área local embarcada.

Por lo tanto, este Grupo de Investigación se planteó avanzar un poco más en los desarrollos del demostrador Marconi y llevarlos al campo de la *radionavegación*, la *radiolocalización* y la *radioastronomía*, pero de la forma más barata posible. Otra ventaja del Demostrador es que se planteó como proyecto abierto, por lo que su nivel de crecimiento puede ser ilimitado al permitir la participación de los diversos Departamentos e Institutos universitarios en su concepción y su aplicación práctica a los alumnos de los distintos grados de Física, Matemáticas, Ingeniería Electrónica, Informática o Aerospacial.

Por ejemplo, la Radioastronomía es una ciencia joven, nacida y evolucionada en menos de un siglo gracias al trabajo de personas no directamente relacionadas con la investigación astronómica[5]. La UIT no la contempla como un Servicio de Radiocomunicaciones, pero sí se la incluye en el cuadro de bandas de frecuencias dedicadas a distintos Servicios con el fin de proteger los ensayos científicos sobre cuerpos celestes[6]. La Radioastronomía y las Radiocomunicaciones comparten frecuencias y equipos receptores, dependiendo de a qué serie de futuros datos digitalizados se le denomine *señal* y al resto se le denomine *ruido*, primero de los conceptos que tiene que tener muy claro el Ingeniero Radioelectrónico, la *relación señal/ruido.*

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

En la figura 1 se puede apreciar el conjunto de *antenas servocontroladas* del demostrador de conceptos EAC-10 [7] que dispone de:

- Antena *parabólica Offset* con *LNB* de la *Banda Ku* y *dipolo cerrado* de 1420 MHz en su foco.
- Antena parabólica Offset con LNB de la *Banda C* y dipolo cerrado de 406 MHz
- Antena *Yagi-Uda* de 21 elementos para la frecuencia de 1420 MHz, y
- Antena *Logaritmoperiódica* de 15 elementos para las frecuencias de 200 a 800 MHz.

Todas las antenas son antenas comerciales, bien de televisión o de aficionado. Las seis antenas se instalan sobre un mástil circular que encaja perfectamente en el soporte del rotor de *elevación* Yaesu G550 y este a su vez sobre el rotor de azimut Yaesu G650. El rotor de *azimut* se soporta mediante un mástil para antenas parabólicas de un metro de altura y este sobre un conjunto de perfiles metálicos que le proporcionan estabilidad.

Para evitar el fuerte viento que suele azotar la Bahía de Cádiz, la Universidad de Cádiz nos cedió el cupulín de cristal del Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos (CASEM) del Campus de Puerto Real. Ubicación temporal hasta que, una vez comprobados e integrados todos los componentes y adquirida una base más consistente, se traslade todo el conjunto al Castillete de la Pala B del mismo edificio, pero al aire libre.

En la piso superior de la cúpula de cobre del CASEM, diez metros en vertical más abajo del cupulín, se encuentra ubicado el Museo de Astronomía Náutica y Navegación de la UCA, que es donde se encuentra ubicado el Centro de Control del Conjunto de Antenas EAC10, a 20 metros de cable coaxial por antena, estando formado por:

- *Controlador de Rotor* de Antenas Yaesu G5500.
- *Ordenador de control del Rotor* de Antenas con *software de seguimiento*.
- *Ordenador de análisis y registro de señales*
- Receptor *Analógico* de Televisión Vía Satélite.
- Receptor de Señales de Televisión *Digita*l Terrestre.
- Receptor analógico de Televisión.
- Múltiples receptores de *radio definida por software* denominados RTL-SDR[8].

Una vez conectados los rotores a su controlador y las antenas a sus receptores, nos encontramos con el siguiente montaje, que funciona perfectamente y como tal ha sido patentado por la UCA[7].

Las antenas y LNBs inyectan, mediante el *cable coaxial* y los conectores, las señales de radiofrecuencia recibidas en sendos *amplificadores de línea* (marcados de color rojo en la figura 1) y estos, que se alimentan a través de apropiados *inyectores de corriente*, a su vez en otros cables coaxiales la señal de radiofrecuencia amplificada hasta los niveles necesarios para poder llegar al sistema de recepción y procesamiento de señales y datos.

Los amplificadores de línea se ubican en la proximidad inmediata de la salida de la antena o detrás de las parábolas o de la verga con el fin de evitar la acción directa de la *energía infrarroja* emitida por el Sol, que puede elevar el *ruido en el Amplificador.*

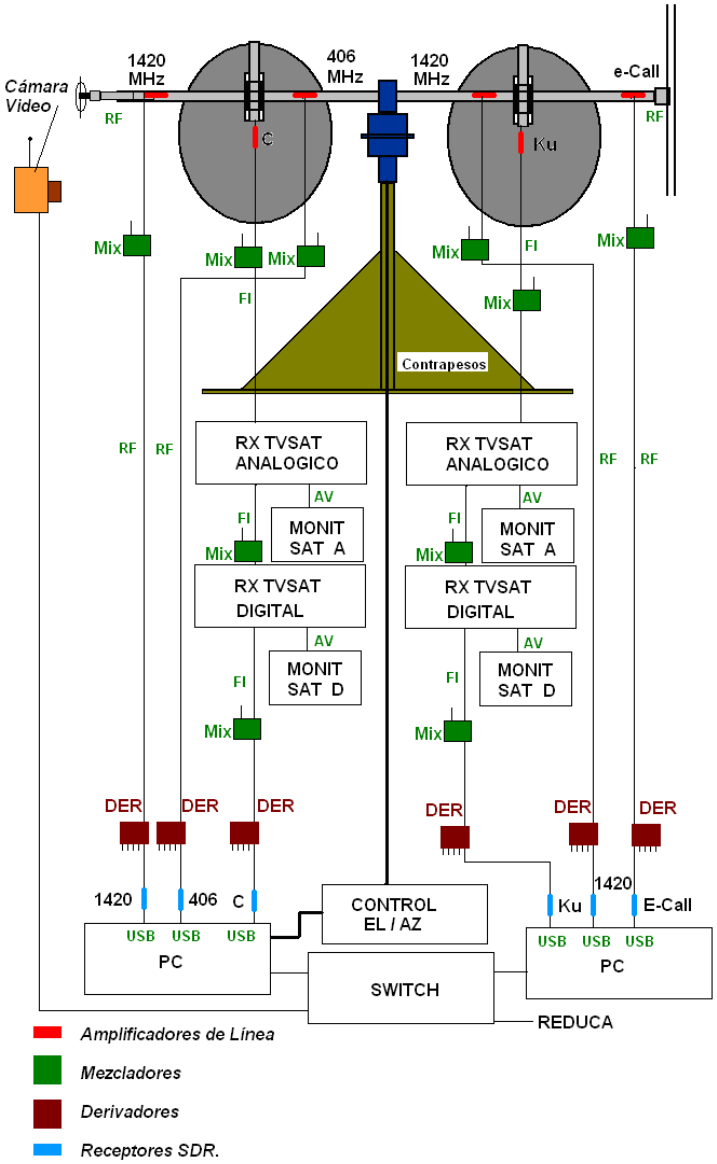


Figura 1. Demostrador de Conceptos de Radiofrecuencia EAC10 Patentado por la UCA.

En el caso de los receptores de televisión vía satélite, y para que el alumno pueda evaluar la bondad del sistema de *seguimiento y apuntamiento* de antenas, se utilizan uno, dos o más receptores de televisión vía satélite por cada antena parabólica, normalmente uno analógico y otro digital con el sistema DBV-S o similar.

Como los receptores de TV vía satélite tienen una entrada y una salida se pueden poner ambos en *cascada* y además se pueden visualizar las imágenes en los monitores que están conectados a las *salidas SCART, Audio-Video o Euroconecto*res.

Además, no reflejado en la figura 1, se puede aprovechar la salida de *canal ajustable de radiofrecuencia* para que pueda recibirse la señal sintonizada en un canal de UHF y decodificarse y analizarse por medio de un receptor SDR con salida USB. En este caso el receptor de televisión vía satélite haría de filtro de RF y de mezclador de señales, bajando de la banda de 900-2700 MHz hasta la de 500-900 MHz.

Al final de los cables coaxiales, ya sea directamente desde los *amplificadores de línea de bajo ruido* (LNA) o desde la *salida de Frecuencia Intermedia* de los receptores de televisión vía satélite, se conecta un receptor de radio definido por software (SDR) que opera en las frecuencias determinadas por la antena.

La integración de los receptores con los ordenadores tipo PC, Mac o microordenadores similares a la plataforma Raspberri PI se realiza, por lo general, mediante un interface normalizado como el USB.

El análisis y tratamiento de la señal se realiza mediante el software más adecuado elegido por el equipo docente entre los comerciales, gratuitos o de coste compartido, normalmente el SDR-Sharp ®[9] o el Spectrumlab®[10], Digipan®[11], Spectravue®[12]. Lo mismo sucede con los programas de decodificación de comunicaciones por radio como Hamcomm[13], Shipploter®[14], Plainplotter®[15], DSCdecoder®[16], NDBfinder®[17], Orbtitron®[18], FLDigi®[19], JVComm32®[20], WXSat®[21], HFfax®[22] y otros.

Con el fin de poder medir las señales con los típicos instrumentos de laboratorio radiotécnico se utilizarán *derivadores* de una entrada y dos salidas a una entrada y ocho salidas, sin paso de corriente, posibilitando la conexión simultánea de *Osciloscopios, Analizadores de Espectros, Frecuencímetros, Analizadores Vectoriales,* etc. aquellas salidas que no se usen se terminarán con una carga de la misma impedancia que el cable coaxial.

3. Resultados y Discusión

Como ha podido apreciar el lector, durante el texto anterior se han resaltado un conjunto de palabras en tipo versal. Todas ellas y aún más son los conceptos que se adquieren con este demostrador de bajo coste. En este caso nos encontramos ante un receptor de radio reconfigurable, a través del uso de distintas Frecuencias Intermedias, dependiendo de la frecuencia de trabajo de la antena.

3.1. Banda de SHF (3.000 a 30.000 MHz).

3.1.1 Televisión vía satélite.

A través del LNB de la Banda Ku se pueden recibir las señales de televisión vía satélite utilizando los receptores de televisión vía satélite específicos, ver el espectro de FI de la imagen transmitida y la codificación analógica o digital a través de la salida de frecuencia intermedia del receptor o las señales de banda base ya decodificadas por las salidas de audio o video, utilizando un RTL-SDR.

Así mismo podemos utilizar un receptor RTL-SDR recibiendo directamente desde el LNB en FI y ver el espectro de dicha señal.

3.1.2 Señales de radar Banda X.

A través del LNB de la Banda Ku se pueden recibir las señales de Radar marino, por lo que podemos utilizar un receptor RTL-SDR recibiendo directamente desde el LNB en FI y ver el espectro de dicha señal en la banda de VHF.

3.1.3 Televisión vía satélite (4-6 GHz).

A través del LNB de la Banda C se pueden recibir las señales de televisión vía satélite utilizando los receptores de televisión vía satélite específicos, ver el espectro de FI de la imagen transmitida y la codificación analógica o digital a través de la salida de frecuencia intermedia del receptor o las señales de banda base ya decodificadas por las salidas de audio o video, utilizando un RTL-SDR.

Así mismo podemos utilizar un receptor RTL-SDR recibiendo directamente desde el LNB en FI y ver el espectro de dicha señal.

3.1.4 Señales de radar Banda C (3-4 GHz).

A través del LNB de la Banda C se pueden recibir las señales de Radar marino, por lo que podemos utilizar un receptor RTL-SDR recibiendo directamente desde el LNB en FI y ver el espectro de dicha señal en la banda de VHF.

3.2. Banda de UHF (300 a 3.000 MHz).

3.2.1 Radioastronomía.

A través de la antena Yagi de 1420 MHz, o del dipolo cerrado en el foco de una parabólica, y directamente conectada al RTL-SDR o a través del LNA se pueden recibir las emisiones de H provenientes del Sol, así como la emisión de Deuterio en 327,4 MHz con la antena de Logperiódica. El Seguimiento se realiza a través del programa Orbritron®.

3.2.2 Radiolocalización.

A través de la antena dipolo cerrado en el foco de la otra parabólica o a través de la Logaritmoperiódica y conectando directamente el RTL-SDR al coaxial o a través del LNA, se pueden recibir las EPIRBS de 406 MHz .

A través de las antenas de 1420 MHz los TACAN de ciertos aeropuertos, aunque no sea su antena apropiada.

3.2.3 Servicio de Observación de la Tierra.

A través de la antena de 1420 MHz el satélite Meteosat, aunque no sea su antena apropiada.

3.2.4 Servicio de Aficionados y Aficionados Vía Satélite.

Recepción en la banda de 430-440 MHz. Repetidores. Aficionados vía satélite. Packetradio Televisión de aficionado en 439 y 1240 MHz.

3.2.5 Servicio de Radiodifusión.

A través de la antena logaritmo periódica, las emisiones de televisión analógica y digital.

3.2.6 Servicio Móvil Terrestre.

A través de la antena logaritmo periódica, estudio de las comunicaciones de telefonía móvil, TETRA y otras de interés.

3.3 Banda de VHF (30 a 300 MHz).

Análisis de Espectros. Confirmación de protocolos y modulaciones. Escucha directa a través de RTL-SDR y decodificación a través del programa adecuado a cada tipo de emisión de:

3.3.1 Servicio Móvil Marítimo.

Recepción de las frecuencias de VHF/FM marítimas, frecuencia de socorro de hombre al agua 121,5 MHz, decodificación de la Llamada Selectiva Digital, decodificación del AIS.

3.3.2 Servicio Móvil Aéreo.

Recepción de la banda de frecuencias aeronáuticas VHF/AM, control de aproximación, rodadura, aparcamiento, radar, VOR, etc.

3.3.3 Servicio de Observación de la Tierra.

Recepción de satélites NOAA en la banda de 135-139 MHz.

3.3.4 Servicio de Aficionados y Aficionados Vía Satélite.

Recepción en la banda de 144-146 MHz. Repetidores. Aficionados vía satélite. APRS. Echolink.

3.3.5 Servicio de Radiodifusión

Recepción de las emisoras de radiodifusión en WFM

4. Conclusiones

No es ningún disparate concluir que un pequeño dispositivo SDR, de valor económico despreciable, ha revolucionado el sistema de enseñanza de la Radioelectrónica en la Universidad de Cádiz, donde los alumnos llevan cada uno el suyo en el bolsillo para realizar las prácticas en la Escuela y en su domicilio. Los equipos de radio definidos por software son un buen ejemplo de aprovechamiento del mínimo hardware para la utilización de la mayor parte de los sistemas de radiocomunicaciones simplemente sustituyendo el software de decodificación y compartiendo el de control.

Gracias a ellos se ha leído una Tesis Doctoral y otra está en marcha, así como un Proyecto de Fin de Máster en la Escuela de Ingenierías Marina, Náutica y Radioelectrónica.

El alumno de Ingeniería Radioelectrónica ya no podrá decir que "no visualiza las Radiocomunicaciones"

Agradecimientos

Los autores agradecen al Grupo de Investigación Señales, Sistemas y Comunicaciones Navales de la Universidad de Cádiz la aportación económica necesaria para la investigación sobre RTL-SDR.

Referencias

1. Mascareñas, C.; Palma, J.J. Demostrador de Conceptos de Radiofrecuencia para las asignaturas del Grado en Ingeniería Radioelectrónica. *Radioaficionados.* **2013.** *Octubre*. 4-8.
2 UIT. *Reglamento de Radiocomunicaciones*. Unión Internacional de Telecomunicaciones. Ginebra. 2012.
3 Ministerio de Fomento. *Real Decreto 1185/2006, de 16 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento por el que se regulan las radiocomunicaciones marítimas a bordo de los buques civiles españoles.* Boletín Oficial del Estado. 2006.
4 OMI. *Convenio para la Formación, Titulación y Guardia de la Gente de Mar*. Organización Marítima Internacional. Londres 1995 con las Enmiendas de Manila de 2010.
5 Bradaschia,F. *Radioastronomy. Introduction to invisible sky*. Sandit Libri. 2014.
6 UIT. Recomendación *UIT-R RA.314-10 Bandas de frecuencias preferidas para las mediciones radioastronómicas* 1995-2003. Ginebra 2003.
7 Mascareñas, C.; Palma; J.J. *Demostrador de conceptos de radiofrecuencia con aplicaciones múltiples en el campo de la enseñanza Superior***.** Patente E201300558. Oficina Española de Patentes y Marcas.
8 Palma, J.J. *Estudio y aplicación del Procesado Digital de la Señal a las radiocomunicaciones digitales*. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz. Octubre. 2014.
9 http://sdrsharp.com/#sdrsharp
10 http://spectrum-lab.software.informer.com/
11 http://www.digipan.net/
12 http://www.moetronix.com/spectravue.htm
13 http://www.pervisell.com/ham/hc1.htm
14 http://www.coaa.co.uk/shipplotter.htm
15 http://www.coaa.co.uk/planeplotter.htm
16 https://www.coaa.co.uk/dscdecoder.htm
17 https://www.coaa.co.uk/ndbfinder.htm
18 http://www.stoff.pl/
19 http://www.w1hkj.com/download.html
20 http://www.jvcomm.de/index_e.html
21 http://www.hffax.de/html/hauptteil_wxsat.htm
22 http://www.hffax.de/

Embarque de profesores civiles en el buque “Juan Sebastián de Elcano”: influencia en la conciencia de seguridad y defensa nacional

Carreño Morales, Rafael M. [1,*], Eiris Barca, Antonio [1], Barragáns Martínez, Belén [1] y Pousada Carballo, José María [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar, Plaza de España, 36920, Marín; Emails: rafaelm@cud.uvigo.es (RMCM), eiris@cud.uvigo.es (AEB), belen@cud.uvigo.es (BBM), chema@cud.uvigo.es (JMPC)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: rafaelm@cud.uvigo.es (RMCM);

Abstract: Los conflictos que se originan en nuestros días suponen un cúmulo de amenazas y riesgos de ámbito mundial. Los instrumentos usados de forma convencional para resolver las crisis actuales no se bastan por sí solos debido a que nos enfrentamos a un escenario complejo, inestable, incierto e inseguro. Las vías políticas, económicas o militares necesitan el apoyo de otras herramientas que puedan contribuir a mejorar la seguridad de nuestra sociedad. Una de las líneas generales de política de defensa que emana de la Directiva de Defensa Nacional 1/2012, promueve acentuar el esfuerzo en la comunicación estratégica de la defensa, con objeto de fomentar la conciencia de defensa nacional. En este contexto, esta comunicación expone las circunstancias del embarque de profesores civiles a bordo del Buque-Escuela “Juan Sebastián de Elcano” (JSE) y cómo se llevó a cabo. Se analizan las ventajas del embarque de profesorado civil más allá de las necesidades académicas que lo motivaron. Se pretende estudiar el posible impacto beneficioso que vaya a producir esta iniciativa en la conciencia de seguridad y defensa de los ciudadanos españoles. De este modo, es posible abrir una vía coadyuvante e importante para favorecer una concienciación colectiva de defensa nacional.

Keywords: conciencia de defensa; comunicación estratégica; Buque-Escuela “Juan Sebastián de Elcano”; embarque de civiles; cohesión nacional

1. Introducción

Los conflictos actuales y futuros que se originan en nuestros días suponen un cúmulo de amenazas y riesgos de ámbito mundial. Debido a que nos enfrentamos a un escenario complejo, inestable, incierto e inseguro, los instrumentos convencionales para resolver las crisis actuales no se bastan por sí solos. Parece notorio que las vías políticas, económicas o militares necesitan el apoyo de otras herramientas que puedan contribuir a mejorar la seguridad de nuestra sociedad.

En este contexto, la protección de los valores, las instituciones y el conjunto de la sociedad española, son objetivos de la política de defensa de España. Esta política asume un alto grado de compromiso con valores universales tales como el respeto a la vida y los derechos humanos, así como con el refuerzo de unas relaciones pacíficas y de cooperación entre todos los pueblos de la Tierra.

Existen en estos momentos tres atributos o vectores fundamentales que caracterizan la seguridad de España. Estos atributos son el incremento de la inestabilidad en nuestro entorno cercano, la búsqueda de un vínculo transatlántico más sólido y el impacto negativo de la crisis económica.

La Directiva de Defensa Nacional 1/2012 pretende responder eficazmente a los retos que plantean estos tres vectores mediante una serie de líneas generales de política de defensa como las siguientes:

- Mantener un nivel nacional de disuasión creíble y suficiente.
- Llevar a cabo la necesaria transformación de las Fuerzas Armadas (FFAA).
- Acentuar el esfuerzo en la comunicación estratégica de la defensa, con objeto de fomentar la conciencia de defensa nacional [1].

Algunos de los factores que afectan de globalmente a la seguridad y que están siendo fuentes de conflictividad son la demografía, la ecología y el impacto medioambiental, la demanda energética y las diferencias económicas. La demografía ya está afectando a España por los flujos migratorios provenientes de países africanos que tienen población sin recursos para vivir.

Se espera que a partir de la próxima década, la población mundial experimente un incremento cercano al 25% sobre el número de habitantes actual. Los países más pobres del mundo verán cómo se multiplica su población y los flujos migratorios aumentarán desde los países pobres hacia los más desarrollados. Se producirá un aumento de la población urbana que traerá consigo la obligación de crear infraestructuras adecuadas y una mayor conflictividad social [2].

A pesar de los datos anteriores, un buen número de ciudadanos españoles considera que la seguridad y defensa compete solamente a los militares. Es probable que estos ciudadanos desconozcan qué representan las FFAA y cuáles son las misiones que llevan a cabo. Sin embargo, los ámbitos civil y militar deberían conocerse mutuamente, pues esto podría contribuir al fortalecimiento de una identidad nacional compartida.

Esta comunicación expone las circunstancias del embarque de profesores civiles a bordo del Buque-Escuela “Juan Sebastián de Elcano” (JSE) y cómo se llevó a cabo. Se analizan las ventajas del embarque de profesorado civil más allá de las necesidades académicas que lo motivaron. Se pretende estudiar el posible impacto beneficioso que vaya a producir esta iniciativa en la conciencia de seguridad y defensa de los ciudadanos españoles.

El embarque de profesores no militares en el JSE puede constituir una herramienta de comunicación estratégica de la defensa que ayude a incrementar el nivel de cultura de seguridad y defensa en la sociedad española. Con ello, se avanza hacia la posibilidad de lograr la plena identificación entre las

FFAA y la sociedad. De este modo, es posible abrir una vía coadyuvante e importante para favorecer una concienciación colectiva de defensa nacional. Además, esta vía contribuye a mantener el nivel de disuasión deseado en la medida en que permitiría ejercer alguna influencia en la cohesión nacional, favoreciendo la voluntad colectiva y el interés en la protección de los valores de la sociedad española.

2. Planteamiento

Antes de proceder a exponer las circunstancias y la manera de llevar a cabo el embarque en el JSE se estima conveniente considerar, aunque sea someramente, los factores cuya evolución podría crear una situación de inquietud en nuestra sociedad. Es decir, se pretende enumerar una serie de causas o condicionantes que son susceptibles de producir preocupación en los ciudadanos o que estos se puedan sentir amenazados. En segundo lugar, se expone el hecho que puede suscitar el interés en mejorar la comunicación estratégica de defensa y contribuir así a un aumento de la concienciación colectiva de defensa nacional. Posteriormente, para explicar de forma coherente cómo se realizó el embarque en el JSE, se describe el contexto y las circunstancias que lo propiciaron. Por último, una vez expuesta la forma en que se desarrolló, se analizarán las ventajas e influencia que un embarque de estas características podría tener en la conciencia de seguridad y defensa nacional.

Las causas que se pueden considerar como potencialmente generadoras de inquietud o preocupación en la sociedad y que hacen necesaria la adopción de medidas defensivas son: terrorismo, desastres naturales, conflictos armados, crimen organizado, proliferación de armas de destrucción masiva, crisis humanitarias, pandemias, crisis económica y financiera, amenazas en el ciberespacio, escasez de recursos energéticos y oleadas migratorias [2].

La mayoría de estos factores contribuyen a generar incertidumbre y una sensación de inseguridad en los ciudadanos, debido a que los riesgos se han globalizado, pudiendo manifestarse en prácticamente cualquier lugar del planeta. Además, esta situación puede provocar un clima de inestabilidad en la sociedad, poniendo de manifiesto la complejidad del escenario al que nos enfrentamos. Precisamente, un escenario complicado y difícil de entender lleva a la conclusión de que las herramientas convencionales que han demostrado su eficacia en el pasado, no garantizan por sí solas la solución a situaciones de crisis complejas. Debido al amplio espectro de riesgos y amenazas existentes, para su solución se hace necesario un enfoque integrador en el que participe tanto la esfera civil como la militar de la sociedad. La sociedad civil no debería pensar que los militares se bastan por sí solos para resolver estas situaciones de crisis.

Históricamente y también en la actualidad, buena parte de la sociedad civil española está convencida de que la seguridad y defensa es algo que atañe exclusivamente al estamento militar. Esa parte de la sociedad posee un gran desconocimiento de lo que representan las FFAA y qué misiones llevan a cabo. Asimismo, desconocen cómo son y qué hacen las personas que integran las FFAA, además de no saber en qué consisten las misiones que realizan en diferentes lugares del mundo.

Se puede decir que este grado de desconocimiento por una parte de los ciudadanos acerca de las FFAA españolas, se debe a ideas preconcebidas por una parte de la sociedad. Algunas de estas ideas promueven la desaparición de los ejércitos ante el pensamiento utópico de que España no los necesita y su mantenimiento supone un coste elevado.

Por otro lado, se puede constatar que las FFAA españolas presentan una tendencia a un mayor grado de convergencia con el resto de la sociedad civil, en términos de normalizar sus relaciones en el seno de la sociedad, así como de mayor aceptación por parte de ésta. Uno de los hechos que muestran esta tendencia es la Ley 39/2007, de 19 de noviembre, de la carrera militar. La Ley 39/2007, además de tener en cuenta las amenazas y riesgos con los que se enfrenta la sociedad al comienzo del siglo XXI, analiza la necesaria transformación y mejora continua de las FFAA. Para ello, se resalta la importancia de la formación de los recursos humanos que las integran, desarrollando un nuevo modelo de profesionalización donde prima la calidad. Uno de los retos de este modelo es conseguir que los ciudadanos se sientan atraídos para el ejercicio profesional en las FFAA. Por ello, uno de los objetivos de la ley mencionada era profundizar en el proceso de integración de la formación superior militar en el sistema educativo general.

Así, la enseñanza de los futuros militares de todas las escalas y especialidades mantendrá la exigencia de una excelente formación militar. En el caso de los oficiales se estableció como requisito para acceder a las escalas de oficiales obtener un título de grado universitario, creándose para ello los centros universitarios de la defensa.

Entre otros aspectos, se logró una normalización de la formación que reciben los futuros oficiales de las FFAA. Es decir, las normas que rigen la formación de cualquier título de grado en las universidades españolas son las mismas a las que se somete la formación de grado de los futuros oficiales. En el caso de los futuros oficiales de la Armada, todo el proceso de formación que reciben en el Centro Universitario de la Defensa (CUD), ubicado en la Escuela Naval Militar (ENM), se encuentra bajo la supervisión de la Universidad de Vigo, la cual fue elegida por el Ministerio de Defensa para adscribir el citado CUD. El título que se consideró más idóneo para la formación de los futuros oficiales de la Armada fue el de graduado en ingeniería mecánica, debido a que tenía el mayor número de materias en común con el plan de estudios anterior que cursaban los alumnos de la ENM [3].

En septiembre de 2010 comienza a impartirse la docencia del primer curso del grado en ingeniería mecánica en el CUD ubicado en la ENM. Una vez iniciada la andadura del CUD, se van superando con éxito las dificultades, inherentes a cualquier nuevo proyecto, mientras se va sucediendo la implantación de los diferentes cursos. Una de las situaciones nuevas que aparecieron y se hizo necesario resolver con eficacia es la docencia de asignaturas del grado universitario durante el crucero de instrucción a bordo del JSE.

3. Contexto y desarrollo

En el año académico 2013-2014 se implanta el cuarto curso en el CUD y con ello el embarque de los guardiamarinas de segundo (GGMM) en el JSE. Con antelación suficiente a la implantación del citado curso ya se había planteado la situación, a priori aparentemente incompatible, de impartir la formación universitaria a los GGMM y compaginarla con el embarque de seis meses a bordo del JSE.

Para resolver la situación generada con el nuevo plan de estudios se llegó a una solución de consenso que permitiría simultanear el embarque con la formación universitaria. Esta solución pasaba por embarcar a los profesores universitarios necesarios en el JSE para que se pudieran impartir las asignaturas que el calendario y programación del curso académico exigían.

En primer lugar, se decidió que las asignaturas que iban a impartirse debían adaptarse a un calendario de tres meses cada una de ellas, siendo impartida cada una por un profesor. Por necesidades de programación del plan de estudios, debían impartirse dos asignaturas universitarias durante el crucero. Para paliar los problemas de alojamiento en el buque se decidió que un profesor embarcaría los tres primeros meses del crucero y el otro los tres meses finales. Durante el primer período de tres meses se impartió la asignatura de Fundamentos de Organización de Empresas. En el segundo período fue impartida la asignatura de Diseño de Máquinas.

Otro problema que surgió fue la disponibilidad de espacios en el JSE para ser habilitados como aulas donde impartir la docencia de forma eficaz. Debido al nuevo plan de estudios basado en el modelo de Bolonia, se requerían clases para teoría, laboratorio y seminario con un número de alumnos aproximado para cada tipología de clase de 35, 20 y 10 respectivamente. Debido a que el total de alumnos se acercaba a 70, hubo que planificar las horas necesarias para dos grupos de teoría, tres grupos de laboratorio y seis grupos de seminario. Además, se hizo imprescindible la coordinación entre dos jefaturas de estudios, la del JSE y la del CUD para acoplar adecuadamente la formación militar y marinera con la formación universitaria. Otro aspecto no menos importante fue el de equipar las aulas con los medios informáticos y audiovisuales precisos para impartir la docencia en condiciones más que aceptables.

La distribución horaria de las asignaturas universitarias se estableció de lunes a viernes como sigue:

- Una clase de seminario a las 7:30 de la mañana a un grupo de 10 alumnos
- Dos clases de teoría, una a cada grupo de 35 alumnos, a las 10:00 de la mañana
- Dos clases de laboratorio a partir de las 15:00 horas para 20 alumnos (dos grupos)

Se debe tener en cuenta que el número de clases que impartía un profesor durante cada semana no superaba las 20. Las clases se impartieron durante los días de navegación del buque, no habiendo docencia durante la estancia del JSE en los puertos donde recalaba. Cada asignatura se impartió el tiempo necesario para corresponderse con los 6 créditos ECTS en que se encuentran planificadas. En el caso de algún imprevisto por temporales o problemas sobrevenidos, se aplazaría la clase que no pudiera impartirse. Afortunadamente, solamente hubo que aplazar una clase de seminario dos días debido a una navegación complicada causada por un temporal.

Para las clases de teoría se utilizó la cámara de guardiamarinas, con capacidad para 70 alumnos y medios para la proyección de presentaciones con diapositivas, así como una pizarra (fotografías 1 y 2).



Fotografía 1. Cámara de guardiamarinas



Fotografía 2. Cámara de guardiamarinas

Además de impartir las clases de teoría, en esta aula también se celebraron los exámenes de la asignatura. Para las clases de laboratorio o de prácticas se aprovechó la sala-comedor de suboficiales del buque, ya que dicho compartimento no se utilizaba el 100% del tiempo y reunía las condiciones adecuadas. Cuenta con una capacidad para 24 alumnos y está dotada tanto de una pizarra como de medios audiovisuales, consistentes en dos pantallas-proyectores en ambos extremos de la sala. En función del contenido de la clase, los alumnos utilizaban un ordenador portátil o la mesa para realizar prácticas escritas. Las fotografías 3 y 4 muestran el interior de este compartimento.



Fotografía 3. Sala para aula de prácticas



Fotografía 4. Sala para aula de prácticas

Para la impartición de los seminarios a cada uno de los grupos de 10 alumnos, se habilitó una pequeña sala de marinería que contaba con el espacio necesario. Al igual que con el aula de prácticas, se dispuso de una pizarra y un proyector para presentaciones. En la fotografía 5 se puede apreciar con detalle esta sala.



Fotografía 5. Sala habilitada para los seminarios

La celebración de los exámenes de evaluación continua y finales supuso otro reto por la falta de un aula que permitiera examinar a cerca de 70 alumnos simultáneamente. Finalmente, se plantearon dos posibles soluciones que se aplicaron en ambas asignaturas. En un caso se examinaron a todos los

alumnos en la misma aula, la cámara de guardiamarinas, pero con exámenes diferentes entre los alumnos que se sentaban próximos entre sí. En otro caso se examinaron a los alumnos en aulas diferentes, aprovechando la sala-comedor de marinería para ello. En las fotografías 6 y 7 se puede observar como la celebración de exámenes a bordo del JSE se llevó a cabo con total normalidad.



Fotografía 6. Examen de evaluación continua



Fotografía 7. Examen final

El embarque de profesores universitarios a bordo del JSE ha permitido, entre otros aspectos, la integración del ámbito civil, representado por los profesores universitarios, en el ámbito militar. El grado de interacción y conocimiento entre ambos ámbitos ha sido constante a lo largo de los seis meses que dura la misión del buque. Esto ha redundado en la mutua comprensión y colaboración de dos realidades profesionales que se han complementado durante el crucero. Por un lado, la labor profesional de los profesores universitarios mientras convivían y conocían una parte importante de la labor profesional de los marinos de la Armada. Por otro lado, mientras los marinos militares desarrollaban su trabajo y profesión a bordo del JSE, iban conociendo el trabajo profesional de los profesores universitarios mientras compartían con ellos todas las vivencias de cada singladura.

No cabe duda de que estos profesores civiles compartirán su experiencia a bordo con diversas personas y grupos de su entorno. Este hecho puede funcionar como una herramienta de comunicación que permita dar a conocer a los ciudadanos ajenos a las FFAA cómo es el día a día de algunos de los profesionales de la Armada. El mutuo conocimiento y entendimiento entre la sociedad civil y el estamento militar es fundamental para la promoción de la identidad nacional entre los ciudadanos.

El gobierno de un país tiene una gran responsabilidad en el fomento de la identidad nacional. Ésta es básica para la protección de los intereses vitales de una nación y debe ser compartida por todos. No obstante, algunos estudios señalan que aunque la nacionalidad seguirá siendo importante para los ciudadanos, su identidad propia y sus intereses personales ejercerán una importante influencia en la lealtad que manifestarán hacia el Estado y sus instituciones. Por todo ello, el fomento de la identidad nacional debería ser una responsabilidad asumida de forma solidaria por todas las instancias del Estado bajo la dirección del gobierno. La identidad nacional se expresa en los vínculos solidarios de cultura, historia, territorio, economía y en los derechos u obligaciones comunes. La identidad nacional sostiene a un estado como representación de un orden jurídico y una estructura institucional. De esta manera, la cohesión de la población ante riesgos o amenazas, el compromiso individual de los ciudadanos con la

firmeza e integridad del Estado así como el prestigio de los líderes e instituciones nacionales son medios que fortalecen al Estado en los momentos de crisis o dificultades [4].

Los dos primeros autores de esta comunicación fueron los primeros profesores civiles que se embarcaron en el JSE para impartir la docencia universitaria. Fue la primera vez que personal civil vivía y participaba en los actos y protocolo habituales en los puertos después de cada navegación. Desde la formación para recibir a las autoridades, las salvas, el atraque, el himno español, hasta las visitas institucionales en las ciudades de recalada y las recepciones a bordo, fueron vividas en primera persona por ambos profesores universitarios. De esta experiencia vivida a bordo del "embajador flotante" que es el JSE, los profesores civiles han conocido in situ la vida y el trabajo cotidiano de nuestros marinos. Además de una inmersión en el mundo profesional de la Armada, este embarque ha supuesto una gran aportación para el desarrollo de las relaciones humanas y del compañerismo.

Con objeto de compartir y comunicar cómo es la vida de nuestro marinos, la Armada viene realizando desde hace bastantes años embarques cortos de personal civil a bordo del Elcano. Familiares de los miembros de la dotación, periodistas, políticos y cargos institucionales, entre otros, han tenido la oportunidad de embarcar durante tres días en el JSE en el tránsito de Marín a Cádiz, después del 16 de julio de cada año.

El JSE como embajador de España es conocido en aquellos puertos extranjeros de los países del mundo que ha visitado a lo largo de sus 86 cruceros. Sin embargo, el JSE podría contribuir a mejorar el conocimiento de los españoles acerca de los trabajos y misiones de la Armada. El embarque de personal civil español es una de las maneras de llevarlo a cabo.

4. Conclusiones

La gran complejidad de los conflictos que se originan en la actualidad implica un conjunto de amenazas y riesgos para nuestra sociedad. Es evidente que las vías políticas, económicas o militares para resolver las crisis actuales necesitan contar con otras herramientas que puedan mejorar la seguridad de los ciudadanos.

La seguridad de España viene caracterizada por la inestabilidad en nuestro entorno cercano, la búsqueda de un vínculo transatlántico más sólido y el impacto negativo de la crisis económica. Para dar respuesta a estos retos, la política española de defensa planteó en su día algunas líneas generales entre las que se destacan tres. En primer lugar, es básico el mantenimiento de un nivel nacional de disuasión creíble y suficiente. En segundo lugar, se hace necesario realizar la transformación de las FFAA. Por último, se debe intensificar el esfuerzo en la comunicación estratégica de la defensa, con objeto de fomentar la conciencia de defensa nacional.

A veces la sociedad no entiende ni comparte la necesidad de unas FFAA o se cree que la sociedad civil no debe inmiscuirse en la defensa de España, a pesar de que la seguridad compete a todos los españoles. El embarque de profesores no militares en el JSE puede contribuir como instrumento de comunicación estratégica de la defensa que mejore el nivel de cultura de seguridad y defensa en la sociedad española. Con ello, se avanza hacia la posibilidad de lograr la plena identificación entre las FFAA y la sociedad. El embarque en el JSE facilitó el conocimiento y entendimiento entre una parte del ámbito civil de la sociedad y una parte del ámbito militar que puede ser importante para la promoción de la identidad nacional entre los ciudadanos.

Es evidente que los embarques cortos de personal civil que se llevan a cabo en el JSE pueden ser beneficiosos para esta promoción de los valores de identidad y seguridad nacional. Sin embargo, tres días no suponen un tiempo suficiente para lograr la integración entre civiles y militares. Además, para tomar una plena conciencia de la vida profesional de los militares de la Armada se hace necesario una convivencia de trabajo de mayor duración temporal, puesto que así se podría facilitar la mutua comprensión de la labor profesional de unos y otros.

Sabiendo que el JSE promociona la imagen de la Armada y de España en el mundo en cada crucero de instrucción, la experiencia del embarque de profesores civiles puede servir para promocionar esta imagen dentro de España y para todos los ciudadanos. Se considera interesante y conveniente que los españoles conozcan las misiones y el trabajo que se lleva a cabo en la Armada, así como en el resto de instituciones del Ministerio de Defensa. Así se concluye que la experiencia de este embarque aporta una contribución a este aspecto.

Agradecimientos

A todas las personas que contribuyeron a que el primer embarque de profesores universitarios en el JSE se haya desarrollado con normalidad y haya llegado a buen puerto. Nuestro agradecimiento se extiende a la dotación del Buque-Escuela “Juan Sebastián de Elcano”, a la dirección y administración del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, así como a los Organismos y personal de la Armada que hicieron todo más fácil.

Referencias

1. Gabinete de la Presidencia del Gobierno. *Directiva de Defensa Nacional 2012* (en línea), 2012 [consulta:_07-04-2015]. Disponible_en:http://www.lamoncloa.gob.es/documents/directivadedefensanacional2012.pdf
2. Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional. *La configuración de las Fuerzas Armadas como entidad única en el nuevo entorno de seguridad y defensa*. Secretaría General Técnica, Ministerio de Defensa, Madrid, 2007.
3. Pousada, J.M. Bolonia y la nueva formación de oficiales de Marina. *Revista General de Marina* **2010**, 259, 655-662.
4. Sanz, G. Intereses que afectan a la Soberanía Nacional. En *Evolución del concepto de interés nacional*, Monografías del CESEDEN; Ministerio de Defensa, España, 2010, Volumen 115, pp. 77-108.

Tecnologías para la seguridad y su aplicación en la formación superior de los futuros oficiales de la Guardia Civil

Rodríguez-Millán, Marcos[1,*], Marco Esteban, Miguel[1], Loya Lorenzo, José Antonio[2], Moure Colón, Fernando[3] y Miguélez Garrido, María Henar[1]

[1] Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid, España. Email: mimarcoe@ing.uc3m.es (MEM), mhmiguel@ing.uc3m.es (MGMH)

[2] Departamento de Ingeniería Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid, España; Email: jloya@ing.uc3m.es (LLJA)

[3] Centro Universitario de la Guardia Civil, Avda. de la princesa s/n, Aranjuez, Madrid; Email: fmoure@guardiacivil.es (MCF)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; Email: mrmillan@ing.uc3m.es (RMM);

Abstract:

El trabajo presenta la metodología empleada por el Centro Universitario de la Guardia Civil (CUGC) y la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) para el desarrollo de Trabajos Fin de Grado (TFG) enfocados a la aplicación educacional en defensa y seguridad. Los resultados presentados son desarrollados por los alumnos de cuarto curso en el Grado en Ingeniería de la Seguridad. El conocimiento desarrollado en el aspecto de la seguridad y el uso de nuevas herramientas numéricas son de gran utilidad para los futuros oficiales de la Guardia Civil. La principal contribución de este artículo es mostrar la heterogeneidad de los trabajos realizados, destacando el uso de herramientas informáticas para prevención, diseño y mejora de los dispositivos de seguridad y protección de las libertades de las personas. El uso de este tipo de herramientas aún no ha sido suficientemente utilizado a pesar de las amplias posibilidades que ofrece en el campo de la seguridad. En este documento se destacan los principales TFG destinados a la seguridad física así como al análisis de la seguridad empleando dispositivos tecnológicos: móviles, aviones no tripulados, material técnico y especializado para incendios estructurales.

Palabras clave: Seguridad física; Seguridad tecnológica; Educacional; Trabajo Fin de Grado.

1. Introducción

Tradicionalmente los estudios de los oficiales de los Cuerpos de Seguridad del Estado se han centrado principalmente en la rama de las Ciencias Sociales con especial atención en términos legales relacionados con la prevención e investigación de crímenes. En las últimas décadas, se han desarrollado nuevas técnicas tecnológicas para el análisis de estos crímenes. Debido a la rápida evolución de la tecnología, se ha puesto de manifiesto el aprendizaje necesario por parte de los Agentes de los Cuerpos de Seguridad para mejorar el conocimiento técnico en diferentes aspectos novedosos de la Seguridad, de manera que les permita la adaptación a nuevas herramientas y procedimientos.

Los elevados requisitos de conocimiento técnico de los Cuerpos de Seguridad del Estado han motivado un cambio en el modelo educativo. Motivado por esta necesidad, el personal de la Guardia Civil decidió en el año 2010 iniciar un grado de cuatro años académicos dentro del *European High Education Area (EHEA)*, el Grado en Ingeniería de la Seguridad con 240 créditos ECTS. Este grado es el núcleo principal de los estudios para los futuros oficiales, Tenientes de la Guardia Civil, y se ha diseñado en colaboración entre la Guardia Civil y la Universidad Carlos III de Madrid.

Dentro de los cuatro años de estudios del Grado de Ingeniería de la Seguridad, una parte esencial es el desarrollo del TFG en el último curso. El TFG debe unir aspectos técnicos y prácticos procedentes de la universidad y aplicarlos a las necesidades profesionales de las futuras actividades de los nuevos oficiales. Las líneas de investigación propuestas por el CUGC y la Universidad Carlos III de Madrid serán expuestas más adelante.

2. Instituciones: Guardia Civil y Universidad Carlos III de Madrid

La Guardia Civil es una institución nacional española militar de orden público, dependiente del Ministerio del Interior, centrada en la protección del libre ejercicio de los derechos y libertades y con el fin de garantizar la seguridad pública. Desde su fundación en 1844, ha estado participando en la resolución de los principales problemas de seguridad que afectan a España como Estado tanto a nivel nacional como internacional. Actualmente es una de las más respetadas agencias de la ley en el mundo a causa de su fuerte proyección internacional. La Institución es el usuario final de tecnología avanzada para la seguridad.

La Universidad Carlos III de Madrid (UC3M) fue establecido por una Ley del Parlamento Español el 5 de mayo de 1989 en el marco de la Ley de Reforma Universitaria de 1983[1]. Desde el principio se ha tenido la intención de ser relativamente una pequeña e innovadora universidad pública, proporcionando enseñanza de la más alta calidad y centrada principalmente en la investigación. Tanto los estudios de Ingeniería como Ciencias Sociales se ofrecen en esta Universidad.

3. Metodología de trabajo entre estudiantes y directores

Los estudiantes utilizan los conocimientos adquiridos en las diferentes asignaturas del plan de estudio de grado en Ingeniería de Seguridad. Los dos primeros años académicos se realizan en el Centro Universitario de Defensa (CUD) en Zaragoza (España) y son comunes con los del Ejército de Tierra. Estos primeros dos años están centrados principalmente en ciencias básicas[2], que sirven como base para los dos años siguientes, los cuales se imparten en el CUGC (Aranjuez, Madrid) por miembros de la Guardia Civil y personal de la UC3M[3]. A partir del tercer curso académico, los estudiantes comienzan a profundizar en la tecnología aplicada a la seguridad. Esta última parte del programa está diseñado específicamente para la Guardia Civil.

Este documento se centra en los TFG que constan de 12 créditos ECTS. Cabe recalcar, que los TFG se han desarrollado tradicionalmente en el contexto de los estudios de ingeniería como la parte final de sus estudios. Durante décadas, ha sido una buena oportunidad de tener el primer contacto con los proyectos profesionales. En el caso de estudio de este documento, las características especiales de los alumnos y del Grado en Ingeniería de Seguridad deben ser tenidas en cuenta en el diseño de la estructura y el contenido de la Tesis de Licenciatura [4].

Debido al perfil de los estudiantes del Grado en Ingeniería y a que su vida profesional incluirá una serie de actividades relacionadas, no sólo vinculadas con la tecnología sino también, con aspectos sociales y jurídicas, hace necesario que el TFG deba aunar los tres aspectos anteriormente mencionados. Se requiere, por tanto, de la dirección conjunta del TFG por parte del profesor de la Universidad para algunos temas técnicos relacionados con el grado, y por parte de un tutor de la Guardia Civil para aspectos profesionales relacionados con la aplicación a la actividad de la Guardia Civil involucrando los requisitos legales y sociales. Ambos directores colaboran para la definición del tema, la evaluación de los estudiantes y presentación final del TFG.

La interacción entre los estudiantes del TFG y los profesores de la universidad se realiza principalmente por tres medios: (1) correos electrónicos y videoconferencias, (2) visitas de los directores al CUGC y (3) visitas de los estudiantes a la Universidad Carlos III de Madrid. En algunos casos, es necesario impartir un curso de formación, véase la Figura 1 a modo de ejemplo, para los TFG dedicados a seguridad física.

4. Trabajos Fin de Grado y resultados

Las líneas de investigación propuestas por el CUGC y la Universidad Carlos III de Madrid y que el futuro oficial puede seleccionar como tema de TFG son: ciencias forenses; ciberseguridad (uso seguro de redes y sistemas de comunicación); seguridad económica y financiera; protección de infraestructuras y personas (modelización de materiales aplicados a la seguridad, seguridad física, etc.); tecnologías aplicadas a la investigación para dar respuesta ante la amenaza de la delincuencia y crimen organizado (análisis de herramientas esteganográficas, sistemas de identificación, etc.); dirección y liderazgo; historia y deontología en el ámbito de la seguridad; y otros temas relacionados con la seguridad.

Desde 2014 se han realizado un total de 117 TFG; en esta sección se destacarán los más relevantes.

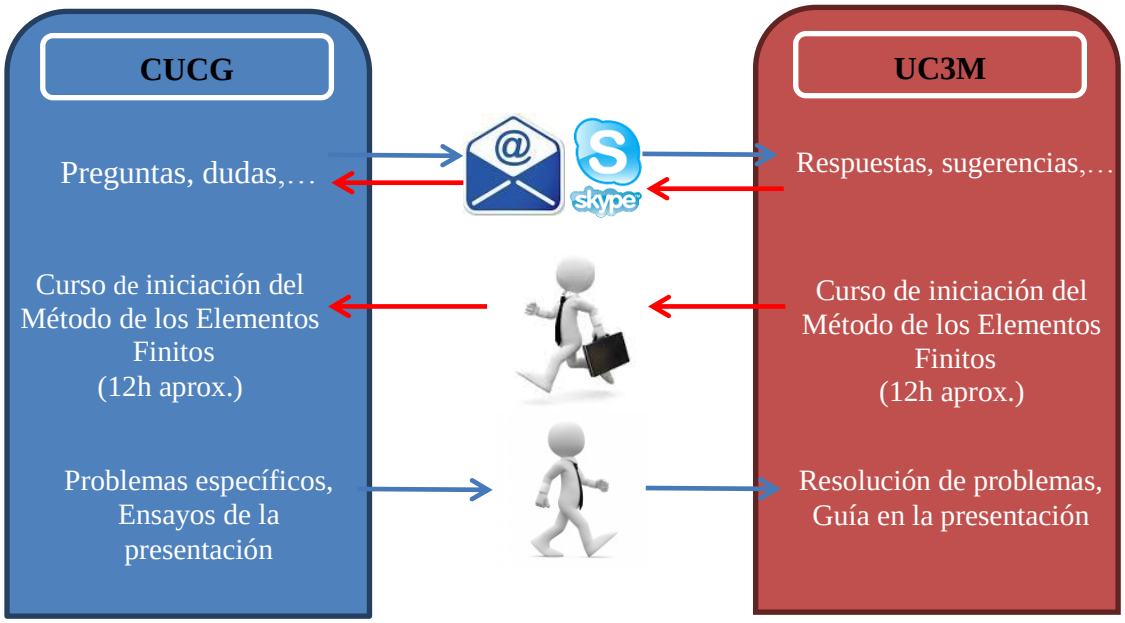


Figura 1. Esquema de la interacción entre los estudiantes del CUGC y los directores de la UC3M en TFG relacionados con la seguridad física

4.1. Trabajos Fin de Grado enfocados a la protección de infraestructuras y personas

El reciente aumento del terrorismo, de conflictos civiles e internacionales, conduce a un aumento del número de personas que sufren de lesiones traumáticas. La mejora de las protecciones personales bajo amenazas balísticas y explosivas es de gran interés para los futuros oficiales de la Guardia Civil. Los principales requisitos que deben cumplir las protecciones personales son: ergonomía, ligereza y seguridad. La creciente aplicación de nuevos componentes estructurales más ligeros, para reducir el esfuerzo del usuario o del consumo de combustible en vehículos, manteniendo la capacidad de absorción de energía, hace necesario optimizar su diseño. Esto se puede lograr mediante herramientas numéricas que reduzcan el coste de los ensayos experimentales sobre prototipos completos. Estas herramientas numéricas deben estar correctamente validadas para una buena predicción, de modo que puedan predecir el comportamiento de la estructura en diferentes condiciones: geometría del proyectil/munición y protección, ángulo de incidencia, velocidades de impacto, comportamiento de nuevos materiales…

La complejidad de este tipo de estudios es manifiesta, tal y como refleja la Figura 2-a), donde en uno de los TFG se realizó un estudio de la influencia del material de protección y el ángulo de incidencia del proyectil ante un impacto sobre un cráneo humano[5]. En el análisis de protecciones personales es importante conocer cuál es la velocidad a la cual el proyectil no perfora la protección (velocidad denominada *Límite Balístico*). La Figura 2-b) muestra el límite balístico para una estructura compuesta por un material cerámico (CSi) y 36 láminas de fibra de aramida[6]. Entre los estudios realizados del cálculo del límite balístico, se ha analizado la influencia del espesor, de distintos

materiales y funciones: cerámicos, fibras de aramida y poliuretano para chalecos o metales para estructuras de absorción de energía en vehículos[7-9].

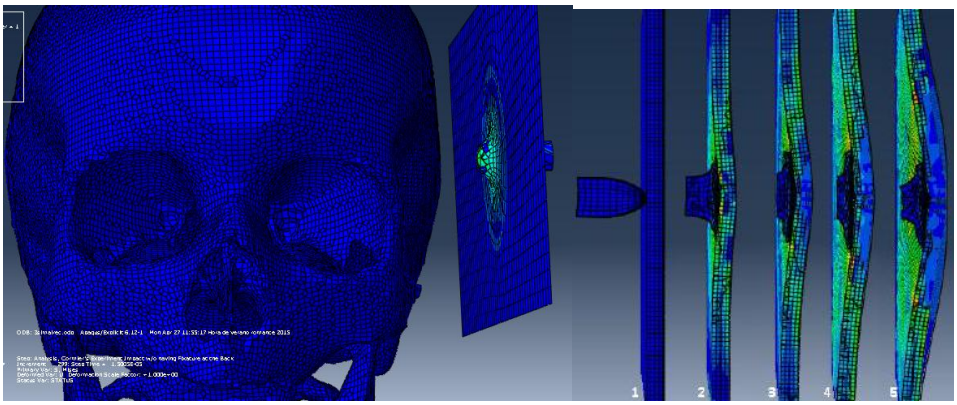


Figura 2. TFG enfocado a la Seguridad Física. a) Protección balística de un cráneo[5]. b) Secuencia del impacto de un proyectil FMJ contra una placa de cerámico/aramida para el cálculo del límite balístico[6]

Además del análisis de protecciones personales, se han desarrollado TFG destinados a otros campos de la seguridad como por ejemplo a catástrofes naturales[10]. En España, a pesar de que los incidentes relativos a grandes catástrofes no son muy frecuentes, la Guardia Civil realiza cobertura de labores de rescate frente a estas amenazas, por lo que debe adaptarse con la mayor brevedad posible a estos fenómenos. El diseño de puentes portátiles con las características necesarias para superar las distintas barreras naturales, ante la inexistencia del mismo, es de gran interés dentro de la Guardia Civil. El TFG se realizó empleando la herramienta comercial ESwin, y consistió en analizar el diseño óptimo de un puente portátil ante diferentes situaciones desfavorables de carga y geometría del terreno.

Otro tipo de amenazas a las que los futuros oficiales de la Guardia Civil deben estar preparados es a cargas explosivas[11]. El estudio de la explosión de un artefacto explosivo, de dimensiones aproximadas a las de un paquete o ~~una~~ mochila, en el control de seguridad de un edifico oficial fue el tema de TFG. Así, se realizaron los cálculos relativos a la explosión en el interior de un edifico oficial.

4.2. Trabajos Fin de Grado enfocados a las tecnologías aplicadas a la investigación

Además de las amenazas físicas, existen otros tipos de vulnerabilidades que violan las libertades de las personas y que pueden significar pérdidas millonarias o comprometer la seguridad física de un individuo. En este contexto, la realización de este tipo de TFG es de gran interés para complementar los estudios de los futuros oficiales de la Guardia Civil.

El problema de las vulnerabilidades en pagos a través de NFC (tarjetas y móviles), la realización de un análisis de los riesgos reales y las contramedidas ante estas amenazas tiene gran interés[12]. En el TFG se recoge un preciso resumen del marco legal español acerca de posibles crímenes relacionados con el uso de estas tecnologías como medios de pago, además del estudio de cómo se realizan los ataques (Figura 3-a).



Figura 3. TFG enfocado a las tecnologías aplicadas a la investigación. a) Esquema de un ataque de "*relay*"[12]. b) colocación RPAS en la Aldea, Romería del Rocío (Huelva)[14]

Otra medida que es objeto de estudio son los sistemas de reconocimiento de huella dactilar a gran escala[13].Los sistemas de reconocimiento de huella dactilar han ido apareciendo progresivamente en empresas e instituciones, el hecho de que sean implantados en fronteras y controles de acceso a gran escala invita a pensar que estos sistemas están preparados para realizar esta función de seguridad. En este TFG se realizó un detallado estudio de diferentes variables como los equipos (hardware) utilizados, que adquieren la imagen, las almacenan y soportan los algoritmos; se desarrolló una comparación del reconocimiento por huellas con otras técnicas.

Una de las técnicas más novedosas para la seguridad en situaciones extremas es el uso de aviones no tripulados (RPAS) [14]. Esta tecnología tiene un gran potencial de uso y en el TFG se estudió su viabilidad para la Agrupación de Reserva y Seguridad (ARS) de la Guardia Civil. Además, se analizaron la legislación internacional, europea y española en materia de RPAS, además de otra normativa de interés como es la Ley de protección de Datos. El TFG se complementó con el análisis de los cometidos de la ARS para establecer unos requisitos a tener en cuenta en la elección de los RPAS más adecuados para ser implementados en esta Unidad (Figura 3-b).

4.3. Trabajos Fin de Grado enfocados a las ciencias forenses

En esta amplia temática de los TFG realizados se han destacado principalmente dos. En el primero de ellos, se realizaron análisis forenses de “logs” del sistema operativo Android[15]. Debido al aumento de la utilización de teléfonos móviles SmartPhones y al sistema operativo Android, el análisis de los registros de los eventos que se producen durante el uso de una aplicación o del mismo sistema operativo podría tener relevancia dentro de una investigación (Figura 4-a).

En segundo de los TFG se pretendió mostrar la investigación criminal en incendios estructurales[16]. La investigación de un incendio consiste en la localización del foco de inicio del mismo y en el esclarecimiento de la causa que lo desencadenó, revelando así si se trata de una etiología intencionada o no y, por lo tanto, la criminalidad en el mismo. Dicha investigación se lleva a cabo en un escenario poco común para los investigadores, ya que lo más frecuente no es hallar el lugar de los

hechos arrasado por el fuego, por lo que exige una preparación especial y unos conocimientos específicos acerca de la materia que no todos los especialistas de policía judicial tienen. Por ello, en el TFG se realizó un análisis de la investigación de incendios actualmente en la Guardia Civil, desde diferentes aspectos como son la formación de personal especializado o sus demarcaciones de actuación. Un analisis para mejorar el material técnico y especializado, los procedimientos y las normas internas que se emplean fue llevado a cabo (Figura 4-b).

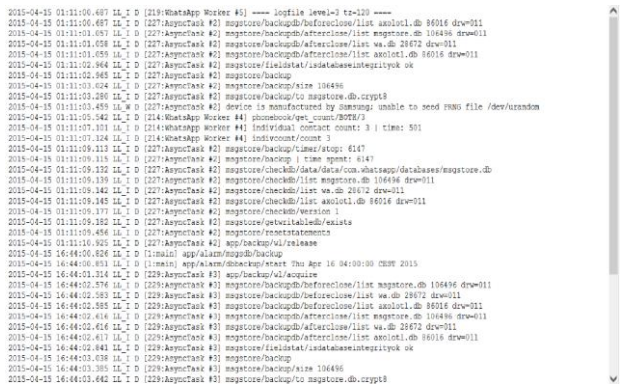




Figura 4. TFG enfocado a las ciencias forenses a) Contenido de "*com.whatsapp*"[15]. b) Material empleado por los ESIN (Especialista en Investigación de Incendios[16].

4. Conclusiones

La experiencia del desarrollo de la estructura del TFG, evaluación y temas ha constituido un reto para ambas instituciones de la Guardia Civil y la Universidad Carlos III de Madrid. La percepción de los estudiantes y los directores de los TFG ha sido muy positiva en todos los aspectos. Los estudiantes tienen la oportunidad de desarrollar aplicaciones reales de los conocimientos y habilidades adquiridas durante el grado en Ingeniería de la Seguridad. El aprendizaje de herramientas informáticas que faciliten el análisis de amenazas, el desarrollo de prototipos de elementos estructurales para mejorar la seguridad física de las personas o la mejora de los sistemas de reconocimiento tienen un gran valor para los futuros oficiales de la Guardia Civil.

El contacto con las unidades operativas de la Guardia Civil parece crucial para lograr este objetivo, de manera que supone un impulso para los futuros Tenientes a la hora de adaptarse rápidamente en sus Unidades. El desarrollo del TFG fue tutorizado por diferentes expertos de la Guardia Civil (desactivación de explosivos, armamento y equipamiento policial, lucha ante delitos telemáticos y crimen organizado, policía judicial, criminalística, lucha antiterrorista, y otras especialidades), permitiendo la sinergia entre los estudios académicos y las actividades profesionales de los futuros oficiales de la Guardia Civil.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la financiación recibida del Ministerio de Economía y Competitividad a través de los Proyectos RTC-2015-3887-8 y DPI2011-23191 en el Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016.

Referencias

1. BOE nº 108, May 6 1989, Creación Universidad Carlos III de Madrid (p. 13323). http://www.boe.es/boe/dias/1989/05/06/pdfs/A13323-13323.pdf
2. BOE nº 285, noviembre 2013. Orden PRE/2207/2013, de 22 de noviembre (pp. 94747-94765). http://www.boe.es/boe/dias/2013/11/28/pdfs/BOE-A-2013-12456.pdf
3. Orden Comunidad de Madrid 4682/2011, 2011/10/25. Acuerdo Centro Universitario de la Guardia Civil - Universidad Carlos III de Madrid, 2011/06/22.
4. CUGC: Centro Universitario de la Guardia Civil. En. *Guía y Norma para la realización de Trabajos Fin de Grado (TFG)* Aranjuez, España, 2013, pp.12.
5. Rico-Huerta, R.R. Efectos dinámicos en un cráneo protegido por placas de aramida, polietileno y aluminio: estudio numérico. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de la Seguridad*; Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, España, 2015.
6. Santiago-Gutiérrez, D.L. Análisis de materiales balísticos para chalecos antibalas y su viabilidad en la Guardia Civil. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de la Seguridad*; Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, España, 2015.
7. Reina-López, D. Análisis de blindajes en vehículos de la Guardia Civil. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de la Seguridad*; Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, España, 2015.
8. Jiménez-Delgado, F.F. Impactos balísticos en placas cerámicas. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de la Seguridad*; Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, España, 2015.
9. Gil-Donoso, J.F. Crashworthiness. *Trabajo Fin de Grado de Ingeniería de la Seguridad*; Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, España, 2015.
10. Real-Toboso, J.M. Cálculo estructural de puentes tácticos sometidos a cargas estáticas. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de la Seguridad*; Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, España, 2015.
11. Redondo-Gil, A. Estudio de las explosiones dentro de un control de seguridad en un edificio oficial. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de la Seguridad*; Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, España, 2015.
12. Gómez-García, A. Análisis de vulnerabilidades en pagos a través de NFC (tarjetas y móviles. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de la Seguridad*; Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, España, 2015.
13. Marmolejo-Doña, A. Sistemas de reconocimiento de huella dactilar a gran escala. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de la Seguridad*; Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, España, 2015.
14. Lobo-Barro, S. Estudio del uso de aviones no tripulados por la Guardia Civil: Agrupación de Reserva y Seguridad. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de la Seguridad*; Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, España, 2015.
15. Nicolás-Marín, J.A. Analisis forenses de "logs" del sistema operativo Android. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de la Seguridad*; Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, España, 2015.
16. Herráez-González, Á. La investigación criminal en incendios estructurales. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de la Seguridad*; Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, España, 2015.

Evolución de la composición corporal y condición física de los cadetes del Ejército de Tierra: estudio longitudinal

Gómez Cabello, Alba [1,2,*], Matute Llorente, Ángel[2,3], Gómez Bruton, Alejandro[2,3], Gutiérrez Gutiérrez, Julián[4], Manzanos Hernáez, Roberto[4], Vicente Rodríguez, Germán[2,3] y Casajús Mallén, José Antonio[2,3]

[1] Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza. agomez@unizar.es (AGC)
[2] GENUD (Growth, Exercise, NUtrition and Development) Research Group, Universidad de Zaragoza.
[3] Facultad de Ciencias de la Salud y del Deporte, Departamento de Fisiatría y Enfermería, Huesca, Universidad de Zaragoza.
[4] Departamento de Formación Física, Academia General Militar, Zaragoza.

***** Gómez Cabello, Alba; agomez@unizar.es (AGC)

Abstract:

Objetivos: evaluar los cambios que se producen en un año en la composición corporal y condición física de los cadetes de la Academia General Militar y conocer la relación entre el índice de masa corporal (IMC) y la evolución del rendimiento físico en este grupo de población. **Métodos:** en el estudio longitudinal participaron un total de 551 hombres (22,11±3.46 años). Se midió la altura y peso de los participantes. La masa grasa y muscular se estimó a través de impedancia bioeléctrica. Se realizaron 6 test para la valoración de la fuerza, velocidad (corriendo y nadando) y resistencia (de larga y corta duración). **Resultados:** a lo largo de un año de seguimiento, los caballeros cadetes experimentaron un aumento significativo del peso, IMC, masa grasa y muscular (todas P<0,001). En relación a las variables de condición física, se observó una mejora de la fuerza de extremidades superiores, prueba de natación y resistencia. Sin embargo, se produjo una disminución del rendimiento en las pruebas de velocidad y fuerza de extremidades inferiores (todos P<0,001). Estas variaciones observadas en el rendimiento físico eran independientes al IMC, siendo el cambio similar en aquellos cadetes clasificados con normopeso y en los que padecían sobrepeso y/o obesidad.

Keywords: condición física; actividad física; ejercicio; rendimiento; composición corporal; masa muscular; masa grasa; Ejército de Tierra; cadetes.

1. Introducción

A pesar del desarrollo tecnológico y los medios mecánicos, las actividades militares siguen teniendo un importante componente físico y psicológico, para las que hay que estar preparado de la manera más óptima posible [1]. Sin embargo, en comparación con otras épocas, algunos hábitos de vida de las sociedades desarrolladas, como la sobrealimentación, la mala nutrición o el consumo de alcohol, entre otros, pueden contribuir al deterioro de la salud, de la capacidad física y de la composición corporal [1].

Actualmente se conoce que la composición corporal, entendida como la cantidad y relación existente en el cuerpo de masa grasa, muscular y ósea, juega un papel fundamental en la salud y rendimiento de las personas, tanto en la población general como en los militares. Tradicionalmente, el componente de la composición corporal más estudiado ha sido la masa grasa, y actualmente se conoce que tener un exceso de ésta está íntimamente relacionado con numerosos problemas de salud y patologías en la población militar, como por ejemplo una mayor prevalencia de hipertensión [2], colesterol elevado [3] o un mayor riesgo de sufrir lesiones [4]. Sin embargo, a pesar de que las consecuencias adversas de un exceso de grasa son bien conocidas, en la mayoría de los países desarrollados se ha producido un rápido aumento de la prevalencia de obesidad, que en última instancia podría afectar al desarrollo profesional dentro del ejército [5].

Dentro de las instituciones militares, la Academia General Militar (AGM) juega un papel primordial, puesto que es en ella dónde se forman los futuros oficiales del Ejército de Tierra. Para los cadetes de recién ingreso, el paso de una vida civil a militar supone multitud de cambios, que abarcarán diferentes facetas de su vida. Actualmente se observa que no siempre todos los cadetes de nuestra institución mantienen una adecuada condición física y que algunos manifiestan problemas de salud, sobrepeso y se lesionan con frecuencia, pudiendo incidir en su rendimiento laboral e incluso en el abandono de la institución.

Datos transversales del proyecto *Niveles de actividad física y su efecto sobre la condición física y composición corporal de los cadetes del Ejército de Tierra"* realizado por nuestro grupo, muestran que los caballeros cadetes con sobrepeso u obesidad presentaban niveles más bajos de fuerza, velocidad y resistencia que aquellos con normopeso, atendiendo a los criterios establecidos por el índice de masa corporal (IMC) [6]. Por tanto, teniendo en cuenta la importancia de la composición corporal en la salud de las personas, evaluar los cambios temporales que se producen tanto en la masa grasa como en la masa muscular es importante ya que éstos podrían afectar la condición física y rendimiento de los cadetes en el futuro. Además, dado que un elevado nivel de condición física es fundamental para un buen desarrollo profesional dentro del Ejército de Tierra, parece necesario identificar a aquellos cadetes con un elevado IMC con el objetivo de establecer intervenciones que les ayuden a mejorar su estado físico y de salud.

Los objetivos de este estudio fueron: (1) evaluar los cambios que se producen a lo largo de un año en la composición corporal y la condición física de los cadetes de la AGM y (2) conocer la relación entre el IMC y los cambios producidos en el nivel de condición física en este grupo de población.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

El presente estudio es la continuación del proyecto mencionado anteriormente, titulado "*Niveles de actividad física y su efecto sobre la condición física y composición corporal de los cadetes del Ejército de Tierra*", en el que participaron de manera voluntaria un total de 820 cadetes de la AGM. El proyecto completo tiene un diseño longitudinal en el que se realizaron dos evaluaciones a lo largo de dos años, tal y como se muestra en la figura 1.

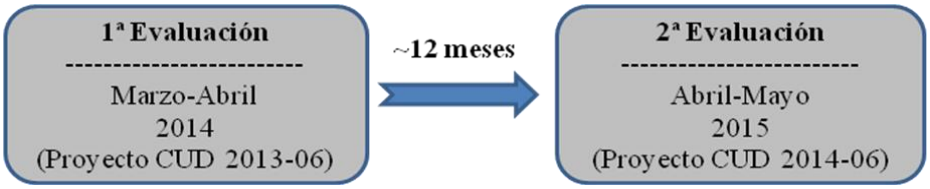


Figura 1. Diseño del estudio.

El estudio se llevó a cabo siguiendo las normas deontológicas reconocidas por la Declaración de Helsinki (52ª Asamblea General Edimburgo, Escocia, Octubre 2000) y las Normas de Buena Práctica Clínica. El estudio fue previamente aprobado por el EXCMO. SR. GENERAL DIRECTOR de la AGM y por el Comité Ético de Investigación Clínica de la Inspección General de Sanidad de la Defensa (código: 13/15). Todos los cadetes fueron informados de los posibles beneficios e inconvenientes de las pruebas y firmaron un consentimiento informado previo a la participación en el estudio.

El proyecto se realizó en el marco de las actividades desarrolladas en la AGM, concretamente, en el horario de clase de Formación Física. La toma de medidas de composición corporal no supuso más de 10 minutos por cada 6 cadetes y no tuvo incidencia sobre el desarrollo normal de las clases. Las pruebas de condición física se realizaron en el periodo oficial establecido por la AGM, de cuyo orden y organización se encargó específicamente el área de Formación Física.

El tamaño muestral para el estudio transversal se calculó para un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 95%. Actualmente la AGM está compuesta por un total de 952 cadetes (905 hombres y 47 mujeres). En base a esto, el número mínimo de participantes para garantizar la representatividad de la muestra en el estudio debía ser de 270 y 42 cadetes, hombres y mujeres respectivamente.

El número de participantes en las evaluaciones del año 2014 y 2015 se muestra en la figura 2. Los principales motivos de abandono del proyecto a lo largo del año de seguimiento se deben a la finalización de los estudios dentro de la AGM (alumnos de la Guardia Civil y de quinto curso), así como a bajas ocasionadas en la academia.

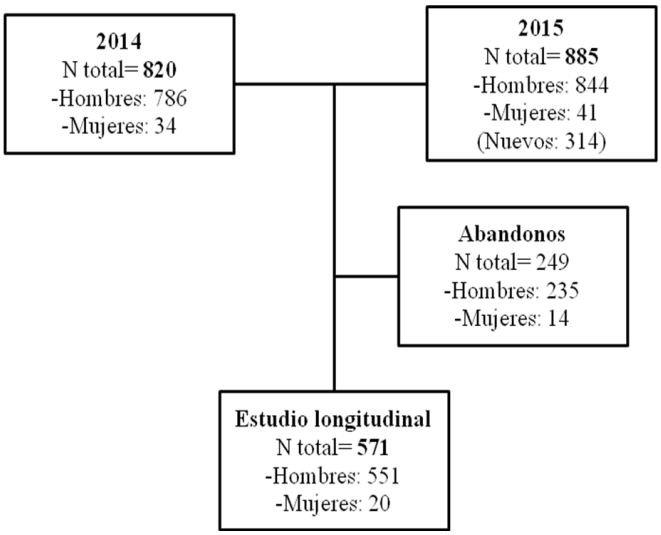


Figura 2. Diagrama de flujo de los participantes del estudio.

2.1. Valoraciones

2.1.1. Valoración de la composición corporal:

Todas las pruebas de composición corporal fueron realizadas por un licenciado en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte.

Antropometría: las mediciones antropométricas se realizaron siguiendo las recomendaciones que marca la Sociedad Internacional para el Avance de la Cineantropometría (ISAK) [7]. Todas las mediciones se llevaron a cabo dos veces, siendo la media de ambas el valor correspondiente a la prueba. Las mediciones realizadas fueron la altura y el peso.

La altura se midió mediante el uso de un estadiómetro portátil de una altura máxima de 2,10 m y un margen de error de 1 mm (SECA 225, SECA, Hamburg, Germany). Para su evaluación, los participantes debían permanecer de pie, con los pies juntos, los talones, glúteos y parte superior de la espalda en contacto con la escala y la cabeza en el plano de Frankfort.

Impedancia bioeléctrica: se utilizó un equipo TANITA BC-418MA (Tanita Corp., Tokyo, Japan) para la medición del peso, agua corporal y la estimación de la masa grasa y la masa libre de grasa de todos los participantes. Este dispositivo permite conocer de manera válida, fiable y no invasiva la cantidad de agua corporal, a través de la cual estima la masa grasa y libre de grasa del cuerpo tanto de manera global como por segmentos (extremidades superiores, extremidades inferiores y tronco). Siguiendo las recomendaciones del fabricante, antes de la medición, los participantes se quitaron la ropa pesada y los zapatos [8].

El IMC se calculó dividiendo el peso corporal (kg) por la altura en metros al cuadrado. Siguiendo las indicaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), los valores por encima de 25 kg/m^2 fueron considerados como sobrepeso y los valores superiores a 30 kg/m^2 como obesidad [9].

2.1.2. Valoración de la condición física:

Todas las pruebas de condición física se realizaron por personal cualificado de la AGM (área de Formación Física). Para la evaluación de la misma se efectuaron los siguientes seis test.

1- Fuerza extremidades inferiores. Salto vertical con pies juntos: el participante se situaba de costado al lado de una pared graduada en centímetros. En posición de firmes levantando el brazo más próximo a la pared manteniendo los hombros en el mismo plano horizontal, marcó la altura a la que llegaba con el extremo de los dedos. Realizaron mediante flexión de piernas un salto vertical señalando la nueva altura alcanzada. La marca alcanzada en esta prueba fue la diferencia en centímetros entre la altura conseguida con el salto y la tomada en primer lugar. Se realizaron un máximo de 3 intentos.

2- Fuerza extremidades superiores. Extensiones en el suelo: el participante se situaba en posición de decúbito prono, colocando las manos en la posición más cómoda, manteniendo los brazos perpendiculares al suelo. Desde esta posición se realizaron todas las flexiones-extensiones de brazos posibles en un tiempo de 2 minutos, teniendo en cuenta que se contabilizaba como efectuada una flexión-extensión cuando se tocaba con la barbilla el suelo y se volvía a la posición de partida. Se permitió durante el tiempo del ejercicio un descanso en cualquier momento, siempre que éste se realizase en posición de tierra inclinada adelante.

3- Prueba de velocidad. Carrera de 50 metros: carrera de 50 metros en pista, con salida a pie. Se registró el tiempo en segundos mediante cronometraje manual.

4- Prueba de resistencia (corta). Carrera de 1000 metros: carrera de 1000 metros en pista con salida en bipedestación.

5- Natación. Prueba de 50 metros: nadar 50 metros a estilo libre. La salida se efectuó lanzándose al agua desde el borde de la piscina. Se registró el tiempo en segundos mediante cronometraje manual.

6- Prueba de resistencia (larga). Carrera de 6000 metros: recorrido de 6000 metros sobre pista, caminos y carreteras principalmente llanas.

2.2. Análisis estadístico

A continuación se describen brevemente las pruebas estadísticas generales que se efectuaron para obtener los resultados de este proyecto. Para la realización de este artículo se han utilizado únicamente los datos correspondientes a los hombres.

El análisis estadístico se realizó con el paquete informático *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS versión 15.0 para Windows). Los datos se presentan como media ± desviación estándar o en porcentaje. La evolución de las variables de composición corporal y de condición física entre los años 2014 y 2015 se determinó con el test de medidas repetidas de ANOVA. Las diferencias entre grupos de normopeso y sobrepeso/obesidad (clasificados según el IMC) para los porcentajes de cambio de las variables de condición física fueron estudiadas mediante el análisis de la varianza (ANOVA) de un factor. Se fijó el nivel de significación estadística en $P<0,05$.

3. Resultados y Discusión

3.1. Participantes

En el presente estudio se analizaron los datos de un total de 551 cadetes (hombres) con una edad media de 22,11±3,46 años.

En base a los criterios del IMC, la relación de cadetes con sobrepeso y obesidad en los años 2014 y 2015 fue la que se muestra en la siguiente figura.

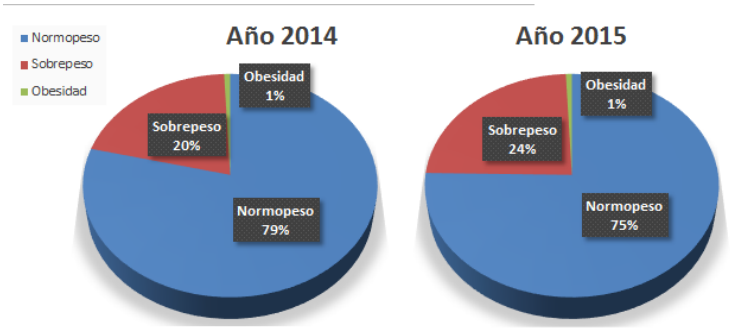


Figura 3. Prevalencia de sobrepeso y obesidad en los caballeros cadetes de la AGM.

El 21% (n=116) de los cadetes de la AGM padecía de sobrepeso y obesidad en el año 2014, en base a los puntos de corte establecidos para el IMC. Un año más tarde esta prevalencia aumentó ligeramente hasta situarse en el 25% (n=136).

3.2. Análisis de las variables de composición corporal y condición física

En la tabla 1 se muestra la evolución a lo largo de un año de las variables de composición corporal y pruebas de condición física de los caballeros cadetes participantes en el estudio.

	2014		2015		P
	Media	DE	Media	DE	
COMPOSICIÓN CORPORAL					
Peso (kg)	73,91	7,87	75,10	7,96	<0,001
IMC (kg/m^2)	23,53	2,04	23,78	2,01	<0,001
MG Total (kg)	8,29	3,32	8,84	3,29	<0,001
MLG Total (kg)	65,64	6,12	66,28	6,39	<0,001
%MG	11,03	3,63	11,61	3,62	<0,001
CONDICIÓN FÍSICA					
Fuerza EEII (cm)	60,57	6,08	59,00	5,79	<0,001
Fuerza EESS (repeticiones)	41,56	10,40	46,03	11,71	<0,001
Velocidad (s)	6,90	0,34	7,0	0,31	<0,001
Resistencia: 1000 m (min)	3,15	0,18	3,01	0,37	<0,001
Natación (s)	36,85	5,25	35,67	4,69	<0,001
Resistencia: 6000 m (min)	24,67	1,79	24,11	1,82	<0,001

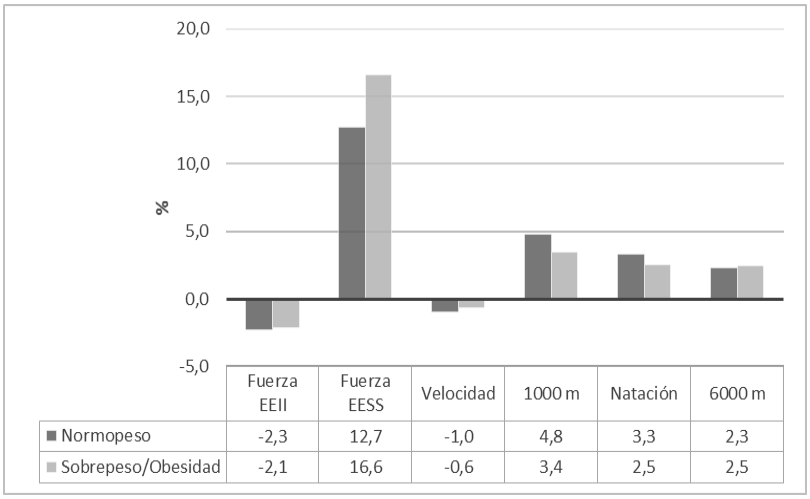
IMC: índice de masa corporal, MG: masa grasa, MLG: masa libre de grasa, EEII: extremidades inferiores, EESS: extremidades superiores.

P<0,001; cambios estadísticamente significativos entre el año 2014 y el 2015

Tabla 1. Evolución de las variables de composición corporal y pruebas de condición física.

A lo largo de un año de seguimiento, los caballeros cadetes de la AGM experimentaron un aumento significativo del peso, IMC, masa grasa total (en kg y en %) y masa libre de grasa (todas P<0,001). En relación a las variables de condición física, se observó una mejora de la fuerza de extremidades superiores, prueba de natación, resistencia de corta y larga duración. Sin embargo, se produjo una disminución del rendimiento en las pruebas de velocidad y fuerza de extremidades inferiores (todos P<0,001).

3.3. Evolución de las variables de condición física en función del IMC



	Fuerza EEII	Fuerza EESS	Velocidad	1000 m	Natación	6000 m
Normopeso	-2,3	12,7	-1,0	4,8	3,3	2,3
Sobrepeso/Obesidad	-2,1	16,6	-0,6	3,4	2,5	2,5

*P<0,05; diferencias estadísticamente significativas entre grupos.

Figura 4. Porcentajes de cambio de las variables de condición física en función del IMC.

Con el objetivo de comprobar si los cambios que se producen en la condición física a lo largo de un año pudieran estar influenciados por la composición corporal inicial de los cadetes, se analizó el cambio en cada una de las variables en aquellos cadetes clasificados con normopeso y en aquellos que padecían sobrepeso y/u obesidad (figura 4). Los porcentajes de cambio para cada una de las pruebas de condición física estudiadas fueron similares en ambos grupos, no observándose ninguna diferencia estadísticamente significativa entre normopeso y sobrepeso/obesidad (todos P>0,05).

4. Conclusiones

A lo largo de un año de seguimiento, los caballeros cadetes de la AGM experimentaron una mejora de la fuerza de extremidades superiores, prueba de natación y resistencia de larga y corta duración; sin embargo se produjo una disminución del rendimiento en las pruebas de velocidad y fuerza de extremidades inferiores. Estos datos podrían servir de punto de partida para el desarrollo de nuevos programas de Formación Física dentro la AGM, con el fin de evitar la pérdida de fuerza y velocidad de carrera de los cadetes. La inclusión de un número mayor de sesiones de fuerza específica a través de sobrecargas, multisaltos o series de velocidad podrían ser sistemas de entrenamiento útiles para tal fin.

A pesar de que las variaciones observadas en el rendimiento físico son independientes al IMC, el hecho de que los cadetes con sobrepeso y obesidad tengan un nivel de condición física menor ha de ser tenido en cuenta con el objetivo de desarrollar estrategias para lograr que tengan un peso saludable.

Agradecimientos

Los proyectos "*Niveles de actividad física y su efecto sobre la condición física y composición corporal de los cadetes del Ejército de Tierra*" (2013-06) y *"Relación entre la preparación física y la composición corporal de los cadetes del Ejército de Tierra: estudio longitudinal"* (2014-06) fueron financiados por el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza. Los autores desean dar las gracias a todos los participantes y a la Academia General Militar de Zaragoza, cuya colaboración y dedicación hicieron posible este estudio.

Referencias

1 Rodriguez-Diaz, J. La evaluación física en el Ejército de Tierra. *Revista Ejército* **2011**, *847*, 41-50.

2 Ray, S.; Kulkarni, B.; Sreenivas, A. Prevalence of prehypertension in young military adults & its association with overweight & dyslipidaemia. *Indian J Med Res* **2011**, *134*, 162-167.

3 Saely CH, Risch L, Frey F, Lupi GA, Leuppi JD, Drexel H, Huber AR: Body mass index, blood pressure, and serum cholesterol in young Swiss men: an analysis on 56784 army conscripts. *Swiss Med Wkly* **2009**;139:518-524.

4 Cowan DN, Bedno SA, Urban N, Yi B, Niebuhr DW: Musculoskeletal injuries among overweight army trainees: incidence and health care utilization. *Occup Med (Lond)* **2011**;61:247-252.

5 McLaughlin R, Wittert G: The obesity epidemic: implications for recruitment and retention of defence force personnel. *Obes Rev* **2009**;10:693-699.

6 Gómez-Cabello A, Matute-Llorente A, Gómez-Bruton A, Gutiérrez-Gutiérrez J, Dieste-Gonzalvo A, Casajús-Mallén J, Vicente-Rodríguez G: Evaluación de la condición física y composición corporal en los cadetes del Ejército de Tierra. Dena Arto, A. et al. Actas: II Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad, DESEi+d 2014. Ed. Centro Universitario de la Defensa Zaragoza, 2014.

7 Marfell-Jones M, Olds T, Stewart A, Carter L: International standards for anthropometric assessment. 2006.

8 Body Composition Analyzer BC-418 Instruction Manual. Tanita Corporation., Tokyo, Japan.

9 World Health Organization. Expert Committee on Physical Status: The use and interpretation of anthropometric physical status. 2005.

Curación de úlceras tórpidas en la cavidad oral

Guerrero Izquierdo, E.[1]*,GarcíaTorres, J.[2]y Hernández Regalado, MA.[3]

[1] Tte. Odo. USBAD Alfonso XIII. Melilla. España.
[2] Tte. Odo.USBAD Teniente Ruiz.Ceuta. España.
[3] Cte. Odo.Dpto Odontología. Escuela Militar de Sanidad. Madrid. España.

***** Dirección para correspondencia:elenaguerrer@gmail.com

Abstract:

Este artículo es un estudio piloto sobre la posible aplicación de técnicas de curación mediante vacío en un entorno intraoral. La Terapia VAC (vacuum assisted closure) se viene aplicando y desarrollando para favorecer la curación de heridas complejas en piel. En determinadas patologías o úlceras bucales inducidas por fármacos, se observan heridas con un pronóstico incierto y de difícil curación que podrían beneficiarse de las terapias VAC. Este estudio demuestra la eficacia inicial en la aplicación del vacío controlado dentro de la cavidad oral.

Keywords:VAC therapy, oral ulcers treatment, oral ulcers pathogenesis.

1. Introducción

El sistema Vacuum Assisted Closure (VAC) consiste en una terapia de tratamiento no invasivo, único y dinámico, que estimula la curación de las heridas, mediante el uso de drenaje asistido por vacío para eliminar la sangre o líquido seroso de una herida o lecho quirúrgico.

Los fundamentos del VAC y sus aplicaciones se basan en tres efectos principales:

Macrotensión: Alteración visible producida cuando se aplica presión negativa a un apósito de espuma colocado en una herida, que contrae el apósito en las tres dimensiones. Este

efecto aproxima los bordes de la herida, disminuyendo la tensión en los mismos, ya que la herida se adapta al apósito.

Microtensión:A nivel celular, el aumento de la presión en el lecho de la herida debido al contacto con la espuma producen: migración de fibroblastos a la zona de la herida, aumentando la mitosis celular y acelerando la formación de tejido de granulación. Aumento de la proliferación celular debido a la estimulación y división de los nuevos fibroblastos, acelerando también la formación de tejido de granulación.Aumento de la perfusión sanguínea local y mayor vascularización debido a la formación de nuevos vasos sanguíneos.

Eliminación de fluidos en el lecho de la herida: Disminución de la carga bacteriana y sustancias inhibidoras de la cicatrización, disminución del edema, aumento de la perfusión, favorecimiento de la creación de un entorno de humedad adecuado para la cicatrización.

Este sistema tiene una serie de indicaciones: heridas crónicas (úlceras por presión y heridas diabéticas), heridas subagudas (dehiscencia quirúrgica, heridas abdominales), heridas agudas (heridas traumáticas, quemaduras de espesor parcial, colgajos e injertos).

Al igual que existen contraindicaciones: osteomielitis no tratada, fístulas entéricas o sin explorar, tejido necrótico con presencia de escaras o no desbridado, órganos o vasos sanguíneos expuestos, tejidos donde no se haya descartado malignidad, alergia a la plata (Apósito GranuFoam plata).

Es importante señalar unas precauciones cuando lo empleemos:hemorragia activa, hemostasia difícil de la herida, y aquellos pacientes que están en tratamiento con anticoagulantes.

Estos sistemas, cuya eficacia para el tratamiento de heridas en piel o secundarias a cirugías, ha sido ampliamente demostrada, aún no han sido propuestos para su aplicación en patología bucal, en entornos cerrados y húmedos. El propósito de este artículo es intentar desarrollar las condiciones ideales de aplicación de esta terapia en boca. Para ello proponemos su aplicación a modo experimental en una herida ulcerosa en boca. La úlcera bucal esuna lesiónelementalsecundariaconpérdidadesustanciadebidaauna destrucciónydesprendimiento tisularde una cavidaden la superficie de un órgano. Son producidas porcausasmúltiples,afectanal epitelio,la membrana basal yen profundidad al conectivo subyacente.Curandejandocicatriz.

Lasúlcerasbucalesamenudo desaparecenen10a14días,inclusosin hacernada. A veces,duran hasta 6 semanas.Existenprotocolosdetratamiento yrecomendaciones,yencasosconcretoscomoen las ulceraciones inducidas por el tratamiento conbifosfonatos,el pronóstico y resolución de estas heridas sigue siendo incierto. Sobre este tipo de úlceras se vienen realizando nuevas terapias innovadoras como la aplicación deoxígeno hiperbárico, ondas láser.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

Traseste análisisdetallado delconceptode úlcerasydel mecanismoVAC,nos proponemosla ideade aplicarporprimeravezestetipo de terapiaen úlceras intraorales.

Parademostrarlacapacidaddecuracióndeestanuevaterapiaalvacío, contamos conunprimermodelodeescayolatomadodeunmaxilarextraídode cadáver. Simulamosuna lesiónmedianteun fresadoen la escayola.Estudiando los diferentes métodosde aislamientousado en la terapia VACen otras zonasanatómicas, concluimos que la aplicación de éstos en zona intraoral es inviable debido a la gran humedad delmedio.Porlotanto,desarrollamosunaférulablanda realizada en una máquina de vacío,parafavorecerel efectovacío.Los límitesde la férula estaráncercanos a fondo devestíbulo.Se realiza unorificiodeentradadel tuboque comunicael VACconestaférula,teniendoen cuentaqueéstetienequeserdemenordiámetroque eltuboparaevitarlapérdidade vacío.

Está compuesto porun monitor,filtro, almohadillas,tubos que suministra presión negativa (subatmosférica)en lazona delaheridamedianteun tubo que sometea descompresión un apósito de espumade formacontinua ointermitente(porejemplo, cinco minutos sí, dos minutos no), dependiendo del tipo de herida que se esté tratando.

La esponja se colocasobre laherida.Se cubre medianteuna láminaselladora adhesiva transparente semioclusiva (V.A.C. Drape). Se aplica después una almohadillaSensaT.R.A.C.(con tubos integrados)y se conecta a la unidadV.A.C.

LacasacomercialKCI,nos facilitados diferentesequipospararealizarelvacío,uno automático y otromanualyportátil.

Se realiza una búsqueda bibliográfica en diferentes bases de datos (pubmed, medline),sinobtenerresultadosclarosysimilares.Seencuentraunartículo(Halama ycols),enelqueseaplicaestetipodeterapiaalalesióndeunqueratoquiste,pero no se puede aplicara nuestro caso.Al no habernada clarode cómodesarrollaresta idea, diseñamosunaserie de objetivos y métodos para alcanzarlos.

El objetivo principalesconseguirunselladocompletoparaaislarla lesiónoúlceradel mediohúmedodelacavidadoral,requisitoimprescindible parapodercrearunvacío para el correcto funcionamiento de esta terapia.

Al no haberconseguido un selladoconlosmétodos descritos anteriormente, recurrimos al modelooriginalextraídode cadáver,conlaesperanzadeal existiruna resilencia en la mucosa,

consigamos nuestro objetivos.

Empleamosel mismotipo deférula sobre el maxilarde cadáver,pero estavez buscamos otro método de sellado, y nos decantamos porlasilicona fluida.De estamanerasimulamosla elasticidad dela mucosaque representala realidad de lanaturalezadela cavidadoral,yaqueelmodelodeescayolapresentabagran rigidez.

Probamosel aparatode vacíomanual facilitado porlacasa comercial KCIyseguimos losmismospasosy colocamoslosmismosaditamientosque en el caso anterior utilizando el modelo rígido de escayola.

3. Resultados y Discusión

El trabajohadesarrolladola posibilidaddeaplicarla terapia VACenheridasoúlceras en la mucosa bucal. Nos habíamosplanteado el objetivo de conseguir un sellado de vacíode dos modelos,uno de escayolayotrode un maxilarextraídode cadáver, ya quesin esta premisa, no se podrán desarrollartrabajos futuros.

En la literatura encontramos un artículo que llama nuestra atención por la forma en la que los autores consiguen el sellado de la zona a tratar, cuando aplican este tipo de terapia. Fujitani y cols. se encuentran con dos casos de heridas con defecto de piel en la mano. Describen que es muy difícil conseguir el sellado debido a lo que llaman fugas de aire. Así pues, relatan la aplicación de guantes quirúrgicos en la mano previamente operada, enlazados con un aparato de vacío asimilable al nuestro. Consiguen cerrar de forma satisfactoria la herida y recuperar la función completa del miembro.

Aunque en relación a la Odontología no se haya abierto aún el camino, sí que observamos que en otras especialidades médicas en las que podríamos pensar que existe una dificultad para la utilización de este procedimiento, los cimientos ya existen. Es por ello, que se le otorga más valor a nuestros resultados.

De nuestra experiencia obtenemos un resultado positivo, cumpliendo nuestro objetivo principal en el modelo de cadáver. Se obtienen resultados favorables con el modelo extraído de cadáver, se consigue el vacío deseado.

4. Conclusiones

Consideramos este trabajo como base para futuros estudios en el ámbito

odontológico, enfocado principalmente a la curación de úlceras tórpidas, drenaje de abcesos, terapia regenerativa y reparativa, aumento de volumen de tejido blando, curación de infecciones.

Agradecimientos

Queríamos mostrar nuestros agradecimientos al Departamento de Odontología de la Escuela Militar de Sanidad (EMISAN) en estrecha colaboración con el Departamento de Estomatología del Hospital Central de la Defensa Gómez Ulla, Centro Universitario de la Defensa.

Referencias

1. Zhang DM; Yang ZH; Zhuang PL; Wang YY; Chen WL; Zhang B. Role of Negative-Pressure Wound Therapy in the Management of Submandibular Fistula After Reconstruction for Osteoradionecrosis. *J Oral Maxillofac Surg***2015**.

2. Yang YH; Jeng SF; Hsieh CH; Feng GM; Chen CC. Vacuum-assisted closure for complicated wounds in head and neck region after reconstruction. *J Plast Reconstr Aesthet Surg* **2013**,8,209-16.

3. Garwood CS; Steinberg JS. What's new in wound treatment: a critical appraisal. *Diabetes Metab Res Rev***2015**.

4. Mochizuki T; Ikari K; Hiroshima R; Takaoka H; Kawakami K; Koenuma N; Ishibashi M; Momohara S. Negative pressure wound therapy and skin grafting for necrotizing fasciitis in a patient with rheumatoid arthritis treated with abatacept: A case report. *Mod Rheumatol***2015**,12, 1-12.

5. Listewnik MJ; Sielicki P; Mokrzycki K; Biskupski A; Brykczyński M. The Use of Vacuum-Assisted Closure in Purulent Complications and Difficult-To-Heal Wounds in Cardiac Surgery. *Adv Clin Exp Med* **2015**,4, 643-650.

6. Sandy-Hodgetts K; Watts R. Effectiveness of negative pressure wound therapy/closed incision management in the prevention of post-surgical wound complications: a systematic review and meta-analysis. *JBI Database System Rev Implement Rep* **2015** 13, Volume 1, 253-303.

7. Kim PJ; Attinger CE; Steinberg JS; Evans KK. Negative pressure wound therapy with instillation: past, present, and future. *Surg Technol Int***2015** May,26,51-6.

8. Fujitani T; Zenke Y; Shinone M; Menuki K; Fukumoto K; Sakai A. Negative Pressure Wound Therapy with Surgical Gloves to Repair Soft Tissue Defects in Hands. *J UOEH***2015**, 37, Volume 3, 185-90.

9. Blume PA; Walters J; Payne W; Ayala J; Lantis J.Comparison of negative pressure wound therapy using vacuum-assisted closure with advanced moist wound therapy in the treatment of diabetic foot ulcers - a multicenter randomized controlled trial. *Diabetes care***2008.**31, 4, 631-6.

10. Braakenburg A;Obdeijn MC; Reitz R; van Rooij IA; van Griethuysen AJ; Klinkenbijl JH.The clinical efficacy and cost effectiveness of the vacuum-assisted closure technique in the management of acute and chronic wounds: a randomized controlled trial .*Plastic and Reconstructive Surgery***2006** ,2,390-400.

11. Andros G;Armstrong DG<, Attinger C; Boulton A; Frykberg RG; Joseph WS Lavery LA; Morbach S; Niezgoda JA;Toursarkissian B. Consensus statement on negative pressure wound therapy (V.A.C.® Therapy) for the management of diabetic foot wounds. *Ostomy/Wound Management***2006,** 5,21-32.

12. Armstrong DG;Lavery LA.Diabetic Foot Study Consortium:Negative pressure wound therapy after partial diabetic foot amputation: a multicentre, randomised controlled trial. *Lancet***2005**,366,1704-10.

13. Repta R;Ford R; Hoberman L; Rechner B. The use of negative-pressure therapy and skin grafting in the treatment of soft-tissue defects over the Achilles tendon. *Ann Plast Surg*. **2005**,4,367-70.

14. Ruggiero SL;Menhrotra B; Rosenberg TJ; Engroff SL. Osteonecrosis of the jaws Associated wit h the use of Bisphosphonates: A review of 63 cases. *J Oral Maxillofac Surg* **2004**,62,527-34.

15. Junquera LM; Burgueño M; de Vicente JC; Martín-Granizo R; Santamaría J. Diagnóstico, prevención y tratamiento de la osteonecrosis de los maxilares por bifosfonatos. Recomendaciones de la Sociedad Española de Cirugía Oral y Maxolofacial (SECOM) *Cien Dent***2008**,5**,**229-237.

Hacia una comunicación estratégica integral de la Defensa. El concepto del "soldado narrativo"

Hernández Corchete, Sira[1,*], Tcol. Farré Basurte, Jorge[2]

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza. E-mail: shernan@unizar.es (SHC)
[2] Centro Conjunto de Desarrollo de Conceptos (CESEDEN). E-mail: jfarbas@ea.mde.es (JFB)

***** Hernández Corchete, Sira. E-Mail: shernan@unizar.es (SHC)

Abstract: A pesar de que la gestión de la información ha jugado tradicionalmente un papel destacado en el devenir de los conflictos a partir de la Primera Guerra Mundial, su desenlace no había estado tan ligado como lo está en la actualidad, en los denominados conflictos asimétricos, a la victoria en la «batalla de las narrativas». En este contexto, se hace preciso que la comunicación adquiera una dimensión estratégica dentro de las instituciones encargadas de la defensa y la seguridad, para lo cual es necesario, entre otras cosas, la implicación comunicativa de todos sus miembros. En este sentido, el foro internacional *Multinational Capability Development Campaign* (MCDC) ha desarrollado el concepto del «soldado narrativo»; un soldado formado en técnicas de comunicación para ganar el consentimiento de la población local a la presencia de las fuerzas internacionales en las zonas de operaciones, y el favor hacia las acciones llevadas a cabo en ellas.

Keywords: comunicación estratégica; defensa y seguridad; conflictos asimétricos; operaciones militares; gestión de la información; batalla de las narrativas; opinión pública; *Multinational Capability Development Campaign*; soldado narrativo.

1. Introducción

A comienzos del siglo XXI, Rafael Alberto Pérez [1] afirmaba que "la idea de que la estrategia es necesaria para la comunicación no es nueva, [ya que] desde los primeros actos de propaganda política hasta nuestros días, pasando por la concepción aristotélica de la retórica, los hombres han intentado mejorar su posición relativa utilizando estrategias y medios de comunicación". Sí resulta más novedosa, por el contrario, la consideración quiasmática de que la comunicación es necesaria para la estrategia, en concreto, para la militar, especialmente cuando, en las dos últimas décadas, la

generalización y sofisticación de las nuevas tecnologías de la información, el consecuente protagonismo adquirido por la opinión pública en la gestión y el diseño de la política exterior de los estados, y la aparición de un nuevo tipo de conflicto caracterizado por la asimetría en la naturaleza, los medios y los fines de los contendientes han situado a la dimensión informativa "en el lugar de toda reflexión sobre la naturaleza de las guerras del presente y el futuro" [2].

En efecto, como han demostrado conflictos recientes como Irak o Afganistán, la lucha en campo abierto para la que han sido adiestrados tradicionalmente los ejércitos de las democracias occidentales ha sido desplazada del primer plano por la denominada «batalla de las narrativas» o «batalla por las percepciones», en la que el combate se libra en el escenario inmaterial de la información y el objetivo estratégico prioritario no es ya destruir las fuerzas enemigas, sino, como señalaba en 2007 el general británico retirado Rupert Smith, "ganar los corazones y las mentes" [3] de una población local, nacional e internacional que, según Arteaga [4], se encuentra atrapada entre los relatos de los bandos enfrentados y que "acabará identificándose con uno tan pronto como el otro afloje su voluntad de presencia e influencia".

Este cambio de paradigma, en el que "la percepción es el fin y la acción militar el medio [o, mejor, uno de ellos] para lograr los objetivos políticos en juego" [4], ha propiciado que la comunicación haya dejado de ser una cuestión meramente táctica o circunstancial para pasar a adquirir de forma paulatina tintes estratégicos dentro de la cultura operacional de los países occidentales y de las organizaciones internacionales en las que se integran —la incorporación de la comunicación al Concepto Estratégico de la OTAN en 2010 es prototípica en este sentido—, hasta el punto de que, como sentencia de nuevo Arteaga, "si antes las campañas militares se apoyaban mediante operaciones de información, ahora son las campañas de comunicación estratégica las que se acompañan por operaciones militares".

Si bien todavía queda mucho camino por recorrer para que la comunicación estratégica de las fuerzas internacionales participe del enfoque integral y, por ende, de la eficacia, de los que disfruta en otras empresas e instituciones ajenas a la defensa y la seguridad, los proyectos para que sirva a la consecución de sus objetivos políticos y militares no dejan de sucederse. Sin ir más lejos, el foro internacional CD&E *Multinational Capability Development Campaign* (MCDC) [5] ha impulsado algunos de ellos dentro del concepto "Comunicación estratégica en las operaciones en coalición. Actividades de información y prácticas emergentes en comunicación", que ha trabajado durante la campaña bianual 2013-2014 bajo el liderazgo de Alemania, Italia y Finlandia. Este trabajo tiene por objeto dar a conocer, precisamente, una de esas iniciativas conceptuales, el «soldado narrativo», en cuyo diseño han participado doce países más, entre ellos, España. Con esta figura, el MCDC propone descender "la capacidad de comunicación hasta el nivel táctico más bajo, creando, a nivel pelotón, un soldado experto en comunicación […] capaz de velar por la transmisión adecuada del mensaje sobre las intenciones de la operación militar y por la obtención de percepciones favorables" [6].

2. La comunicación corporativa como función estratégica dentro de las organizaciones

La mayoría de los autores que se han enfrentado al abordaje académico de la comunicación estratégica coinciden en señalar que estamos ante un concepto incierto y altamente elusivo, debido a la dilatada trayectoria semántica de los dos vocablos que lo forman [7]. Algunos de ellos incluso han llegado a afirmar que "en cierto sentido toda comunicación es estratégica o posee un ingrediente estratégico, pues a través de ella el emisor, cuya racionalidad se presupone, persigue influir en el curso de acción del receptor del mensaje" [8]. No obstante, casi todos reservan el marbete *comunicación estratégica* para referirse no a la comunicación interpersonal, sino, en sentido estricto, a la comunicación corporativa, empresarial, institucional u organizacional entendida como una función directiva, es decir, como una función que integra de forma coherente todas las comunicaciones de la organización y las alinea con los objetivos globales que persigue para favorecer su consecución (Jethwaney, 2012; Goodman & Hirsch, 2010, Van Riel & Fombrun, 2008; Argenti, 2003).

A pesar de que la comunicación corporativa, bajo sus diferentes denominaciones, se configura como actividad profesional y disciplina científica a lo largo del siglo XX, su consideración como función estratégica dentro de las organizaciones no comienza a popularizarse hasta la década de 1980, coincidiendo así con el inicio de su consolidación profesional y académica. La confluencia en ese momento de factores tales como la globalización de los mercados; que obliga a las corporaciones a competir por los mejores recursos humanos, financieros o institucionales; la multiplicación de los actores sociales y la intensificación de su participación en la esfera pública donde llevan a cabo su actividad; el desarrollo tecnológico que favorece el intercambio de información en tiempo real y sin apenas fronteras geográficas o la mayor educación de los públicos que les demandan cada vez más información y transparencia [9] urgen más que nunca a las entidades a incluir en su gobierno corporativo la satisfacción de las relaciones con sus públicos de interés o *stakeholders* propia de la comunicación corporativa, con el fin de alcanzar la legitimidad social necesaria para el cumplimiento de su misión mediante el cuidado de su imagen y su reputación.

Desde los años ochenta, el impacto de las relaciones comunicativas en la consecución de los objetivos estratégicos de empresas e instituciones empieza también a ser una constante en la literatura especializada. Cutlip, Center y Broom [10], por ejemplo, definen las relaciones públicas —otra de las rúbricas de la comunicación corporativa— como "la función directiva que establece y mantiene relaciones de beneficio mutuo entre una organización y los públicos de quienes depende para su éxito o fracaso". Por su parte, Dolphin [11], considera que "la comunicación corporativa establece y mantiene relaciones constantes con aquellos públicos que la compañía identifica como claves para lograr sus objetivos corporativos"; mientras que Cornelissen [12] insiste en que "la comunicación corporativa es una función de dirección que ofrece un marco para la coordinación de toda actividad comunicativa interna y externa, con el propósito de establecer y mantener una reputación favorable entre los *stakeholders* de los que depende la organización". Además, este nuevo significado que toma la comunicación en las organizaciones demanda, como señalan varios autores, la consecuente inclusión de su responsable, el conocido DIRCOM o director de comunicación, en el comité ejecutivo para

poder participar en la toma de decisiones al más alto nivel (Berger y Reber, 2006; van Ruler y de Lange, 2003, Dolphin, 2003; Tixier, 1998).

A partir de estas y otras propuestas conceptuales que abogan por la concepción estratégica de la comunicación corporativa (Toth, 2007; De Santo y Moss, 2004; Caywood, 1997; Lauzen y Dozier, 1992), podemos concluir que esta constituye una herramienta de gestión estratégica del futuro de las organizaciones en tanto en cuanto, mediante su naturaleza relacional, trata de conocer a los distintos públicos que forman parte de su entorno comunicativo para generar relaciones de entendimiento y beneficio mutuo, dando respuesta a sus demandas informativas, cumpliendo sus expectativas y reflejando sus intereses, al tiempo que gestiona las percepciones favorables de estos hacia tales corporaciones que mejor coadyuvan al logro de sus fines.

3. La comunicación estratégica de la defensa y la seguridad: un caso singular

El concepto de comunicación estratégica en el ámbito de la defensa y la seguridad aparece de forma pionera, según el teniente coronel Baños Bajo [13], en la Estrategia de Seguridad Nacional estadounidense de 1987, que la define como "una combinación de información y tecnología empleada como instrumento estratégico para influir en el comportamiento global de gobiernos, organizaciones supranacionales, ONG y sociedades, para apoyar las estrategias y los objetivos de seguridad nacional". Sin embargo, en la mayoría de los países occidentales, la comunicación corporativa no se asoma a los documentos estratégicos hasta el siglo XXI, en el que el desvío del «centro de gravedad» de los conflictos hacia las percepciones hace más evidente que nunca que "las operaciones se libran hoy en el doble plano táctico y mediático", y que, por lo tanto, para culminarlas con éxito "no basta vencer, [sino que] se debe, además, convencer" [14].

Si bien es cierto que no existe una correspondencia absoluta entre las nociones de comunicación estratégica esbozadas en este ámbito por las distintas naciones y organizaciones internacionales, dichos conceptos coinciden, en buena medida, como veremos a continuación en el caso español, con los expuestos por la literatura académica en aspectos clave como la toma en consideración de una gran diversidad de públicos a los que dirigir los esfuerzos comunicativos; la utilización coherente y coordinada de todos los activos de comunicación para alcanzar a tales audiencias, o la estima de que las relaciones informativas con ellas pueden favorecer el logro de las metas corporativas. No obstante, es preciso advertir aquí que la particular misión de las instituciones encargadas de la defensa y la seguridad, que conlleva la participación de sus miembros en conflictos armados, otorga, además, una singularidad a su comunicación estratégica, ya que, dentro de las actividades comunicativas que estas deben coordinar para el logro de los objetivos previstos hay que considerar también el ámbito de las Operaciones de Información [15] y las Operaciones Psicológicas [16], muy utilizadas por los adversarios asimétricos y que implican el uso de técnicas de desinformación y propaganda para minar la capacidad ofensiva del enemigo y obtener una ventaja competitiva en la guerra [17].

Consciente de esta realidad, la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) formuló en 2009 una amplia noción de comunicación estratégica [18], en la que incluía, teniendo muy en cuenta, por

supuesto, la segmentación y el tratamiento individualizado de las audiencias para culminar de forma satisfactoria las operaciones de la Alianza, no solo la Diplomacia Pública (*Public Diplomacy*), los Asuntos Públicos (*Public Affairs*) [19] o los Asuntos Públicos Militares (*Military Public Affairs*) que parecían estar latentes en la precursora definición norteamericana, sino también las citadas Operaciones de Información (*Information Operations-INFO OPS)* y las Operaciones Psicológicas (*Psychological Operations-PSYOPS*).

Aunque el resto de formulaciones no son tan explícitas como la de la OTAN, el sentir de los países respecto a la necesaria integración de todas estas acciones dentro de una estrategia de comunicación que "canalice un discurso creíble para tirar por tierra el discurso desestabilizador y oportunista empleado por el adversario" [20] sí es unánime. Esta expansión del concepto de comunicación estratégica más allá de la tradicional comunicación corporativa abre, por lo tanto, una brecha entre el modo de entender y practicar la comunicación estratégica en determinados ámbitos de la defensa y la seguridad, concretamente, en el de las operaciones militares, y en el resto de organizaciones. Así, la transparencia y veracidad que han de guiar en todo momento las relaciones informativas en cualquier empresa para generar en sus *stakeholders* la confianza de la que depende para alcanzar sus objetivos están presentes, en el caso que es objeto de estudio, en las relaciones diplomáticas y con los medios de comunicación, mientras que desaparecen en las INFO OPS y las PSYOPS, ya que, por su propia naturaleza, el éxito de estas estriba, precisamente, en la opacidad y la manipulación de la información.

4. Estrategias de comunicación y comunicación estratégica de la Defensa en España

Como en otros países europeos de nuestro entorno, el empleo del concepto de comunicación estratégica en el ámbito de la defensa y la seguridad por parte de España es bastante nuevo. Si Francia o Gran Bretaña lo recogen, respectivamente, en el Libro Blanco de la Defensa de 2008 y el Libro Verde de la Defensa de 2010 [13], las alusiones a él en nuestro país se hacen esperar hasta la promulgación de la Directiva de Defensa Nacional 1/2012, de 31 de julio, la cual, entre los objetivos de Política de Defensa, manifiesta la necesidad de acentuar "el esfuerzo en el desarrollo de una comunicación estratégica de la Defensa que tendrá como finalidad fomentar una conciencia de defensa de España y, más en profundidad, una cultura de defensa", para que esta sea "asumida por todos los españoles como asunto de indudable trascendencia, de la que depende, junto a la independencia, la soberanía y la integridad territorial, la paz, la libertad, el respeto a nuestros intereses y la propia prosperidad" [21].

Este hecho no supone, como es evidente que, hasta este momento y, sobre todo, dada la imagen negativa que nuestras Fuerzas Armadas arrastraban de la época franquista y el paulatino proceso de racionalización, modernización, profesionalización e internacionalización al que han sido sometidas en las tres últimas décadas, el Ministerio de Defensa español no hubiera ensayado, desde ámbitos tan diversos como las relaciones públicas, el protocolo, la publicidad, la actividad editorial o la organización de eventos, un gran número de estrategias de comunicación dirigidas a presentar a la institución militar ante los ojos de la ciudadanía como una organización necesaria, funcional, eficaz y, sobre todo, al servicio de la sociedad española [22].

Sin embargo, la implementación, a todas luces efectiva, de dichas estrategias comunicativas por parte de los distintos órganos de comunicación de los que se ha dotado el Ministerio desde la embrionaria Oficina de Información, Difusión y Relaciones Públicas de la Defensa (OIDREP) [23], no nos permite hablar, en sentido estricto, de la existencia de una comunicación estratégica de la Defensa en España, ya que, si bien de acuerdo con Alcántara López [22], todas respondieron a "una única voz y un único discurso", los del director o subdirector general, en función del rango ostentado por el departamento gestor de la comunicación ministerial en cada momento, tales acciones no formaron parte, como reconoce esta autora, de "un Plan de Comunicación escrito con carácter oficial" que determinara de forma sistemática y estructurada los objetivos que el Ministerio quería conseguir en un periodo de tiempo determinado y los programas y medios de acción precisos para alcanzarlos [24].

La comunicación estratégica de la Defensa se convierte, por lo tanto, en una realidad, al menos, en una realidad documentada en España, en octubre de 2012, cuando la Directiva de Política de Defensa acuerda la creación de una Oficina de Comunicación Estratégica para facilitar, en gran medida, la comprensión de la opinión pública nacional de las operaciones militares y su influencia en la evolución de la situación estratégica mundial; y, sobre todo, en marzo de 2013, con la promulgación de la Directiva de Comunicación Estratégica de la Defensa, que imprime el verdadero salto cualitativo hacia un concepto más integral de la comunicación de la Defensa en España, al involucrar en ella a todos los miembros de la institución y abrir definitivamente el abanico de los públicos de interés a otras audiencias distintas a la doméstica.

En efecto, esta novedosa directiva entiende, en sintonía con la literatura especializada, que "la comunicación estratégica es el empleo coordinado y apropiado de todas las capacidades de la comunicación de la Defensa en apoyo de sus Políticas, Operaciones y Actividades, con el fin de contribuir a la consecución de los objetivos de la Defensa Nacional", e insta a "un cambio en la organización para que todos sus integrantes sean conscientes de su vinculación con la comunicación estratégica […], [ya que] cada noticia, cada imagen, cada acción transmite un mensaje y forma parte voluntaria o involuntariamente de la comunicación estratégica, [por lo que] todos los miembros de las FAS son potenciales comunicadores, tanto por sus acciones como por sus omisiones" [25]. Dentro de esta concepción estratégica o integral de la comunicación de la Defensa es donde tiene cabida la nueva figura del «soldado narrativo» que se explica a continuación, cuya función comunicativa puede resultar tan imprescindible para el éxito de la misión como la que hasta ahora venían desempeñando las autoridades políticas, los altos mandos militares o los Oficiales de Información Pública.

5. Lo estratégico de comunicar: del «soldado-periodista» al «soldado narrativo»

Hasta los años noventa del siglo XX, la información, canalizada e interpretada a través de los medios de comunicación constituía, en los enfrentamientos armados, el recurso por excelencia "para lograr erosionar la moral de combate del enemigo, concienciar a la propia población sobre la necesidad de soportar el esfuerzo bélico, o simplemente tratar de asentar sobre la ciudadanía un relato que legitimase la propia posición y contribuyese al logro de los objetivos planteados" [26]. Sin embargo, la irrupción generalizada en las dos últimas décadas de internet y la telefonía móvil con funciones

fotográficas y videográficas ha propiciado que, sin subestimar la importancia que aún mantienen en la conformación de la opinión pública, aquellos hayan dejado de ser las únicas "puertas de entrada" de las sociedades a la información sobre las guerras.

El nuevo entorno tecnológico, aparte de favorecer la iniciativa informativa de los contendientes asimétricos, ha provocado también un «tsunami informativo» dentro de los propios ejércitos occidentales, ya que, al margen de la labor comunicativa desempeñada por los Oficiales de Información Pública (PIO) o de Asuntos Públicos (PAO), los soldados, por motivos bastante heterogéneos, han comenzado a hacer un uso intensivo de los nuevos instrumentos de la sociedad de la información y "se han convertido en una fuente prácticamente inagotable de materiales gráficos e información […] sobre sus lugares de destino en instalaciones militares, centros de detención, posiciones avanzadas y cualquier otro lugar cuyo acceso estaba generalmente vetado a la acción de los medios de comunicación" [26].

El uso incontrolado y muchas veces irresponsable de las nuevas tecnologías por parte de estos «soldados-periodistas», como se les ha denominado por compaginar el combate con una función informativa no autorizada, ha puesto en peligro en varias ocasiones la seguridad de las misiones y la de las propias tropas, lo que ha llevado a algunos mandos a plantearse incluso ejercer un férreo control de los dispositivos de todos sus efectivos. Aparte de que esta solución resulta del todo utópica, es inconcebible pensar que, en los conflictos armados del siglo XXI, la gestión de la información se circunscriba únicamente a las élites políticas y militares, ya que, dado que aquellos tienen lugar en medio de la gente, y el apoyo y la protección de la población se han convertido en objeto del planeamiento militar [27], la participación de los soldados en la comunicación estratégica de las operaciones se ha tornado imprescindible.

El modo que el ya citado foro internacional *Multinational Capability Development Campaign* (MCDC) ha ideado para canalizar dicha participación ha sido el alumbramiento de la figura del «soldado narrativo» [28], un nuevo rol asignado a algunos soldados que persigue, a través de la atribución de una responsabilidad comunicativa que hasta ahora no se delegaba a este nivel, tratar de contrarrestar, de alguna manera, la ventaja en la generación de percepciones entre la población local que los actores asimétricos les llevan a los ejércitos occidentales debido a su mayor conocimiento del entorno cultural o *cultural awareness* [4].

La primera función del «soldado narrativo» es, por lo tanto, conseguir crear en la población autóctona una percepción favorable al desarrollo de la misión en la zona de operaciones. Los mensajes básicos que se quieren hacer llegar a los civiles se deciden, según el desarrollo de este concepto, a alto nivel, y constituyen la información estratégica que desciende poco a poco por la cadena de mando operativa hasta llegar al nivel táctico, en el que este soldado ha de gestionarla de la forma más adecuada. La asignación específica de este papel a algunos soldados trata de evitar que, como sucedió en Afganistán, existan lagunas informativas en la población respecto a las intenciones y el compromiso de las fuerzas internacionales, ya que, como argumenta el MCDC, decir que la responsabilidad comunicativa es de todos es lo mismo que afirmar que no es de nadie, y habitualmente, en el nivel táctico, que es el que

tiene verdadero acceso a este público de interés, los jefes suelen priorizar las actividades de combate frente a las propiamente comunicativas.

Por otra parte, dado que, como en el resto de las organizaciones, para la toma de determinadas decisiones estratégicas no se puede obviar la información procedente del entorno, el «soldado narrativo», poniendo en práctica el modelo bidireccional de comunicación corporativa, tiene una segunda función: recabar sobre el terreno información útil y transmitirla convenientemente al mando para que este sea consciente en todo momento de las necesidades y expectativas de la población civil, e incluso pueda reorientar, llegado el caso, su estrategia en función del cambio que en sus percepciones puedan originar las contranarrativas insurgentes.

La adopción de esta nueva figura por parte de los países y las organizaciones internacionales lleva, en consecuencia, más lejos el requerimiento que muchos autores vienen haciendo desde hace tiempo respecto a la necesaria formación de los militares en materia de comunicación. Si Santos Rodríguez [29] afirmaba hace un lustro que "la comunicación estratégica debe ser un área de adiestramiento específica, especialmente en cursos de Estado Mayor, escuelas de Guerra y Academias, con el fin de que los futuros oficiales puedan asumir con garantías el liderazgo en la gestión de una campaña de comunicación", ahora hay que añadir que la enseñanza de técnicas de comunicación ha de hacerse extensiva también a los soldados, puesto que con la concepción del «soldado narrativo», esta comunicación adquiere, hasta en el nivel táctico más bajo, una dimensión estratégica que sirve a la conquista de los objetivos militares.

6. Conclusiones

El concepto de «soldado narrativo» supone un paso adelante en el camino hacia la consecución de una comunicación estratégica integral de la Defensa. La involucración del soldado en los planes de comunicación de las operaciones, el constante y transparente flujo de información entre los niveles tácticos más bajos y los más altos de la cadena de mando y la bidireccionalidad de las relaciones informativas con la población local que supone dicha figura constituyen algunos de los aspectos más positivos para adoptarla en un futuro más o menos próximo en las operaciones militares. Además, tanto este como el resto de los conceptos desarrollados por el MCDC dentro del área "Comunicación estratégica en la operaciones en coalición. Actividades de información y prácticas emergentes en comunicación" ponen de manifiesto una vez más el convencimiento de los países aliados de que la estrategia militar ya no es suficiente para lograr la victoria en los conflictos contemporáneos. Por fin, lo estratégico es comunicar.

Referencias

1. Pérez González, R. A. *Estrategias de comunicación*. Ariel: Barcelona, España, 2001.

2. Torres Soriano, M.; García Marín, J. Conflictos bélicos y gestión de la información: una revisión tras la guerra de Irak y Afganistán, *CONfines*, 2009, 5/10, agosto-diciembre, pp. 11-23.

3. Palabras pronunciadas por el general Smith durante la presentación de su libro *The Utility of Force* en el *think tank* Carnegie Council for Ethics in International Affairs de Nueva York el 24 de enero de 2007.

4. Arteaga, F. Terrorismo, contrainsurgencia y opinión pública. En *Terrorismo sin fronteras. Actores, escenarios y respuestas en un mundo global*; J. Jordán, P. Pozo y M. G. Guindo, Coords.; Aranzadi Thomson Reuters: Navarra, España, 2010, pp. 213-231.

5. Este foro internacional de desarrollo de conceptos y experimentación (CD&E) supone la continuación del proyecto *Multinational Experiment* (MNE) iniciado por el Comando de Fuerzas Conjuntas de Estados Unidos en 2001. Su objetivo es el diseño y la implementación de nuevas capacidades para mejorar la eficacia de la fuerza en las operaciones en coalición. https://wss.apan.org/s/MCDCpub/default.aspx.

6. Farré Basurte, J. Lo importante es el concepto. *Revista Española de Defensa*, 2015, mayo, p. 37.

7. Rafael A. Pérez explora, por ejemplo, las trayectorias, concepciones y conexiones entre las nociones de estrategia y comunicación en su trabajo "El estado del arte en la Comunicación Estratégica", Mediaciones Sociales. Revista de Ciencias Sociales y de la Comunicación, 2012, 10, pp. 121-196. DOI: http://dx.doi.org/10.5209/rev_MESO.2012.n10.39684.

8. Sánchez Benítez, S. La comunicación estratégica como política pública. Documento de Opinión. *Instituto Español de Estudios Estratégicos*, 21/2011, marzo, pp. 1-13.

9. Piñera, A. La comunicación corporativa en tiempos de crisis: gestión de la confianza. En *Prospectivas y tendencias para la comunicación en el siglo XXI*; M. I. de Salas y E. Mira, Coords.; CEU Ediciones: Madrid, España, 2013, pp. 495-511.

10. Cutlip, S.; Center, A. y Broom, G. *Effective Public Relations*. 6ª edición; Prentice Hall, Englewood Cliffs: Nueva Jersey, Estados Unidos, 1986.

11. Dolphin, R.R. The corporate communication function: how well is it funded? *Corporate Communications: An International Journal*, 2003, 8 (1), pp. 5-10.

12. Cornelissen, J. *Corporate Communication. A Guide of Theory and Practice*, 2ª edición; Los Ángeles: Sage, 2008.

13. Baños Bajo, P. Comunicación estratégica. La clave de la victoria en el siglo XXI. En *Medios de comunicación y operaciones militares*; Ministerio de Defensa, Dirección General de Relaciones Institucionales: Madrid, España, 2011, pp. 117-131.

14. Villamía Ugarte, J. C. La comunicación de la Defensa en la era de las misiones de paz. En *Medios de comunicación y operaciones militares*; Ministerio de Defensa, Dirección General de Relaciones Institucionales: Madrid, España, 2011, pp. 19-30.

15. La doctrina OTAN define las Operaciones de Información en el AJP-310 Allied Joint Doctrine for Information Operations de noviembre de 2009 como "una función de mando que analiza, planea, valora e integra las actividades de información para crear los efectos deseados sobre la voluntad, el entendimiento y la capacidad de los adversarios, potenciales enemigos y las audiencias aprobadas por el Consejo del Atlántico Norte en apoyo de los objetivos de la Alianza". Este documento está siendo revisado para incluir este tipo de operaciones como una más de las funciones de combate bajo la denominación de *Information Activities*. Cfr. Vara Pérez, R. P. Las actividades de información como nueva función de combate. *Revista Ejército*, 2014, 882, octubre, pp. 52-59.

16. Las Operaciones Psicológicas o PSYOPS son aquellas "planeadas usando técnicas de comunicación y otros medios y dirigidas a audiencias autorizadas con el fin de influir sobre percepciones, actitudes y comportamientos que a su vez influyen en la consecución de objetivos políticos y militares". Estas audiencias autorizadas o "audiencias blanco" no pueden ser, en ningún caso, las propias naciones aliadas, sino que únicamente pueden estar constituidas, aparte de por los líderes enemigos, por personal militar y población civil de naciones neutrales u hostiles, e incluso por militares y población civil de naciones amigas. Cfr. MC-402 NATO Military Policy on Psychological Operations, 17 de abril de 2003.

17. Ruiz González, A. Información Pública y propaganda. *Revista Ejército*, 2008, 803, marzo, pp. 66-72.

18. Cfr. NATO Strategic Communications Policy, MCM-0164-2009, 29 de septiembre de 2009.

19. Este concepto ha sido adoptado recientemente por la OTAN para sustituir al de *Public Information* (Información Pública), una función tradicionalmente centrada en la difusión de información oportuna y veraz a los medios de comunicación para que, a su vez, estos la hagan llegar a la sociedad procurando así su comprensión y apoyo a las misiones. En este caso, la función de IP se ve superada por la de *Public Affairs* al concebirse esta última como la "responsable de promover las metas militares y los objetivos de la OTAN entre las distintas audiencias con el fin de mejorar el conocimiento y la comprensión de los aspectos militares de la Alianza […] a través de las comunicaciones internas y externas, y las relaciones con la comunidad". Cfr. NATO Military Public Affairs Policy, MC 0457/2, febrero de 2011.

20. Hernández García, L. Choque de retóricas. La dimensión discursiva de los conflictos. *Revista Ejército*, 2010, 837 (número extraordinario), diciembre, pp. 85-95.

21. Directiva de Defensa Nacional 1/2012, de 31 de julio.

22. Rocío Alcántara López realiza un estudio detallado de dichas estrategias desde 1977 hasta 2007 en su tesis "Estrategias de comunicación del Ministerio de Defensa 1977-2007", Universidad de Sevilla, 2012. http://www.portalcultura.mde.es/Galerías/actividades/fichero/2013_TESIS_01_A_03.pdf.

23. García Hernández, L. *Militares y periodistas*. Fragua: Madrid, España, 1996.

24. La existencia de una verdadera comunicación estratégica provee a las organizaciones en el nivel operativo "de un 'paraguas conceptual' […], de unos objetivos determinados, de unos principios rectores que coordinan la puesta en marcha de una gran diversidad de acciones [estrategias de comunicación] cuya realización nos permita llegar a las metas deseadas". Cfr. Lorenzo Salvador, M. de. *Comunicación Estratégica vs. Estrategia de la Comunicación. Las dos caras de la misma moneda*. Trabajo de Fin de Grado en Publicidad y Relaciones Públicas, Universidad Rey Juan Carlos, curso 2013-2014.

25. Directiva de Comunicación Estratégica de la Defensa, marzo de 2013.

26. Torres Soriano, M. Guerras YouTube. El impacto de las nuevas tecnologías de la información en el tratamiento mediático de los conflictos armados. En *Cuadernos de Estrategia 148 "Conflictos, opinión pública y medios de comunicación. Análisis de una compleja interacción"*; Ministerio de Defensa: Madrid, España, 2011, pp. 131-157.

27. Coons, K.C.; Harned, G. M. Irregular Warfare is Warfare. *Joint Forces Quarterly*, 2009, 4, vol. 52, p. 97.

28. Cfr. Multinational Capability Development Campaign. Concept for Implementing Communication Guidance. Focus Area Strategic Communication in Combined Operational Access-Information Activities and Emerging Communication Practices, 2013-2014, pp. 7-8 y 12-18.

29. Santos Rodríguez, F. La comunicación estratégica (STRATCOM) en los conflictos modernos. El caso de Afganistán. *Revista del Instituto de Estudios Estratégicos*, 2013, 2, pp. 1-40.

Sesión III-F

Sociedad, Economía y Humanidades

Escritoras en la Gran Guerra: Literatura bélica de primera.

Aliaga Lavrijsen, Jessica [1,]

[1] Centro Universitario de la Defensa Zaragoza. Email: jeskeal@unizar.es

Abstract: Con el reciente aniversario del comienzo de la Primera Guerra Mundial, el interés en los estudios de trauma por la literatura de este periodo ha aumentado considerablemente. Sin embargo, muchas veces, las mujeres, también testigos de la guerra, han sido consideradas testigos de segunda —sobre todo porque, por lo general, no estaban presentes en el combate más directo—; algo que ha provocado que sus obras hayan sido estudiadas en menor grado. En este paper se analiza cómo los estudios de trauma han cambiado esta perspectiva y han estimulado el estudio de obras de escritoras ignoradas hasta ahora. Veremos que obras como "An Indiscrete Journey", de Katherine Mansfield, pueden ofrecer una visión femenina muy interesante sobre la experiencia bélica, que no es ni mucho menos de segunda y que enriquece mucho el *corpus* general de la literatura anglosajona de la Primera Guerra Mundial.

Keywords: Estudios de trauma; literatura anglosajona; literatura bélica; Primera Guerra Mundial; escritoras; Katherine Mansfield.

Con el reciente aniversario del comienzo de la Primera Guerra Mundial, el interés en los estudios de trauma por la literatura de este periodo ha aumentado considerablemente, como atestigua el proyecto de investigación al que pertenezco "Trauma Rhetorics: Its Management and Healing in War Literature" (2014-07). En efecto, muchos son los novelistas y poetas anglosajones que combatieron en la Primera Guerra Mundial (se han contabilizado más de dos mil poetas que publicaron durante la guerra), y bastantes los que nos dejaron sus estremecedores testimonios acerca de la vida en las trincheras, desde Siegrfried Sassoon y Wilfred Owen hasta Ivor Gurney o Isaac Rosenberg. Esta abundancia de textos de la época ha llevado a algunos críticos a hablar de "guerra literaria" ("literary war", Korte 2007: viii). La alfabetización había aumentado mucho en las décadas previas a la guerra, y, según Paul Fussel, hubo una "literariedad sin precedentes en todos los rangos que lucharon la Gran Guerra" (Fussel, 1995: 155, *mi traducción*). Se escribieron obras sobre el combate en las trincheras, y también en casa, lejos del frente, se publicaban obras que elevaran la moral de los combatientes, así

como alguna que otra obra más crítica con la situación bélica. Al finalizar la guerra, surgieron también múltiples memorias y testimonios autobiográficos, como indica la explosión literaria de los años 20 y 30, así como excelentes textos de ficción ya clásicos, que ayudarían a la nación a superar el trauma de lo vivido y que la animaban a imaginar la reconstrucción de las vidas personales y también públicas (Korte, 2007: viii).

Sin embargo, muchas veces, las mujeres, también testigos de las consecuencias de la batalla, fueron consideradas testigos de segunda —sobre todo porque, por lo general, no estaban presentes en el combate más directo—; algo que ha provocado que sus obras hayan sido estudiadas en menor grado. Según Claire Buck, "la contribución de las mujeres a la literatura bélica fue, en su gran mayoría, invisible hasta los años 80" (Buck, 2005: 85-87, *m. t.*). Este desinterés se justificaba con el argumento de que, puesto que las mujeres no habían combatido en primera línea, no habían podido realizar un papel tan importante en la guerra como el que habían realizado mucho hombres. La situación de la mujer a principios del siglo XX aún era de absoluta discriminación,[1] a pesar de que estuviera ya bastante integrada en el mundo laboral.[2]

Además, se creía que su testimonio no podía ser tan fidedigno o real como el de los soldados que combatieron, puesto que no estuvieron en las trincheras. Y algunos autores, como por ejemplo el célebre Siegrfried Sassoon, contribuyeron a alimentar la idea de que para las mujeres era imposible imaginar las condiciones de la guerra, y que debían contentarse con escribir sobre la vida en casa, como civiles (Buck, 2005: 87). De hecho, las primeras antologías literarias que se publicaron y que recogen textos de la Gran Guerra no contienen mención alguna a ninguna mujer. Sin embargo, la realidad es que de entre los dos mil poetas que publicaron entre 1914 y 1918, una cuarta parte eran mujeres, y menos de una cuarta parte eran soldados en servicio activo (Buck, 2005: 87).

Sin embargo, los estudios de trauma nos han mostrado que un soldado traumatizado tampoco ha podido experimentar lo que realmente ocurrió, puesto que un evento traumático se define precisamente por no ser experimentado en el mismo momento, por exceder la comprensión humana. Hay una cierta distancia debido a la mera naturaleza traumática del evento. Según Cathy Caruth, "el término trauma se entiende como una herida provocada no en el cuerpo sino en la mente" (Caruth, 1996: 3, *m. t.*). "En su definición más general, el trauma describe una experiencia demasiado abrumadora de una serie de eventos súbitos o catastróficos en la que la respuesta al evento ocurre a menudo de manera retardada, y se muestra como apariciones incontroladas y repetitivas, además de

[1] Esta situación cambió gracias al conflicto, puesto que el hecho de que los hombres tuvieran que alistarse en el frente hizo que muchas mujeres ocuparan sus puestos en la industria, la administración y la gestión de la intendencia del país. Y después de la guerra, muchas mujeres, habiendo demostrado sus habilidades, no estaban dispuestas a volver a ser relegadas a un segundo plano en una sociedad e paz que habían ayudado a construir.

[2] En Gran Bretaña, por ejemplo, a principios del siglo XX el 70.8% de las mujeres solteras, entre 20 y 45 años, tenían un trabajo remunerado.

otros fenómenos intrusivos" (Caruth, 1996: 11, *m. t.*). La experiencia de estos síntomas puede acabar derivando en síndrome de estrés postraumático. Por todo ello, creo que no se puede hablar de una experiencia objetiva y de primera mano cuando se tratan eventos traumáticos como puede serlo una guerra de la magnitud de la Primera Guerra Mundial. Y lo subjetivo es crucial, sobre todo en la literatura.

La visión de muchas de estas mujeres escritoras, que observaron de modo directo el efecto de la guerra sobre los soldados y civiles, es muy relevante, como atestiguan las antologías que fueron saliendo con posterioridad.[3] También hubo mujeres que publicaron artículos en prensa y contribuyeron a dar su visión al gran publico, como pudieron ser Dorothy Parker, Lillian Hellman, Virginia Woold o Martha Gelhorn. Gracias a los estudios de género, que se han preocupado de rescatar del olvido aquellas figuras ignoradas por cuestiones ideológicas o culturales más que por la calidad de sus obras, y gracias también a los estudios de trauma, ahora sabemos que existe una fuerte narrativa femenina, presente en figuras como Vera Brittain, Margaret Sackville, Rose Macaulay, Anne Parry, Mary Bolden o May Wedderburn Cannan, que muestra el conflicto desde un punto de vista menos estudiado y que sin duda merece la pena analizar. Según Bell, Es decir, las mujeres son una parte fundamental de la tradición poética bélica de Gran Bretaña, como escritoras y como lectoras, y sus obras ofrecen una oportunidad para examinar cómo hacían que su particular visión femenina fuese un elemento central en los esfuerzos comunes de la guerra (Amy Bell, 2007: 415). Críticas como Kahn, Tylee, Gilbert y Gubar argumentan que la escritura realizada por mujeres nos aporta el necesario acceso a la específica experiencia femenina de la historia bélica y nos muestra la relación de las mujeres con el militarismo (Buck, 2005: 87-88).

Por tanto, la intención de esta ponencia es la de mostrar que no existe una jerarquía del trauma ni un testimonio "de segunda" cuando se trata de relatar las experiencias bélicas de una población; esto se hará a través del análisis de un relato escrito durante la Primera Guerra Mundial, y que resulta muy interesante analizar otras visiones sobre la guerra, además de la de los soldados en las trincheras.

He decidido centrarme en el análisis de un relato, puesto que este género parece ser especialmente idóneo para articular las experiencias vividas en el frente, con momentos de violencia, extrañeza, desorientación (Korte, 2007: x). Como expresó el poeta Edmund Blunden en 1930: "la mente de un soldado de servicio continuamente comenzaba un relato nuevo" (Blunden, 1930: ii, *m. t.*). La poesía lírica parecía no satisfacer a los escritores de esa generación, que había sido "golpeada por unos eventos imposibles de ser ignorados" (Bates, 1965: 203, *m. t*). El relato, sin embargo, les permitía explorar la narración y adecuarla a lo que querían expresar a través de ella. Esta afirmación me

[3] Entre las obras más relevantes que estudian el papel realizado por la mujer en la Primera Guerra Mundial encontramos: Susan Gubar y Sandra Gilbert, *No Man's Land* (1987), Nosheen Khan, *Women Poetry in the First Worl War* (1988), Sara Riddick, *Maternal Thinking: Howard a Poetics of Peace* (1989), Helen M. Cooper *et al. Arms and the Woman* (1989) y Claire Tylee, *The Great War and Women's Consciousness* (1990).

condujo a plantearme si el relato también podía ser un buen medio para expresar una visión femenina de la guerra.

Muchos de los relatos de la guerra "se apartan de la narración convencional, orientada al desarrollo del argumento, resisten los finales cerrados y redondos y tienden a utilizar formas como el boceto impresionista, el monólogo dramático o la escena de diálogo" (Korte, 2007: x, *m. t*). Podremos ver esta características generales presentes en el relato que nos concierne, "An Indiscrete Journey" ("Un viaje indiscreto") de Katherine Mansfield.

Katherine Mansfield (1988-1923) es, sin duda, una de las grandes escritoras de la literatura Británica modernista. Mansfield, nacida en Nueva Zelanda y criada en Londres, escribió decenas de relatos. Sin embargo, "An Indiscrete Journey", publicado por primera vez en 1920 en la revista literaria *Athenaeum*, es su único relato bélico, y está inspirado en un hecho real: su propia historia de amor con un cabo francés. Como relata Buck, el relato "está basado en su propio viaje indiscreto a la zona de combate para pasar un fin de semana con su amante Francis Carco" (Buck, 2005: 103, *m. t*). Por tanto, aunque el estilo de este relato es también modernista, sin una estructura prefijada y muchos cambios en la narración, difiere de la del resto de sus relatos.

El argumento cuenta la historia de una joven que realiza un viaje en tren y se encuentra con su amado, un cabo francés que está en la zona de combate. La relación con el "pequeño cabo", como lo llama cariñosamente, es muy sutil, y no se dan datos concretos acerca de la localización de la historia, a la que se refiere como X.Y.Z. (Mansfield, 2007: 78). Todo lo descrito en el relato es tremendamente discreto, a pesar de la indiscreción del asunto.

En cierto modo, la visión del narrador, una mujer joven, parece infantilizada, algo que sorprende menos si se atiende al título de la colección que dio cabida a la colección *Something Childish and Other Stories* (*Algo infantil y otras historias*). Me da la impresión de que ese tono casi naif y esa percepción infantil de la mujer han sido calculadas con precisión. La feminidad, sin duda, es también central en la representación que hace Mansfield de la guerra, y en este caso se trata de una joven mujer enamorada la que relata su historia. En ese contexto, al narrador le cuesta conciliar las ideas previas que pudiera tener sobre la guerra con la realidad que encuentra: "At all the bridges, the crossings, the stations, a petit soldat, all boots and a bayonet. Forlorn and desolate he looked, like a little comic picture waiting for the joke to be writen underneath. Is there really such a thing as war? Are all these Laughing voices really going to the war? […] Have battles been fought in places like these?".[4] A pesar de la duda del narrador, la realidad muestra que sí están en guerra, y que sus consecuencias son patentes a primera vista, aunque la particular perspectiva de la mujer parece teñir

[4] En todos los puentes, los cruces, las estaciones, un *petit soldat*, todo botas y una bayoneta. Triste y desolado se veía, como una pequeña imagen cómica a la espera de que le escriban una frase graciosa debajo. ¿Existe realmente tal cosa como la guerra? ¿Van todas estas voces que ríen realmente a la guerra? [...] ¿Se ha luchado batallas en lugares como estos? (*m. t*).

aquello que ve: "What beautiful cemeteries we are passing! They flash gay in the sun. They seem to be full of cornflowers and poppies and daisies. How can there be so many flowers at this time of the year?" (79).[5] Sin embargo, eso no significa que la narradora no sea consciente de la guerra, pero parece que ha decidido intentar ignorar los aspectos negativos de ésta, que sin embargo afloran sutilmente entre su alegría. Como narra a continuación: "But they are not flowers at all. They are bunches of ribbons tied on to the soldiers' graves" (79).[6]

Sin embargo, la aparente festividad y normalidad en su mirada esconde también una cierta extrañeza, puesto que no está acostumbrada a frecuentar ese ambiente tan masculino: The soldiers' "short swords and belts are piled upon chairs. Heavens! What a noise. The sunny air seemed all broken up and trembling with" (80).[7] Y si prestamos atención al tono de la descripción, veremos que su aparente ánimo y alegre despreocupación parecen ocultar una cierta tristeza o incluso miedo: "A shout from the card-players made him turn sharply, and crash! Over went the bottle, spilling on the table, the floor – smash! To tinkling atoms. An amazed silence. Through it the drip-drip of the wine from the table on to the floor. It looked very strange dropping so slowly, as though the table were crying" (87).[8]

Quizá, su temor se deba a la naturaleza de su aventurero viaje, al temor de ser descubierta y censurada por su conducta. Cuando están a punto de ser descubiertos bebiendo en un bar a partir de las 20h, algo que los soldados tenían prohibido a partir de esa hora de la noche, el miedo parece aflorar en ella:

'You are cold,' whispered the little corporal. 'You are cold, *ma fille*.'

'No, really not'

'But you are trembling,'

'Yes, but I'm not cold.' (90)[9]

Pudiera ser que ella tuviera miedo a perder a su amado, o quizá tiemble a causa del nerviosismo o la emoción, y, sin embargo, el final de la historia, en el que ambos brindan y terminan sus vasos de whisky, parece indicar que lo único que mueve a la protagonista en esta historia son sus ganas de vivir, con alegría, y sin restricciones de ningún tipo. Da la sensación de que, para ella, los ojos y la risa de su soldado lo son todo: "The blue-eyed soldier's happy voice trickled through the

[5] ¡Qué hermosos cementerios estamos pasando! Brillan alegres al sol. Parecen estar llenos de acianos y amapolas y margaritas. ¿Cómo puede haber tantas flores en esta época del año? " (*m. t*).
[6] "Pero no son las flores en absoluto. Son racimos de cintas atadas a las tumbas de los soldados" (*m. t*).
[7] Apilaban las espadas cortas y los cintos de los soldados sobre las sillas. ¡Cielos! ¡Qué ruido!. El soleado aire parecía todo roto y temblando por ello.
[8] Un grito de los jugadores de cartas le hizo volverse bruscamente, y ¡crash! Se volcó la botella, derramada sobre la mesa, al suelo - ¡smash! deshecha en tintineantes átomos. Un silencio de asombro. A través de éste, el goteo del vino de la mesa al suelo. Parecía muy extraño que cayera tan lentamente, como si la mesa estuviera llorando (*m. t*).
[9] "Tienes frío," susurró el pequeño cabo, "Tienes frío, *ma fille*."
"No, en realidad no"
"Pero estás temblando,"
"Sí, pero no tengo frío" (*m. t*).

dark" (92).[10] Y, sin embargo, esa felicidad parece ser ambivalente también, como muchas de las sensaciones y percepciones de la protagonista del relato, puesto que el goteo de la voz ha aparecido antes en la historia como un llanto soterrado, en la extraña imagen de la botella de vino derramada: "It looked very strange dropping so slowly, as though the table were crying".

En este increíble relato, Katherine Mansfield es capaz de dejar traslucir cierta tristeza, cierto miedo y cierta preocupación en un situación alegre y casi cotidiana, como puede ser el amor, en un contexto bélico. En ese sentido, su femenina visión nos revela una realidad quizá oculta en muchas obras masculinas. La sutilidad de su narración deja entrever que las emociones sentidas en al zona de combate pueden ser sutiles y múltiples, comunes, en el sentido de que hay tanto tristeza como alegría en ellas. Y también amor. Por ello, considero que su relato, a pesar de no haber sido escrito en primera línea de combate, es una obra de tema bélico de primera. Además, este relato abriría la veda para que otras mujeres se sintieran cómodas escribiendo sobre conflictos armados, sin tener que firmar con pseudónimos masculinos[11]

Referencias

1. Acton, Carol. "Diverting the Gaze: The Unseen Text in Women's War Writing". *College Literature*, vol. 31, 2 (spring 2004), pp. 53-79.
2. Bates, H. E. 1965 (1941). *The Modern Short Story: A Critical Survey*. Boston: The Writer.
3. Blunden, Edmund (ed).1930. *Great Short Stories of the War: England, France, Germany, America*. Londres: Eyre and Spottiswoode.
4. Buck. Claire. "British Women's Writing of the Great War". En Sherry, Vincent (ed.) 2005. *The Cambridge Compagnion to the Literature of the First World War*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 85-112.
5. Caruth, Cathy. 1996. *Unclaimed Experience: Trauma, Narrative and History*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
6. Cooper, Helen M. *et al.* 1989. *Arms and the Wo*man: *War, Gender and Literary Representation*. Chapel Hill: University of North Carolina Press.
7. Fussel, Paul. 1975. *The Great War and Modern Memory*. Oxford: Oxford University Press.
8. Gubar, Susan y Sandra Gilbert. 1987. *No Man's Land. The Place of the Woman Writer in the Twentieth Century*. New Haven: Yale University Press.

[10] "La alegre voz del soldado de ojos azules goteaba en la oscuridad" (*m. t*).
[11] Como Cecilia Böhl de Faber, que firmaba como Fernán Caballero, o Matilde Cherner, con el pseudónimo Rafael de Luna.

9. Khan, Nosheen. *1988. Women Poetry in the First World War*. Kentucky: University Press of Kentucky.
10. Korte, Bárbara (ed). 2007. "Introduction". In *The Penguin Book of First World War Stories*. Pp. v-xviii. Londres: Penguin.
11. Mansfield, Katherine. 1924. "An Indiscreet Journey". En *Something Childish and Other Stories.* Londres: Constable.
12. _____. 2005. "An Indiscreet Journey". En *The Penguin Book of First World War Stories*. Londres: Penguin.
13. Riddick, Sara. 1989. *Maternal Thinking: Howard a Poetics of Peace*. Boston: Beacon Press.
14. Tylee, Claire. 1990. *The Great War and Women's Consciousness*. *Images of Militarism and Womanhood in Women's Writings, 1914-1964*. Basingstoke: Macmillan.

La primera guerra mundial como conflicto intergeneracional en la literatura de Pat Barker

Yebra Pertusa, José María

Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza. Email: jyebra@unizar.es

Autor Principal y responsable del trabajo: José María Yebra Pertusa

E-Mail: jyebra@unizar.es

Abstract: Al cumplirse un siglo del comienzo de la Primera Guerra Mundial se suceden los eventos conmemorativos. Sin embargo, ya en décadas anteriores ha habido textos y otras manifestaciones artísticas relacionadas con este acontecimiento. Esta contribución se centra en la primera parte de la trilogía *Regeneration* publicada por Pat Barker entre 1991 y 1995. La novela, del mismo título que la trilogía, sirve como excusa para revisar el conflicto mundial como un evento traumático e iniciático desde un punto de vista político, social y cultural. Mi argumento fundamental es que el texto literario es testigo privilegiado de unos hechos ya sólo accesibles de forma vicaria, a través de testimonios, de la memoria y del discurso histórico. Así, partiendo de la teoría del trauma, defiendo que la novela regresa y deconstruye la guerra como algo más que un conflicto bélico. Es también un conflicto intergeneracional que tiende puentes al pasado, estableciendo un diálogo con el mismo, al tiempo que nos ayuda a definir nuestra propia historicidad.

Keywords: Primera Guerra Mundial, memoria, trauma, literatura.

1. Introducción

Con el centenario del comienzo de la Primera Guerra Mundial, los diferentes gobiernos occidentales han llevado a cabo numerosos actos de conmemoración del conflicto. Es un hecho que la Gran Guerra constituye un momento clave puesto que supone el nacimiento del mundo actual y de nuestro concepto de historicidad. Este artículo aborda la memorialización del evento como hecho traumático desde el punto de vista de la literatura, y más en concreto, desde la trilogía *Regeneration* de Pat Barker. Este estudio hace así referencia a dos de los conceptos en torno a los que giran los estudios literarios; a saber, los estudios de memoria y los estudios de trauma. Durante la Gran Guerra la escena literaria británica fue prolífica, particularmente en lo que respecta a la producción poética. En las décadas posteriores, la producción tanto de literatura como de memorias también fue abundante. Sin embargo, la literatura postmoderna de relevancia sobre el episodio histórico es más escasa. *War Horse* (1982), de Michael Morpurgo, y las novelas de Donald Jack sobre el aviador canadiense Bart Bandy (1974-75) ofrecen una visión heróica. Sin embargo, teniendo en cuenta su calidad literaria, y especialmente porque recoge aspectos significativos para la cultura del cambio de milenio, *Regeneration* constituye un instrumento útil para analizar por qué el pasado es relevante y qué dice de nosotros como lectores. Por estos motivos, esta presentación se centra en la obra de Barker.

Barker publicó su trilogía entre 1991 y 1995. En ella, la autora revisa la guerra desde muchos ángulos y personajes diferentes. Pero lo hace fundamentalmente desde el punto de vista del encuentro del poeta Siegfried Sassoon y de su famoso psicoanalista, R. H. Rivers, que trató sus traumas de guerra. El *tour de force* entre ambos personajes se convierte así en un marco privilegiado desde el que la autora penetra en el conflicto bélico más allá de las trincheras. El hecho de que una buena parte de los personajes estén basados en figuras históricas es significativo y no solo da realismo a la novela; también imbrica el discurso literario con el discurso histórico y de memoria. Sin embargo, en última instancia, se trata de un texto literario y, como tal, alcanza donde la historia no puede hacerlo. Esa es la misión de la literatura y de la crítica literaria, y la trilogía de Barker no es una excepción.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

Es destacable que Pat Barker centre el interés de su trilogía (y de la primera parte en particular) en el conflicto personal y psicológico de sus protagonistas que, por otra parte, hace transferible a una generación que vivió una guerra que asoló y redefinió Europa. En este sentido, el artículo se acerca a Sassoon y Rivers no solo a través de Sigmund Freud que, por aquel entonces, estaba desarrollando su teoría psicoanalítica. De hecho, siendo el psicoanálisis mismo un "superviviente" de la Gran Guerra (Jay Lifton, 1979, 1995; en Caruth 2013: 81), su consecuencia, la "teoría del trauma", resulta válida para revisitar el conflicto y explorar cómo se memorializa. Así, la novela se analiza desde este marco

teórico que un grupo de críticos literarios post-Freudianos como Cathy Caruth, Anne Whitehead, Dominick LaCapra y Roger Luckhurst ha desarrollado en la Universidad de Yale desde mediados de la década de 1990.

Este ensayo se centrará en la primera de las novelas que constituyen la trilogía. El análisis de la totalidad implicaría analizar muchos aspectos que, por razón de tiempo/espacio, no es factible. El análisis nos llevará fundamentalmente a una revisión de la representación de la guerra no como un conflicto bélico glorioso en el sentido tradicional, sino también como un proceso más íntimo, incluso de carácter edípico, un conflicto intergeneracional. Sassoon se convierte en el portavoz de una generación que da voz a una visión del continente y del conflicto que lo asola y que establece un diálogo complejo con la generación a la que pertenece Rivers. La literatura se convierte de esta forma en un puente dialógico que supera el discurso de vencedores y vencidos. En la novela, Sassoon ayuda a Owen, por entonces un joven poeta, con un poema sobre la guerra, sustituyendo "Only the monstrous/solemn anger of our guns" por "Only the monstrous/solemn anger of the guns" (Barker, 1991: 126); el artículo "the" incluye a todos los soldados, no solo a los británicos, como lo hace el posesivo "our". Por tanto, el conflicto se percibe como hecho textual, además de histórico. Y, con textos como el de Barker, somos nosotros, como lectores, los que nos acercamos y decidimos cómo negociamos nuestra historicidad y nuestra relación con el pasado.

Cathy Caruth en *Trauma: Explorations in Memory* (1995) y *Unclaimed Experience: Trauma, Narrative, and History* (1996) estableció los puntos básicos de la teoría del trauma. De forma breve, y a riesgo de simplificar conceptos, Caruth plantea que el hecho traumático escapa a la conciencia del que lo vive. Y es por eso que solo tras un período de latencia, y como consecuencia de un estímulo posterior, dicho hecho se re-vive, y de alguna forma, se re-presenta: "The returning traumatic dream startles Freud because it cannot be understood in terms of any wish or unconscious meaning, but is, purely and inexplicably, the literal return of the event against the will of the one it inhabits. […] Its very overwhelming immediacy […] produces its belated uncertainty"[1] (Caruth 1995: 4-5). Para representar lo que a priori es irrepresentable, el discurso literario resulta particularmente efectivo. Por tanto, este paper defiende que la novela de Barker es capaz de representar lo irrepresentable a través de un discurso traumático. En este sentido, el conflicto intergeneracional y las metáforas ayudan a representarlo.

[1] "La vuelta del sueño traumático sorprende a Freud porque no se puede entender en términos de cualquier deseo o significado inconsciente, pero constituye, pura e inexplicablemente, la vuelta literal del evento en contra del deseo del que lo habita. … Su inmediatez que embarga … produce una incertidumbre tras un período de latencia (traducción propia).

3. Resultados y Discusión

Más que en las trincheras, la acción de *Regeneration* se desarrolla en Inglaterra. Rivers y Sassoon se encuentran en el hospital Craiglockhart, donde el poeta es enviado tras publicar un manifiesto contra la gestión de la guerra por parte del gobierno. En su opinión, la guerra se ha convertido en un acto de agresión, y conquista, perverso e injusto por el que muchos hombres se han visto sacrificados" (1991: 5)

De acuerdo con su amigo Graves, Sassoon alega sufrir un episodio de "shell-shock disorder". Es así como se conocía en la Primera Guerra Mundial al "síndrome de stress post-traumático", término este último que empezó a emplearse a raíz de las secuelas presentadas por los veteranos de la guerra de Vietnam. Se entendía, a principios del siglo XX, que el shock era físico; de ahí la terminología utilizada. Sin embargo, a finales del siglo XX, el trauma ha dejado de ser una dolencia eminentemente física para convertirse en un "problema" psicológico. Lo que resulta interesante es cómo Barker intenta aunar a través de sus personajes cómo se entendían estas patologías durante la Gran Guerra y cómo nos acercamos a ellas desde el punto de vista de la psico-sociología actual.

La mayoría de los personajes que Rivers tiene que tratar en Craiglockhart reproducen los síntomas clásicos característicos del síndrome de stress post-traumático: pesadillas, alucinaciones, flashbacks, incapacidad para hablar, entre otros. De esta forma, los veteranos exteriorizan los episodios traumáticos que experimentaron durante la guerra; bien porque fueron testigos de la muerte de compañeros o estuvieron expuestos a cadáveres de compatriotas o enemigos en las trincheras. Este es el caso de Burns, otro de los pacientes de Craiglockhart:

> He'd been thrown into the air by the explosion of a Shell and had landed, head-first, on a German corpse, whose gas-filled belly had ruptured on impact. Before Burns lost consciousness, he'd had time to realize that what filled his nose and mouth was decomposing human flesh. Now, whenever he tried to eat, that taste of smell recurred. Nightly, he relived the experience, and from every nightmare he awoke vomiting. (1991: 19)[2]

De la misma forma, Anderson sufre "shell-shock", lo que le impide enfrentarse a la sangre tras sus experiencias en el frente: "Anderson had revealed that extreme horror of blood … . If [he] could see no

[2] "Salió disparado por la explosión de una bomba y había caído de cabeza sobre un cadáver alemán cuyas tripas se habían abierto a causa del impacto. Antes de que Burns perdiera la conciencia, había tenido tiempo de darse tiempo de que lo que llenaba su nariz y su boca era carne humana en descomposición. Ahora, cada vez que intentaba comer, ese sabor de olor se repetía. Por la noche, revivía la experiencia, y de cada pesadilla se despertaba vomitando" (traducción propia).

way out of returning to the practice of a profession which must inevitably, even in civilian life, recall the horrors he'd witnessed in France, then perhaps he was desperate enough to have considered suicide?" (1991: 30).[3] La dureza de los eventos que resultan innombrables encuentran en el texto literario una fórmula vicaria e indirecta de representabilidad. Sassoon, que no es víctima de este tipo de trauma, sino de un desacuerdo con la política del gobierno británico en su gestión de la guerra contra Alemania, se convierte así en un espectador (más que en el actor) del hecho traumático. A través del personaje, el lector es a su vez un espectador indirecto, doblemente desplazado y también implicado en los traumas que viven los enfermos de Craiglockhart. El propio Rivers sufre una tartamudez, un síntoma de un trauma que, paradójicamente, su paciente Sassoon le ayuda a comprender. El concepto "empathic unsettlement", acuñado por Dominick LaCapra, plantea que los espectadores del hecho traumático (en este caso los lectores) deben evitar la sobre-identificación con las víctimas que ayuda a gestionar la posición del espectador del trauma: "It involves a kind of virtual experience through which one puts oneself in the other's position while recognizing the difference of that position and hence not taking the other's place" (2001: 78).[4] Es decir, el texto nos dirige a un trauma histórico para entender, a través de la memoria, no tanto el conflicto en sí del que no debemos apropiarnos, sino nuestra postura con respecto al mismo y los traumas que nos afectan en la actualidad.

La clave del trauma del doctor que cura y es curado tiene su origen en su relación con su padre; más concretamente en un conflicto edípico aparentemente irresoluble. Muchos de sus pacientes sufren tartamudez y otras patologías como consecuencia de la guerra. Rivers sufre por su complejo vínculo paterno-filial (137-39). Sin embargo, el conflicto edípico trasciende el caso concreto de Rivers. *Regeneration* hace su caso extrapolable a la guerra, que se convierte en conflicto edípico a gran escala. La lucha entre generaciones de padres e hijos trasciende el discurso clásico del psicoanálisis Freudiano para alcanzar una dimensión política y ética; a saber, la responsabilidad que una generación le debe a otra por las decisiones tomadas y sus consecuencias. La metáfora del silencio y el habla, que se repite a lo largo de la trilogía, es así especialmente significativa: unos hablan e imponen silencio a otros, convirtiendo, de esta forma, al lenguaje en un instrumento de poder, de lucha intergeneracional y de representación del hecho traumático.

Desde el principio la relación de Rivers y sus pacientes tiene un componente paterno-filial. Esto se agudiza en el caso de su relación con Sassoon. El hecho de que éste fuera poeta es, a juicio del psicoanalista, especialmente desestabilizador. En otras palabras, el acto de escribir es un evento/acto

[3] "Anderson había manifestado su horror extremo frente a la sangre … Si él no podía concebir volver a la práctica de una profesión que, incluso en la vida civil, le recordaría los horrores de los que había sido testigo en Francia, quizás estaría entonces tan desesperado como para pensar en suicidarse?" (traducción propia).

[4] "Implica una experiencia virtual a través de la cual uno se pone en la posición del otro mientras reconoce la diferencia de esa posición y, por tanto, no adopta el lugar del otro" (traducción propia).

Freudiano con implicaciones políticas, éticas y estéticas en opinión de Rivers: "Writing the poems had obviously been therapeutic, but then Rivers suspected that writing the Declaration might have been therapeutic too. He thought that Sassoon's poetry and his protest sprang from a single source, and each could be linked to his recovery from that terrible period of nightmares and hallucinations" (1991: 25).[5] Así, como apunta Tim Kendall, la Gran Guerra tuvo para muchos ciudadanos británicos un significado político, ético y cultural. Era la defensa de una tradición que heredaban de la generación anterior (y así sucesivamente) lo que justificaba la lucha contra el enemigo (2014: xv). La duda de cómo se protege este principio de preservación cultural y patrimonial es lo que causa la ruptura traumática entre generaciones en el texto de Barker.

A pesar de lo apuntado anteriormente, la novela no constituye una ruptura con la cultura que ha dado lugar a lo que representan Sassoon o Rivers; más bien todo lo contrario. El poeta y la generación a la que encarna lucharon contra el enemigo e intentaron perpetuar la tradición literaria heredada. Pero, tanto el poeta como sus contemporáneos también sufrieron los efectos traumáticos propios de la Primera Guerra Mundial. La novela incide además en cómo la preservación del pasado no significa que no se pueda ser crítico con la gestión de los padres sobre el conflicto que protagonizan los hijos. En este sentido, la iconografía religiosa constituye la metáfora que da testimonio de lo que, de otra manera, es innombrable. El sacrificio que Abraham está a punto de llevar a cabo con su hijo se entremezcla con el complejo de Edipo Freudiano. En un momento de la novela, Rivers acude a un servicio religioso. Durante el mismo, examina dos escenas bíblicas en las vidrieras de la iglesia, la crucifixión de Cristo y el sacrificio del hijo de Abraham (1991: 133). Las implicaciones simbólicas de estas escenas en un escenario como una guerra mundial es evidente y, para el narrador de la novela, hace referencia al conflicto del sacrificio en masa: "Rivers thought … if you, who are young and strong, will obey me, who am old and weak, even to the extent to … sacrifice your life, then … you will inherit … the same obedience from your sons. … The inheritors were dying … while old men … gathered … and sang hymns" (133).[6]

Regeneration es particularmente crítica con la metodología clínica psiquiátrica que se aplicaba a las víctimas del "shell-shock". Con Rivers como focalizador, somos testigos de cómo un paciente, un soldado traumatizado que es incapaz de articular palabra, es sometido a sesiones de electro-shock por el doctor Yealland para recuperar el habla (1991: 203). Este episodio no es sino una última muestra de los errores en la gestión de un conflicto al menos desde nuestro punto de vista como lectores del

[5] "Escribir poemas había sido obviamente terapéutico, pero entonces Rivers sospechó que escribir la Declaración había sido también terapéutico. Él pensó que la poesía de Sassoon y si protesta surgía de una sola fuente, y cada una estaba relacionada con la recuperación de ese terrible período de pesadillas y alucinaciones" (traducción propia).

[6] "Rivers pensó … si tú, que eres joven y fuerte, me obedeces a mí, que soy viejo y débil, incluso hasta el punto de … sacrificar tu vida, entonces… tú heredarás … la misma obediencia de tus hijos. … Los herederos estaban muriendo … mientras los hombres viejos … se reunían … y cantaban himnos" (traducción propia).

cambio de siglo. El diálogo entre generaciones para poder enfrentarse a un conflicto bélico de grandes dimensiones parece fallar y sólo su re-articulación –a través del aprendizaje que nos ofrece el texto literario− puede apoyar a la superación de traumas actuales (más que del trauma histórico) por sustitución.

4. Conclusiones

La novela abre numerosos debates que están de actualidad, enriqueciendo el estado de la cuestión en los estudios literarios y los análisis de la trilogía en los 90. Esta nueva lectura se centra en cómo su discurso histórico postmoderno pone el énfasis en la interdiplinaridad, especialmente en la relación entre la literatura, los estudios de trauma y el uso y abuso de la memoria para acceder al pasado. La trilogía, y la primera parte en concreto, cuestiona al lector sobre los conflictos entre generaciones y su corresponsabilidad en cómo articular el presente para revisar los conflictos del pasado para escribir el futuro. El interés del texto de Barker por el hecho traumático responde a dos razones fundamentales. Por una parte, porque nos ayuda a acceder, aunque sea de forma vicaria, a los aspectos más inescrutables de la experiencia humana. Por otra, y como consecuencia de la anterior, el texto nos permite plantear un proceso de revisión y regeneración de eventos inconcebibles, innombrables y aparentemente incurables. La literatura alcanza donde otras disciplinas no pueden hacerlo. A través de ella se encuentran caminos de reconciliación, de interpretación y de testimonio; formas de diálogo entre la memoria y la historia que benefician a ambas.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer el apoyo del Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza en mi labor investigadora. Este ensayo, en concreto, se enmarca dentro del proyecto de investigación del centro "Rhetorics of trauma and healing in War Literature", con identificador 2014-07. Extiendo también mi agradecimiento por este artículo al proyecto financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España (MINECO) (código FFI2012-32719). El autor también agradece el apoyo del Gobierno de Aragón y el Fondo Social Europeo (ESF) (código H05).

Referencias

1. Barker, P. *Regeneration*. Viking-Penguin Group: London: 1991.
2. _____. *The Eye in the Door*. Viking-Penguin Group: London: 1993.
3. _____. *The Ghost Road*. Viking-Penguin Group: London: 1995.

4. Caruth, C. *Explorations in Memory*. Baltimore MD and London: John Hopkins University Press, 1995.
5. _____. *Unclaimed Experience: Trauma, Narrative, and History*. Baltimore: Johns Hopkins UP, 1996.
6. _____. *Literature in the Ashes of History*. 2013. Baltimore: Johns Hopkins UP, 2013.
7. Kendall, T. *Poetry of the First World War*, Oxford: Oxford UP, 2014.
8. LaCapra, D. *Writing History, Writing Trauma*, Johns Hopkins UP, 2001.
9. Lifton, R. J. Survivor Experience and the Traumatic syndrome. In ed. Lifton, R. J. *The Broken Connection: On Death and the Continuity of Life*, New York: Basic Books, 1979, pp. 163-178.
10. Whitehead, A. *Trauma Fiction*. Edimburgh: Edimburgh UP, 2004.

Cómo afecta a la memoria la exposición a altitudes extremas, sin aporte de oxígeno suplementario

Aceña Medina, Javier[1,*], Allueva Torres, Pedro[2], Ayora Hirsh, Alberto[3], Palop Asunción, Jorge[4], Ruíz López, Carlos[1].

[1] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, Ctra. de Huesca s/n, 50090, Zaragoza, España; E-Mail: jacename@unizar.es (J.), cruizl@unizar.es (C.)

[2] Universidad de Zaragoza. E-Mail: pallueva@unizar.es (P.)

[3] JAD OE/DIDOM. C/ San Bernardo, s/n, 22700 Jaca, España. E-Mail: hirsch@et.mde.es (A.**)**

[4] Escuela Militar de Montaña y Operaciones Especiales. C/ San Bernardo, s/n, 22700 Jaca, España. E-Mail: jpalasu@mde.es (J.)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: jacename@unizar.es (J.)

Abstract: La presente investigación se centra en determinar el efecto que tiene la exposición a una altitud extrema en el funcionamiento de la memoria de un grupo de montañeros en su ascensión a una de las montañas más altas del planeta, el Manaslu (8.165 m). Se considera altitud extrema aquella que se sitúa por encima de los 5.500 m. de altitud sobre el nivel del mar, donde los riesgos sobre el funcionamiento del organismo humano y, en particular, el rendimiento cognitivo son evidentes según indican los estudios de varios investigadores que se citan en esta comunicación. Los resultados, tras administrar una batería neuropsicológica (Luria-DNA) tanto al grupo experimental, como a un grupo de control que no participó en la expedición, antes y después de la misma, han mostrado deterioros significativos en la memoria inmediata de los expedicionarios, no encontrando daños, sin embargo, en el funcionamiento de la memoria lógica.

Keywords: altitud extrema, hipoxia, memoria inmediata, memoria lógica.

---

1. Introducción

El montañismo es una de las actividades deportivas de mayor auge y aceptación en nuestros días, y cuenta cada vez con mayor número de adeptos que lo practican de manera regular. El aumento incesante de expediciones es un claro ejemplo de ello, porque las montañas han sido siempre símbolo de atracción por lo que supone de desafío y superación. Conquistar las cumbres más altas supone un reto que pone a prueba nuestra fuerza, valor y capacidad de sufrimiento. Si bien es cierto que el ser humano ha encontrado en sus cimas el éxtasis y la autorrealización personal, también ha encontrado el dolor y la aflicción. Efectivamente, son bien conocidos los principales riesgos relacionados con la montaña como los traumatismos, problemas relacionados con la electricidad atmosférica, quemaduras cutáneas, golpes de calor, congelaciones, etc, pero hay un elemento trascendental que afecta muy directamente a nuestro organismo a medida que alcanzamos cotas más altas: la disminución de oxígeno corporal. Sin duda, de todos los factores ambientales el más específico relacionado con la altitud es la *hipoxia* o disminución de oxígeno en los tejidos corporales.

En 1878 Paul Bert, considerado como el padre de la fisiología de la altitud, publica en París su obra La Pression Barométrique, en la que expone los efectos indeseables de las grandes altitudes. Bert descubrió que la hipoxia es la responsable de los efectos nocivos agudos de la reducción de la presión parcial del oxígeno del aire sometido a la disminución de la presión barométrica [1]. A medida que ascendemos la presión atmosférica va disminuyendo gradualmente de forma exponencial. A nivel del mar ésta es de 1 atmósfera o 760 milímetros de mercurio, a 5.500 m. de altitud su valor desciende a la mitad, y hacia los 8.500 m. a la tercera parte [2]. A gran altitud, la sangre de los montañeros contiene menos oxígeno, pero ello no es debido, como mucha gente cree, a que la proporción de oxígeno sea menor a medida que ascendemos. La proporción de oxígeno en el aire se mantiene constante en aproximadamente un 21% hasta los límites de la troposfera terrestre (unos 15.000 metros de altitud), el 79% restante está constituido por nitrógeno y por pequeñas cantidades de otros gases (vapor de agua, anhídrido carbónico, gases nobles, etc). Lo que disminuye con la altitud, por tanto, no es la proporción de oxígeno sino la presión parcial de oxígeno del aire.

Los indudables efectos de la hipoxia afectan a todos los sistemas orgánicos, pero de manera más acusada al cerebro [3], ya que es, después del corazón, el órgano que consume más oxígeno por gramo de tejido, siendo por esta razón muy sensible a la hipoxia [4].

El objetivo principal de nuestra investigación es constatar, al hilo de otros estudios, si la exposición a altitudes extremas y sin aporte de oxígeno suplementario, influye negativamente en las habilidades del pensamiento de un grupo de montañeros, y en concreto, en la memoria. Se sabe que la hipoxia afecta de manera directa a las áreas asociadas al aprendizaje y la memoria [5].

Para comprobar estos objetivos, hemos contado en nuestra investigación con la colaboración del Grupo Militar de Alta Montaña (GMAM) y con la Escuela Militar de Montaña y Operaciones Especiales (EMMOE) en una de sus expediciones al Manaslu (8.156 m), la octava montaña más alta del planeta, situada en la cordillera del Himalaya.

En el mundo de la fisiología de montaña se considera "altitud extrema" aquella que se sitúa por encima de los 5.500 m., límite donde se ha constatado que es imposible la vida permanente por el notable deterioro fisiológico que se produce [4]. El riesgo potencial de sufrir daño cerebral durante la exposición a altitudes extremas sin oxígeno es un hecho bien conocido. Una disminución en la presión ambiental

de oxígeno puede producir diversos grados de disfunción psico-neurológica, y se especula sobre el posible daño cerebral permanente que pueda derivarse de ello [6], [7], [8], [9].

Algunos autores [10], [11], [12], [13], [14] señalan que las áreas cerebrales asociadas con el aprendizaje y la memoria son particularmente sensibles a la hipoxia. En otra investigación [15] se encontró un deterioro significativo en el funcionamiento de la memoria de un grupo de escaladores tras hacer cima sin aporte de oxígeno en el Sathopanth (7.075 m.). Oelz y Regard [16] investigaron con montañeros mundialmente conocidos que habían escalado altitudes superiores a los 7.900 metros en repetidas ocasiones, tanto con oxígeno como sin oxígeno. Observaron defectos de la memoria y de la flexibilidad cognitiva, lo que sugiere la presencia de cambios cognitivos sutiles asociados con el estrés hipóxico repetido. Por su parte, Regard y cols. [17] llevaron a cabo estudios neuropsicológicos a ocho escaladores de elite que habían alcanzado cimas superiores a los 8.500 m. sin aporte de oxígeno suplementario, encontrando problemas de flexibilidad cognitiva, memoria-aprendizaje verbal y figural y en tareas de concentración, concluyendo que la exposición repetida a altitudes extremas puede causar daños cognitivos a los escaladores y que las áreas cerebrales más sensibles a los efectos de la hipoxia parecen ser las estructuras hipocámpicas. Hornbein publicó en 1992 un interesante artículo en el Internacional Journal of Sports Medicine sobre los efectos a largo plazo en el funcionamiento cerebral como consecuencia de la exposición humana a altitudes extremas [18]. Formaron parte de su estudio 41 montañeros de diferentes expediciones al Everest, y se tomaron medidas en dos momentos: antes y entre 1-30 días después de la exposición a hipoxia extrema. Los resultados mostraron decrementos en la memoria visual a largo plazo, memoria verbal a largo plazo, en el test de tapping y en la comprensión y expresión del lenguaje (afasia). Virués y cols. [19] llevaron a cabo un estudio sobre atención y memoria en altitudes moderadas. Los autores encontraron deterioros leves pero significativos en la memoria a corto plazo en altitudes entre 4.600 y 4.800 m. Más recientemente, en estudios con animales [20], se han constatado deterioros evidentes en la memoria de un grupo de ratas expuestas a una situación de hipoxia hipobárica de 6100 m. durante 7 días, medido a través de una tarea de laberinto acuático de Morris. Por su parte, Asmaro y cols [21], encontraron deterioros severos en la memoria de trabajo de un grupo de pilotos expuestos a condiciones de hipoxia aguda en cámara hipobárica a una altitud simulada de 10.000 m. sobre el nivel del mar. Turner y cols. [22], indujeron experimentalmente a un grupo de sujetos a una situación de hipoxia moderada y severa, encontrando a través del resultado en una batería de pruebas computerizadas, un deterioro significativo en determinados aspectos de la memoria (memoria compuesta, verbal y visual).

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. Muestra

Se contó con la participación de un grupo experimental (GE) de ocho sujetos, que participaron en la expedición y a los que se le sometió a condiciones de hipoxia. Igualmente se contó con un grupo de control (GC) de 9 sujetos que no participaron en la expedición y, por tanto, no se les expuso a dichas condiciones. Los grupos eran similares en cuanto a edad (edades medias de 36-43 años respectivamente), sexo (todos varones), nivel cultural (todos suboficiales y oficiales), preparación técnica y experiencia profesional en alta montaña.

2.2. Instrumentos de medida

Con anterioridad a la expedición, y como prueba "pretest", se utilizó la batería neuropsicológica "LURIA-DNA" (Diagnóstico Neuropsicológico de Adultos), adaptación española de D. Manga y F. Ramos [23] de la batería "LURIA DNA" de A. R. Luria. La razón de utilizar esta batería viene dada porque explora de forma sistemática los posibles déficits funcionales de los procesos cognitivos superiores, explorando cuatro áreas básicas relacionadas con la capacidad del razonamiento humano, entre las que se encuentra la memoria. La batería evalúa a través de dos subtests tanto la memoria inmediata (más estrechamente vinculada al proceso de percepción y que abarca la consolidación directa de impresiones que alcanzan al sujeto), como la memoria lógica (más vinculada a las formas intelectuales complejas y que actúa de forma indirecta mediante ayudas de tarjetas o dibujos hechos por el propio sujeto). La batería se aplicó de manera individual a ambos grupos con anterioridad al inicio de la expedición. Tiempo de aplicación: unos 40 minutos por sujeto. Tras la expedición (a la semana de regresar), y como prueba "postest", se les aplicó igualmente a los dos grupos una prueba paralela a la batería neuropsicológica "LURIA-DNA", diseñada por el grupo investigador con el objeto de contar con una prueba postest similar a la original que minimizara el posible "efecto aprendizaje" de dos pruebas idénticas. La nueva batería adaptada explora las mismas áreas que la anterior y consta del mismo número de ítems, procurando que los ítems sean similares en cuanto a su contenido y dificultad. La aplicación se realizó de manera individual a todos los componentes del GE y GC, teniendo la misma duración que la prueba original.

2.3. *Diseño*

Se ha utilizado para este propósito un diseño del tipo "cuasi-experimental pretest-postest con grupo de control no equivalente". Este diseño es uno de los más utilizados en las ciencias sociales donde es habitual que los grupos GE y GC sean unidades ya constituidas con anterioridad a la investigación y por tanto no poseen la equivalencia que se obtendría al asignar aleatoriamente los sujetos a los grupos. No obstante, una forma de controlar las posibles diferencias entre ambos grupos, es mediante la evaluación pretratamiento (la medida pretest nos va a indicar si existen diferencias importantes entre los grupos antes de introducir el tratamiento). Se determinó como variable independiente (VI) la exposición a la altitud (superior a 5.500 m.) y como variable dependiente (VD) el deterioro de la memoria (en concreto, la memoria inmediata y lógica).

2.4. Análisis estadístico

Se han utilizado las conocidas pruebas paramétricas, las cuales precisan para su utilización del cumplimiento de las dos condiciones de normalidad de cada variable y la homocedasticidad (homogeneidad de varianzas). Hemos utilizado la *prueba de Kolmogorov-Smirnov* para comprobar si se cumple el criterio de normalidad y la *prueba de Levene* para la homocedasticidad. Igualmente se ha utilizado la *prueba T de Student* para muestras independientes (análisis intergrupos). Como herramienta para el tratamiento estadístico de los datos se ha utilizado el *Statistical Pakage for Social Sciences* para Windows en su versión 13.0 (SPSS 13).

3. Resultados y Discusión

Tras la aplicación y análisis correspondiente de la citada batería, el primer dato interesante a destacar, es que, como se esperaba, no se apreciaron en el pretest (antes de la expedición) diferencias estadísticas significativas en las puntuaciones medias obtenidas por los dos grupos en ninguna de las dos pruebas de memoria. Podríamos afirmar, por tanto, que ambos grupos, aunque no son totalmente equivalentes al no existir aleatorización, son muy similares y que las diferencias observadas tras el tratamiento se deban a los efectos de la exposición a la altitud, siempre y cuando se hayan controlado otro tipo de variables extrañas.

Prueba de memoria inmediata (MI):

Los resultados observados señalan que no existen diferencias significativas intergrupos en la prueba pretest (T= -0,703; p-valor= 0,493). Sin embargo, en la prueba postest las diferencias entre grupos son muy significativas (T= -3,284; p-valor= 0,005), siendo la puntuación media del GE significativamente mucho más baja que la del GC. En este caso, se aprecia que la altitud puede haber causado una merma importante en la memoria inmediata de los montañeros.

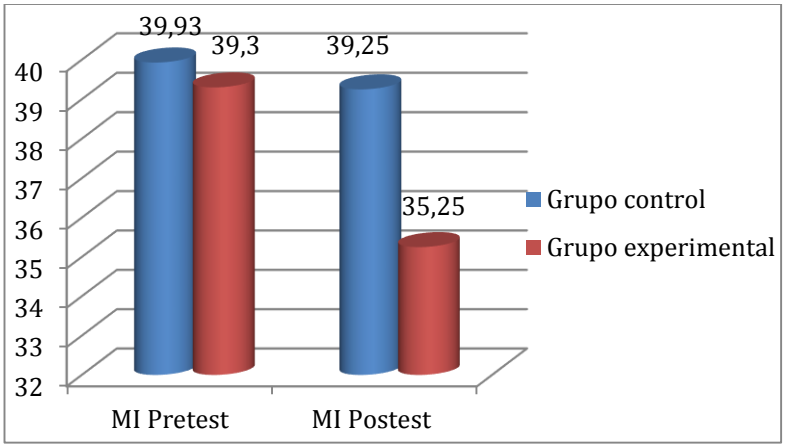


Figura 1. Gráfico prueba de Memoria Inmediata, MI (elaboración propia)

Prueba de memoria lógica (ML):

Los resultados nos muestran que las diferencias observadas con anterioridad a la expedición se mantienen al regreso de la misma. Estadísticamente no existen diferencias ni antes ni después de la expedición (T= -1,238; p-valor= 0,235), (T= -0,990; p-valor= 0,338).

Nuestros resultados concuerdan con los obtenidos en las investigaciones reseñadas anteriormente, constatando efectos evidentes de la hipoxia sobre la memoria. En concreto, las diferencias más significativas las hemos encontrado en la prueba de memoria inmediata (MI). Los resultados nos muestran algo que ya nos comentaban los componentes del grupo experimental con posterioridad a la aplicación de la batería LURIA-DNA. Éstos manifestaban problemas de memoria a la hora de recordar información reciente. En el entendimiento de que esta prueba se aplicó a la semana de regresar de la expedición, los déficits observados en los montañeros deberían ser mucho más acusados en situación de altitud. Este hecho ha de tenerse muy en cuenta ya que, debido a las habituales condiciones atmosféricas adversas en alta montaña, es fácil desorientarse y llegar a perderse, poniendo en grave riesgo la propia vida de los montañeros. Por este motivo, en estas situaciones la posibilidad de supervivencia depende

en gran manera de nuestra capacidad para recordar detalles y aspectos relevantes para encontrar la vía adecuada, además de poseer una buena orientación espacial (prueba incluida en la batería y que analizaremos posteriormente). En la prueba de memoria lógica (ML), en cambio, no se apreciaron diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos en la prueba postest, quizás debido a que es un tipo de memoria que no precisa de tantos recursos cognitivos como la memoria inmediata, ya que actúa de forma indirecta mediante determinadas ayudas. Esta batería explora esta memorización indirecta mediante la relación que el sujeto establece entre palabras y tarjetas, o entre expresiones y dibujos realizados por él mismo. En palabras de sus autores "se ofrecen medios auxiliares activos al servicio de los procesos mnésicos" [23] por tanto, pensamos que puede considerarse normal la inexistencia de déficits en los procesos de memoria con ayudas y recursos ofrecidos al sujeto, salvo en trastornos muy graves debidos probablemente a una lesión en las zonas asociadas a este déficit (lóbulos frontales).

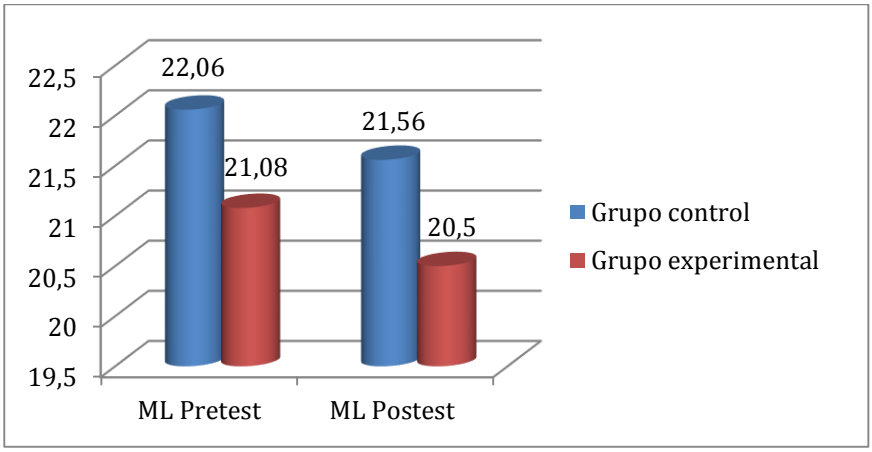


Figura 2. Gráfico prueba Memoria Lógica, ML (elaboración propia)

4. Conclusiones

Tras el análisis y evaluación de los datos recogidos, los resultados obtenidos sustentan nuestra hipótesis de que la exposición a condiciones de hipoxia debido a la permanencia en altitudes extremas (por encima de los 5.500 metros desde el nivel del mar), y sin aporte de oxígeno suplementario, causan un deterioro significativo en la cualidad de la memoria en seres humanos expuestos a ese ambiente, pese a una adecuada aclimatación a la altitud.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento por la colaboración entusiasta y desinteresada de los miembros del GMAM, que han participado en la presente investigación como grupo experimental. Igualmente agradecemos la participación del personal de la EMMOE, ya que la utilización de un grupo de control de similares características al experimental, resulta importantísimo a la hora de avalar y contrastar los resultados obtenidos. Agradecer finalmente al Doctor Eduardo Garrido del Hospital General de Cataluña por sus acertadas observaciones y aportaciones a este trabajo.

Referencias

1. Bert, P. *La pression barométrique. Recherches de physiologie expérimentale*. Masson: París, France, 1878.
2. Richalet, J. P. *Médecine de L´Alpinisme.* Masson: Paris, France, 1985.
3. Hackett, P. H. Acute mountain sickness and high altitude cerebral edema. *Actas del V World Congress on Mountain Medicine and High Altitude Physiology*. Barcelona, Spain, 2002.
4. Richalet, J. P. y Herry, J. P. *Médecine de l'alpinisme et des sports de montagne (4ª ed).* Paris: Masson: París, France, 2006.
5. Raman, L., Tkac I., Ennis, K., Georgieff, M. K., Gruetter, R. y Rao, R. In vivo effect of chronic hypoxia on the neurochemical profile of the developing rat hippocampus. *Developmental Brain Research* **2005**, *156*, 202-209.
6. Garrido, E., Castelló, A., Ventura, J. L., Capdevilla, A., y Rodríguez, F. A. Cortical atrophy and other brain magnetic resonance imaging (MRI) changes after extremely high altitude climbs without oxigen. *International Journal of Sports Medicine* **1993**, *14*, 232–234.
7. Garrido, E., Segura, R., Capdevilla, A., Aldomá, J., Rodríguez, F. A., Javierre, C., y cols. New evidence from magnetic resonance imaging of brain changes after climbs at extreme altitude. *European Journal of Applied Physiology* **1995**, *70*, 477–481.
8. Garrido, E. y Javierre, C. Extreme altitude transient aphasia. *British Journal of Sports Medicine* **1996**, *30*, 364.
9. Garrido, E. *Altitud y riesgo neurológico. Alpinistas europeos versus Sherpas del Himalaya*. Tesis doctoral, Universidad de Barcelona: Barcelona, 1997.
10. Townes, B. D., Horbein, T. F. y Schoene, R. B. *Deterioro neurocognitivo en altitud extrema*. Comunicación presentada a las XI Jornadas de Medicina y Socorro de la Federación Española de Deportes de Montaña y Escalada: Belagoa, España, 1993.
11. Zola-Morgan, S., Squire, L. R. y Amaral, D. G. Human amnesia and the medial temporal region: enduring impairment following a bilateral lesion limited to field CA1 on the hippocampus. *Journal of Neuroscience* **1986**, *6*, 2950–2967.
12. Jason, G., Pajurkova, E., y Lee, R. High altitude mountaineering and brain function: Neuropsychological testing of members of a Mount Everest expedition. *Aviation, Space and Environmental Medicine* **1989**, *60*, 170–173.
13. Shukitt-Hale, B., Kadar, T., Marlowe, B. E., Stillman, M. J., Galli, R. L., Levy, A., y cols. Morphological alterations in the hippocampus following hypobaric hypoxia. *Human and Experimental Toxicology* **1996**, *15*, 312–319.
14. Raman, L., Tkac I., Ennis, K., Georgieff, M. K., Gruetter, R. y Rao, R. In vivo effect of chronic hypoxia on the neurochemical profile of the developing rat hippocampus. *Developmental Brain Research* **2005**, *156*, 202-209.
15. Cavaletti, G., Moroni, R., Garavaglia, P. y Tredici, G. Brain damage after high-altitude climbs without oxygen. *Lancet*, **1987**, *10*, 101.
16. Oelz, O. y Regard, M. Physiological and neuropsychological characteristics of world class extreme-altitude climbers. *The American Alpine Journal* **1988**, *30*, 83-86.

17. Regard, M., Oelz, O., Brugger, P. y Landis, T. (1989). Persistent cognitive impairment in climbers after repeated exposure to extreme altitude. *Neurology* **1989**, *39*, 210–213.
18. Hornbein, T. F. Long term effects of high altitude on brain function. *International Journal of Sports and Medicine* **1992**, *13*, S43–S45.
19. Virués-Ortega, J., Segui, D. y Buela-Casal, G. Possible dissociation between attention and memory impairments related to moderate high altitude. *High Altitude Medicine and Biology* **2002**, *3*: S35.
20. Baitharu, I., Deep, S.N., Jain, V., Barhwal, K., Malhotra, A.S., Hota S.K., Prasad, D. y Ilavazhagan G. Corticosterone synthesis inhibitor metyrapone ameliorates chronic hypobaric hypoxia induced memory impairment in rat. *Behavioural Brain Research* **2012**, *228*, 53-65.
21. Asmaro, D., Mayall, J. y Ferguson, S. Cognition at altitude: impairment in executive and memory processes under hypoxic conditions. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* **2013**, *84*:1159-65.
22. Turner, C.E., Barker-Collo, S.L., Connell, C. J. y Gant, N. Acute hypoxic gas breathing severely impairs cognition and task learning in humans. *Physiology & Behavior* **2015**, *142*:104-110.
23. Manga, D. y Ramos, F. *Luria DNA. Diagnóstico neuropsicológico de adultos*. Madrid: TEA Ediciones: Madrid, 2000.

Seguimiento y análisis automático de contenidos en redes sociales

Alonso, Miguel A.*, Gómez-Rodríguez, Carlos, Vilares, David, Doval, Yerai, y Vilares, Jesús

Grupo LYS, Departamento de Computación, Facultade de Informática, Universidade da Coruña;
Emails: miguel.alonso@udc.es (MAA), carlos.gomez@udc.es (CGR), david.vilares@udc.es (DV), yerai.doval@udc.es (YD), jesus.vilares@udc.es (JV)

* Autor responsable del trabajo; miguel.alonso@udc.es

Abstract: La Minería de Opiniones es la disciplina que aborda el tratamiento automático de las opiniones contenidas en un texto. Permite, por ejemplo, determinar si en un texto se está opinando o no, o si la polaridad o sentimiento que se expresa en el mismo es positiva, negativa o mixta. También permite la extracción automática de características, lo que posibilita conocer la percepción que los autores tienen sobre aspectos concretos de un tema determinado. Este trabajo, tras realizar una introducción a dicho ámbito, presenta una aproximación propia al mismo, la cual destaca por emplear información sintáctica así como por estar especialmente adaptada a uno de los contextos de trabajo más complicados, Twitter. Dicha tecnología es fácilmente aplicable a tareas de inteligencia.

Keywords: Minería de opiniones; análisis del sentimiento; redes sociales; Twitter; procesamiento del lenguaje natural; contraterrorismo

---

1. Introducción

El anonimato y falta de supervisión en Internet atraen a individuos y organizaciones criminales o extremistas que emplean la Red para actividades que suponen una amenaza y que van desde el acoso al terrorismo [9,12,13]. Asimismo, dada la naturaleza de Internet así como la vasta cantidad de datos a manejar, las técnicas clásicas para la lucha contra este tipo de amenazas son insuficientes. Se hace preciso, pues, emplear técnicas y herramientas computacionales que nos permitan monitorizar y analizar este ingente flujo de datos, así como agregar la información obtenida de diversas fuentes, automatizando en lo posible el proceso mediante la utilización de técnicas de identificación, extracción y procesado inteligente de la información para, de este modo, ayudar al analista de inteligencia en su trabajo [5].

El presente trabajo aborda la experiencia de los autores en la Minería de Textos y de Opiniones, desde el punto de vista de su posible aplicación en tareas de inteligencia.

2. Contexto de la discusión: Minería de Textos, Minería de Opiniones y sus aplicaciones

La *Minería de Textos* (MT) [14] aborda la detección y extracción de información a partir de textos, combinando para ello técnicas estadísticas, de Aprendizaje Automático y de Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN). Por abuso del lenguaje, suele hablarse simplemente de PLN en lugar de MT, cosa que también haremos aquí con permiso del lector. A su vez, dentro de dicho campo ha cobrado fuerza la denominada *Minería de Opiniones* (MO) o *Análisis del Sentimiento*, que se centra en el análisis del contenido subjetivo y emocional de los textos [17]. Entre otras cosas, permite determinar si en un texto se está expresando o no una opinión y, de ser así, si ésta es positiva, negativa o neutra, así como también identificar sobre qué entidad, e incluso sobre qué aspecto de la misma, se opina. Asimismo, actualmente este tipo de técnicas se está empleando para monitorizar la actividad radical extremista en la Web.

2.1. Medios de comunicación sociales y extremistas

Los llamados *social media* o *medios de comunicación sociales* tales como foros, blogs, redes sociales, etc., han permitido globalizar la expresión de opiniones inspirándose en las interacciones humanas así como favorecer la creación de comunidades virtuales. Desafortunadamente, en ocasiones éstas se convierten en puntos de encuentro de individuos u organizaciones con todo tipo de motivaciones e ideologías extremistas, pasando a cumplir funciones tales como [3,9,13]: *(a)* proselitismo y adoctrinamiento ideológico; *(b)* propaganda; *(c)* fomento de sentimientos identitarios y de compañerismo entre sus simpatizantes obviando barreras geográficas, socio-económicas e incluso culturales; *(d)* formación y entrenamiento; y *(e)* obtención de financiación.

Asimismo, en los *social media* la gente se pronuncia sobre cuestiones de las que no hablaría en su día a día, normalizando comportamientos que no tendría en su vida normal y facilitando así el proceso de radicalización. En paralelo, su interactividad promueve que las líneas divisorias entre espectador pasivo y militante activo se desdibujen, favoreciendo la adopción de roles más activos, tanto "no-violentos" y que hacen más cómoda la adhesión a la causa —p.ej. prestar apoyo financiero o hacer propaganda—, como eminentemente violentos —p.ej. la planificación de ataques terroristas [3,13,23].

Esto concordaría con declaraciones recientes del Ministro del Interior según las cuales el 80% de las personas captadas por los jihadistas en nuestro país lo serían a través de Internet y las redes sociales, cuando hace tan sólo tres años dicha cifra se refería a centros de culto y prisiones. Asimismo, el periodo de captación y adoctrinamiento es cada vez menor, reduciéndose incluso a dos meses. Por tanto, se hace perentorio abordar de forma ágil y eficaz el problema que suponen este tipo de comunidades virtuales.

2.2. Objetivo: la identificación de sospechosos

Se plantean en este contexto dos tareas [5,16]: *(a)* identificar aquellos foros de encuentro de extremistas que puedan constituir una amenaza y *(b)* identificar allí a los sujetos más peligrosos. Esto permitiría al analista centrar sus esfuerzos en éstos últimos, optimizando así los recursos disponibles.

En lo referente a la primera fase de localización de webs, foros, etc. de contenido radical, diversos trabajos demuestran la efectividad del uso de técnicas de NLP y MO. El sistema de Brynielsson et al. [4], por ejemplo, emplea técnicas de *crawling* combinadas con un proceso de doble filtrado de

candidatos en base a la temática y al extremismo de sus contenidos. Asimismo, L'Huillier et al. [16] y Ríos y Muñoz [21] señalan las bondades de conjugar técnicas de MO y de *Análisis de Redes Sociales* (ARS) —técnicas que permiten analizar las relaciones existentes entre los miembros de una comunidad (p.ej. los miembros de un foro de debate).

Respecto a la segunda fase, la identificación de los sujetos que suponen una mayor amenaza, los trabajos realizados en este campo se centran, principalmente, en dos aspectos que explicamos a continuación. El primero de dichos aspectos es la identificación de los miembros más influyentes de esas comunidades virtuales, como en los trabajos de Katsimpras et al. [15] y de L'Huillier et al. [16], que combinan técnicas de ARS y NLP; o el de Biran et al. [2], mucho más centrado en NLP y MO —obsérvese que el carisma y los mecanismos de influencia tienen un fuerte componente emocional.

Un segundo aspecto de interés es el de la identificación de los denominados *lobos solitarios*, especialmente difíciles de reconocer por medios tradicionales ya que, si bien pueden simpatizar con ellos, no suelen pertenecer o apoyar activamente a movimientos radicales. Sin embargo, estos sujetos sí suelen dejar un *rastro digital* detectable. Por una parte, la formación terrorista de estos individuos suele ser de tipo autodidacta, empleando Internet para, por ejemplo, acceder a webs sobre cómo fabricar explosivos. Asimismo, suelen dar indicios de sus intenciones (sino anunciarlas directamente) en blogs, foros, etc., información toda ella que podría ser monitorizada empleando herramientas especializadas de NLP y MO con objeto de detectar en las publicaciones *marcadores* (indicios) que denoten conductas peligrosas o estados emocionales del autor conducentes a un comportamiento antisocial, filtrando y ordenando a los sospechosos de acuerdo a su grado de radicalización o amenaza [5,20,22,23].

2.3. Dificultades añadidas

Por otra parte, existen factores que complican la tarea. En primer lugar, monitorizar el tráfico de red de los servidores en los que se publica no suele ser efectivo debido a los cambios de IPs y URLs, los mecanismos de anonimización, etc., además de la cuestión de la privacidad de las comunicaciones [12]. Por otra parte, estos usuarios suelen emplear varios *alias* diferentes a la vez, lo que dificulta su identificación, aspecto éste en el que se ha venido trabajando en base a IPs, técnicas de PLN (p.ej. técnicas de identificación de autoría) y ARS, análisis temporal, etc. [4,12].

En segundo lugar, si bien las técnicas de PLN actuales son extrapolables de forma natural a los entornos web de los medios de comunicación tradicionales, en el caso de las redes sociales nos topamos con serios problemas, ya que este tipo de textos no suele adherirse al uso estándar de la lengua. A este respecto, podemos resumir en dos los principales desafíos a los que hemos de enfrentarnos. Primero, el empleo de textos extremadamente cortos o *microtextos* —p.ej. en Twitter—, a menudo carentes de contexto lingüístico y que necesitan, para su análisis, de un refinamiento y actualización de las técnicas tradicionales de PLN. Segundo, la gran cantidad de *ruido* presente en dichos textos a diversos niveles: escritura no convencional, abreviaciones idiosincrásicas, eliminación de determinantes y otras partículas, el uso de emoticonos a modo de contexto, etc. Se hace también preciso en estos casos bien la adaptación de las técnicas y herramientas de PLN existentes, bien la *normalización* de los textos (i.e. transformarlos en lenguaje estándard sí procesable mediante técnicas clásicas).

El tercer factor es el del *idioma*, pues la gran mayoría de las técnicas de NLP y MO a emplear son dependientes del idioma. Se hace necesario, pues, como paso previo a dicho procesamiento, identificar el idioma en el que están escritos los textos a analizar, cuestión en la que, si bien se han realizado notables avances en el caso de texto "normal", ciertos dominios como el de los textos no éstandard presentes en las redes sociales siguen presentando un desafío debido a las características anteriormente comentadas [1].

3. Trabajo en el ámbito de la Minería de Opiniones

Habiendo descrito ya el contexto de discusión, presentamos a continuación nuestro enfoque para tareas de MO sobre microtextos, uno de los escenarios más complicados sobre los que operar.

3.1. Minería de Opiniones: trabajo de terceros

Existe una cierta experiencia en la aplicación de MO en el entorno web, principalmente sobre blogs y recopilaciones de críticas de productos [17]. Las técnicas más extendidas se basan en explotar aspectos léxicos del texto, aún cuando el empleo de información sintáctica es vital para tratar aspectos como la negación, los *intensificadores* (formas lingüísticas que aumentan la intensidad de una opinión) y las frases adversativas (estructuras sintácticas que matizan o contradicen una opinión). Trabajos como el de Greene y Resnik [10] defienden la conexión entre la estructura del texto y el sentimiento implícito, siendo preciso enlazar adecuadamente la sintaxis y la semántica léxica para extraer el sentimiento de un texto. Por su parte, Guo y Wan [11] comentan que usar información sintáctica permite obtener mejor rendimiento a la hora de recuperar documentos de opinión con respecto a aquellos sistemas que sólo explotan la información léxica y la proximidad entre términos. Cruz et al. [6] muestran también que, para extraer opiniones estructuradas de artículos a partir de textos subjetivos con críticas de los mismos, es preciso capturar el contexto mediante técnicas de PLN como la lematización y la etiquetación morfosintáctica y, sobre todo, el análisis sintáctico basado en dependencias. Asimismo, las relaciones sintácticas también son útiles para determinar los conceptos contenidos en un microtexto para luego enlazarlos a fuentes de información relacionadas como, por ejemplo, artículos de la Wikipedia [19].

Por otra parte, hasta hace muy poco no se abordó la MO sobre microtextos, centrándose hasta ahora en determinar si un texto es de opinión o no, u obtener el nivel global de opinión de una expresión [18,24].

3.2. Nuestro enfoque

En nuestro caso, hemos tratado de sobreponernos a los inconvenientes, ya comentados, que presentan este tipo de tareas planteando un sistema de PLN sobre microtextos que consta de las siguiente fases:

1. Un *identificador del idioma* que reconoce el idiomas(s) en el que está escrita la entrada.
2. Según el acercamiento: *(a)* un *preprocesador* que trate los aspectos léxicos no estándar presentes en los textos; o *(b)* un *normalizador* que convierta el texto no estándard de entrada en estándard.
3. Un *segmentador* que divide el texto en frases y *tokens* (palabras, números, emoticonos, etc).
4. Un *etiquetador morfosintáctico* que permite obtener la información morfológica de cada palabra (género, número, tiempo, etc.) así como su forma canónica o *lema*.

5. Un *análizador sintáctico de dependencias* mediante el cual se identifican relaciones binarias *padre-dependiente* entre los términos de una frase (p.ej. entre el verbo y el objeto de la acción).

La información obtenida durante todo este proceso sirve para alimentar una serie de *clasificadores automáticos* para cada una de las tareas a realizar. Una vez obtenido el resultado, la información léxica y sintáctica nos permite explicar el resutado obtenido.

4. Experiencia adquirida

En los últimos años nuestro grupo de investigación ha participando en diversos foros, muchos de carácter competitivo, del ámbito de la MO, sobre todo en tareas sobre microtextos. Repasaremos brevemente a continuación parte de este trabajo, agrupándolo por temática:

4.1. Clasificación de la polaridad del sentimiento

Se trata de determinar si un tuit contiene opinión o no y, de ser así, si ésta es positiva, negativa o neutra. Nuestro enfoque se situó en los puestos de cabeza en la evaluación en español del TASS 2013 [25] con el corpus TASS General. El sistema mostró un comportamiento muy equilibrado para todas las categorías, aspecto clave en situaciones reales en las que no se conoce el sesgo de los datos.

En cuanto al inglés, nuestro sistema fue el mejor competidor español en el SemEval 2014 [26], que incluía tareas diferenciadas para tuits, SMSs y blogs, obteniendo resultados especialmente buenos para éstos últimos al clasificarse entre los primeros. Adicionalmente, en la denominada "tarea sorpresa" de detección de sarcasmo, obtuvimos unos resultados notables sin hacer ninguna adaptación específica.

4.2. Clasificación temática

De nuevo en la competición TASS 2013 [25], la tarea mencionada, de notable dificultad, consistió en determinar de qué tema(s) trataba cada uno de los tuits del corpus TASS General: cine, fútbol, economía, entretenimiento, literatura, música, política, deportes, tecnología y "otros". En los resultados finales nuestro sistema obtuvo el mejor rendimiento.

4.3. Análisis político

La tarea de análisis político del, otra vez, TASS 2013 [25], consistió en determinar la orientación política de una lista de usuarios de Twitter, utilizando para ello el corpus TASS Political, compuesto por tuits en español publicados durante la campaña de las elecciones generales del 2011. Nótese que no se trataba de asociar cada usuario con un partido, sino de determinar si su ideario político se encuadraba en Izquierda, Derecho, Centro o Indefinido. Los resultados obtenidos nos situaron nuevamente entre los primeros.

4.4. Análisis de reputación

La tarea de *Reputation Dimensions Classification*, encuadrada en la competición RepLab 2014 [27], consistía en clasificar una serie de tuits relacionados con empresas del sector bancario y de la automoción, y escritos en inglés o español, en alguna de las siguientes dimensiones: rendimiento,

liderazgo, ciudadanía, gobernanza, lugar de trabajo, innovación, productos y servicios, u "otros". Nuestros resultados nos situaron nuevamente entre los primeros.

4.5. Ranking de autores

También dentro del RepLab 2014 [27], se desarrolló una tarea de *Author Profiling* consistente en crear una lista ordenada de usuarios influyentes de los sectores de automoción y banca partiendo de sus perfiles de Twitter —tanto en español como inglés. Nuestro sistema nos situó en cabeza al tomar en consideración la descripción que el propio usuario proporcionaba en su perfil, ya que la información extraída del análisis lingüístico de dichos perfiles demostró tener un gran valor discriminativo.

4.6. Normalización de tuits

Como ya se apuntó, la *normalización* (de microtextos) consiste en tomar un texto escrito en lenguaje no estándard (con repeticiones de caracteres, emoticonos, ortografía obviada, eliminación de partículas y signos de puntuación, etc.) y convertirlo a lenguaje estándard. Tras haber participado con nuestro propotipo inicial en la tarea de normalización para español del Tweet-Norm 2013 [28] y haberlo rediseño por completo para incrementar su flexibilidad, acabamos de realizar una primera adaptación del mismo al inglés de cara a nuestra participación en la competición ACL W-NUT 2015 [8].

4.7. Identificación del idioma en Twitter

Por último, nuestro grupo participó en la competición TweetLID 2014 [7] de identificación del idioma en tuits, centrada en los idiomas de mayor presencia en la Península: español, gallego, catalán, euskera, portugués e inglés. Para ello estudiamos la adaptación de herramientas ya existentes al nuevo contexto, un contexto especialmente complejo debido no sólo a que se trabajaba con tuits —textos extremadamente cortos y a menudo desnormalizados—, sino que había que sumarle la presencia de fenómenos de *code mixing* (mezcla de idiomas en una misma entrada), las influencias mutuas entre lenguas coexistentes en una misma población y la proximidad entre algunas de ellas (p.ej. gallego y portugués).

5. Conclusiones

Hemos presentado en este trabajo, por una parte, una introducción al uso que de los denominados *social media* hacen los extremistas y, por otra, una introducción a cómo se emplean técnicas de Procesamiento del Lenguaje Natural y Minería de Opiniones en la lucha contra tal amenaza.

A continuación, prestando especial atención al caso de Twitter, hemos repasado nuestra experiencia en numerosas tareas relacionadas con el análisis de contenidos en redes sociales empleando este tipo de técnicas. En ese contexto, nuestros sistemas se han comportado de manera muy satisfactoria en diversas competiciones tanto nacionales como internacionales.

Si bien nuestro trabajo realizado hasta la fecha no está aplicado directamente a tareas de Defensa y Seguridad, las técnicas y recursos desarrollados pueden ser adaptados, de una forma relativamente sencilla, para su empleo, entre otras, en las tareas de inteligencia descritas anteriormente. Asimismo,

aunque nuestra experiencia se ha centrado, sobre todo, en el español y el inglés, dicho trabajo es adaptable a otros idiomas como, por ejemplo, francés o árabe, siempre y cuando se pueda disponer de los recursos necesarios para dichos idiomas, tanto lingüístico-computacionales (p.ej. etiquetadores, analizadores sintácticos, etc.) como humanos (conocedores de la lengua).

Agradecimientos

Investigación financiada por Ministerio de Economía y Competitividad (FFI2014-51978-C2-2-R), Xunta de Galicia (R2014/034) y Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (FPU13/01180).

Referencias

1. S. Bergsma, P. McNamee, M. Bagdouri, C. Fink, and T. Wilson. Language identification for creating language-specific Twitter collections. In *Proc. of 2nd Workshop on Language in Social Media*, pp. 65–74, 2012. ACL.
2. O. Biran, S. Rosenthal, J. Andreas, K. McKeown, and O. Rambow. Detecting influencers in written online conversations. In *Proc. 2nd Workshop on Language in Social Media*, pp. 37–45, 2012. ACL
3. J.P. Bjelopera and M.A. Randol. American Jihadist terrorism: Combating a complex threat. CRS Report for Congress, Congressional Research Service, Washington, DC, 2010.
4. J. Brynielsson, A. Horndahl, F. Johansson, L. Kaati, C. Martenson, and P. Svenson. Analysis of Weak Signals for Detecting Lone Wolf Terrorists. In *Proc. of 2012 European Intelligence and Security Informatics Conference (EISIC 2012)*, pp. 197–204, 2012.
5. K. Cohen, F. Johansson, L. Kaati, and J.C. Mork. Detecting linguistic markers for radical violence in social media. *Terrorism and Political Violence*, 26(1):246–256, 2014.
6. F. Cruz, J. Troyano, F. Enríquez, J. Ortega, and C.G. Vallejo. A knowledge-rich approach to feature-based opinion extraction from product reviews. In *Proc. of 2nd Int. Workshop on Search and Mining User-generated Contents (SMUC'10)*, pp. 13–20, 2010. ACM.
7. Y. Doval, D. Vilares and J. Vilares. Identificación Automática del Idioma en Twitter: Adaptación de Identificadores del Estado del Arte al Contexto Ibérico. in A. Zubiaga *et al.* (eds.), *TweetLID 2014. Tweet Language Identification Workshop 2014*. Vol 1228 of *CEUR Workshop Proceedings*, pp. 39–43. CEUR-WS.org, 2014.
8. Y. Doval, J. Vilares and C. Gómez-Rodríguez. LYSGROUP: Adapting a Spanish microtext normalization system to English. in *ACL 2015 Workshop on Noisy User-generated Text. Proceedings of the Workshop*, pp. 99–105, 2015. ACL.
9. E. Ferrara. Manipulation and abuse on social media. *ACM SIGWEB Newsletter*, 4:1–4:9, 2015.
10. S. Greene and P. Resnik. More than words: Syntactic packaging and implicit sentiment. In *Proc. of NAACL-HLT 2009*, pp. 503–511, 2009. ACL.
11. L. Guo and X. Wan. Exploiting syntactic and semantic relationships between terms for opinion retrieval. *JASIST*, 63(11):2269–2282, 2012.
12. F. Johansson, L. Kaati, and A. Shrestha. Detecting multiple aliases in social media. In *Proc. of Int. Conf. on Advances in Social Networks Analysis and Mining*, pp. 1004–1011. ACM, 2013.

13. J. Jordán. Procesos de radicalización yihadista en España: Análisis sociopolítico en tres niveles. *Revista de Psicología Social*, 24(2):197–216, 2009.
14. D. Jurafsky and J.H. Martin. *Speech and Language Processing (2nd Ed.)*. Pearson, 2009.
15. G. Katsimpras, D. Vogiatzis, and G. Paliouras. Determining influential users with supervised random walks. In *Proc. of 24th Int. Conf. on World Wide Web Companion*, pp. 787–792, 2015.
16. G. L'Huillier, S.A. Ríos, H. Alvarez, and F. Aguilera. Topic-based social network analysis for virtual communities of interests in the Dark Web. In *Proc. of ACM SIGKDD Workshop on Intelligence and Security Informatics (ISI-KDD'10)*, pp. 9:1–9:9. ACM, 2010.
17. B. Liu. *Sentiment Analysis and Opinion Mining*, vol. 16 of *Synthesis Lectures on Human Language Technologies*. Morgan & Claypool Publishers, 2012.
18. E. Martínez-Cámara, M.T. Martín-Valdivia, L. Alfonso Ureña López, and A. Montejo-Ráez. Sentiment analysis in Twitter. *Natural Language Engineering*, 20(1):1–28, 2014.
19. E. Meij, W. Weerkamp, and M. de Rijke. Adding semantics to microblog posts. In *WSDM 2012: 5th ACM Int. Conf. on Web Search and Data Mining*, 2012. ACM.
20. M. Munezero, T. Kakkonen, and C. Montero. Towards automatic detection of antisocial behavior from texts. In *Proc. of IJCNLP Workshop on Sentiment Analysis where AI meets Psychology (SAAIP 2011)*, pp. 20–27, 2011. Asian Federation of NLP.
21. S.A. Ríos and R. Muñoz. Dark Web portal overlapping community detection based on topic models. In *Proc. of ACM SIGKDD Workshop on Intelligence and Security Informatics (ISI-KDD'12)*, pp. 2:1–2:7, 2012. ACM.
22. A. Semenov, A. Nikolaev, and J. Veijalainen. Online activity traces around a Boston Bomber. In *Proc. of 2013 IEEE/ACM Int. Conf. on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM)*, pp. 1050–1053, 2013.
23. A. Semenov, J. Veijalainen, and A. Boukhanovsky. A generic architecture for a social network monitoring and analysis system. In *Proc. of 14th Int. Conf. on Network-Based Information Systems (NBiS 2011)*, pp. 178–185. IEEE, 2011.
24. M. Thelwall, K. Buckley, and G. Paltoglou. Sentiment strength detection for the social web. *JASIST*, 63(1):163–173, 2012.
25. D. Vilares, M. A. Alonso, and C. Gómez-Rodríguez. LyS at TASS 2013: Analysing Spanish tweets by means of dependency parsing, semantic-oriented lexicons and psychometric word-properties. *TASS 2013 — Workshop on Sentiment Analysis at SEPLN 2013*, pp. 179–186. 2013.
26. D. Vilares, M. Hermo, M. A. Alonso, C. Gómez-Rodríguez and Y. Doval. LyS: Porting a Twitter Sentiment Analysis Approach from Spanish to English. *The 8th InternationalWorkshop on Semantic Evaluation (SemEval 2014). Proceedings of the Workshop*, pp. 411–415. 2014.
27. D. Vilares, M. Hermo, M. A. Alonso, C. Gómez-Rodríguez and J. Vilares. LyS at CLEF RepLab 2014: Creating the State of the Art in Author Influence Ranking and Reputation Classification on Twitter. in L. Cappellato, N. Ferro, M. Halvey, W. Kraaij (eds.), *CLEF 2014 Working Notes*. Vol 1180 of *CEUR Workshop Proceedings*, pp. 1468–1478. CEUR-WS.org, 2014.
28. J. Vilares, M. A. Alonso and D. Vilares. Prototipado Rápido de un Sistema de Normalización de Tuits: Una Aproximación Léxica. in I. Alegria *et al.* (eds.), *Tweet-Norm 2013. Tweet Normalization Workshop 2013*. Vol. 1086 of *CEUR Workshop Proceedings*, pp. 39–43. CEUR-WS.org, 2014.

La enseñanza superior militar y el estilo de pensamiento de sus alumnos. Un estudio empírico

Ruiz López, Carlos[1,*], Mandiá Orosa, José Patricio[2]

[1]Centro Universitario de la Defensa. Zaragoza (CUD-Zaragoza). Academia General Militar, carretera de Huesca s/n. 50090 Zaragoza. cruizl@unizar.es (RLC)
[2]Universidad de la Experiencia. Instituto de Ciencias de la educación. Zaragoza. Calle pedro cerbuna. 50009 Zaragoza

***** Autor responsable del trabajo; cruizl@unizar.es (RLC);

Abstract: Los alumnos de las academias militares de oficiales son jóvenes que ingresan con una formación civil y en algunos casos militar, y que llegan con una forma de pensar y actuar en la vida, con un estilo de pensamiento determinado. El ingreso en las academias supone un cambio radical en su forma de vivir y seguramente en su forma de pensar, tras 5 años de formación muy intensa. La Teoría de la inteligencia de Sternberg y estudios derivados en ámbitos militares, establece que la formación de futuros líderes no está en un plan de estudios sino que se va forjando de forma implícita en el quehacer diario. Sternberg postula que "los estilos de pensamiento" de esos futuros líderes influyen en su gestión del liderazgo de forma positiva si son coincidentes con los de la organización y la de sus subordinados y superiores. Es por ello que este trabajo analiza si durante su permanencia en la Academia General Militar (AGM, Zaragoza), los cadetes españoles modifican su estilo de pensamiento. También analiza la existencia o no, de un estilo de pensamiento predominante entre los cadetes y profesores pertenecientes a la AGM, y si hay algún estilo de pensamiento que proporcione ventajas académicas.

Keywords: Estilo de pensamiento, cadete, formación académica, enseñanza superior militar, Ejército.

1. Introducción

Hay personas que realizan determinadas tareas y cometidos sin ningún esfuerzo, de forma innata, y a esas mismas personas les cuesta una gran esfuerzo realizar otro tipo de tareas, que a priori son menos complicadas. De la misma forma, hay personas que ejercen el liderazgo en un tipo de organización de forma natural y en otro tipo no, no siendo normalmente el nivel cultural o el esfuerzo personal la causa de esta diferencia. Hablamos de preferencias en el empleo de aptitudes, no de las aptitudes en sí mismas. Hablamos de "los estilos de pensamiento" de Sternberg [1].

En esta línea podríamos añadir, aquellos que tienen un estilo de pensamiento predominante en una organización, seguramente progresen más rápidamente. Aquellos mandos que tengan un estilo de pensamiento coincidente con el predominante en su unidad, probablemente ejerzan un mejor liderazgo. Se hace pues necesario, en primer lugar, definir el concepto al que nos estamos refiriendo: ¿qué entendemos por Estilo de Pensamiento? Los diferentes autores que trataron los Estilos de Pensamiento, variaron a lo largo del tiempo sus estudios, pasando de centrarlos en un principio en la Cognición, es decir, como la forma de adquirir conocimientos, la personalidad o en las actividades derivadas del aprendizaje, para, en los últimos tiempos, estudiar los estilos de pensamiento, no como aptitudes personales sino como la forma personal en que cada individuo gusta de utilizar sus habilidades.

Sternberg desarrolló la teoría del Autogobierno Mental [2], cuyo principio básico es que para que los estudiantes se beneficien al máximo de la enseñanza y de la evaluación, al menos parte de estas deben de armonizar con su estilo de pensamiento. Hasta 12 son los estilos de pensamiento que Sternberg define en su teoría del Autogobierno, según se analicen por su función, forma, nivel, alcance o inclinación. De todos ellos nosotros nos hemos fijado en el nivel "Función", en el que Sternberg compara los estilos de pensamiento con las funciones que necesitan los estados para gobernar: Legislar las leyes necesarias, ejecutarlas y juzgarlas para comprobar si cumplen la finalidad con la que han sido hechas y si están de acuerdos con los principios que rigen esa comunidad. De la misma forma, según la teoría del Autogobierno Mental, podemos también diferenciar a las personas en Legislativas, Ejecutivas y Judiciales según cuál sea su estilo predominante. Podemos decir que una persona es:

- Legislativa: si le gusta hacer las cosas a su manera. Les gusta crear, formular y planificar las cosas. En general tienden a ser personas a las que les gusta establecer sus propias reglas.
- Ejecutiva: Si les gusta hacer lo que se debe hacer y por general prefiere que se les diga que deben hacer y cómo deben de hacerlo.
- Judicial: si les gusta evaluar reglas y procedimientos y juzgar las cosas, por lo que prefieren problemas donde pueden analizar y evaluar cosas e ideas.

Definidos estos conceptos, adquieren un especial significado las preguntas que nos hemos formulado para hacer este trabajo, y fomenta nuestro interés por ver qué ocurre entre los alumnos de la Academia General Militar, con el fin de mejorar su formación y obtener un mayor rendimiento en sus aptitudes personales: ¿Los alumnos que ingresan en la Academia General Militar (AGM) tienen un determinado estilo de pensamiento? ¿Cambian de estilo de pensamiento durante su estancia en la Academia debido a la formación específica que reciben? ¿Tienen los profesores de la AGM un estilo de pensamiento determinado? ¿Existe un determinado estilo de pensamiento en la AGM que proporciona ventajas educativas a los alumnos que lo poseen?

Allueva et al. [3] realizaron un estudio entre los alumnos del 1er curso, alumnos egresados y profesores del curso 2008/2009 de la universidad de Zaragoza, con el fin de analizar los estilos de pensamiento predominantes. En el análisis de los datos por grupos, áreas de conocimiento y sexo, se apreciaron diferencias significativas en los perfiles de los estilos de pensamiento de los participantes.

En consecuencia, consideramos necesario que cada persona conozca su estilo de pensamiento predominante, y saber así cual es el método de enseñanza que más le favorece y cual le perjudica, no sólo en la vida académica sino también en su vida profesional. Conocer nuestro estilo de pensamiento, el de nuestros subordinados y el predominante de la organización, si este existiera, puede favorecer la dirección y liderazgo de su unidad. Por otra parte, todo profesor debe también conocer cuál es su estilo de pensamiento predominante, ya que este puede constituir una amenaza a su deseo de ser justo con sus alumnos. Sin embargo, no hemos encontrado ninguna referencia que relacione los estilos de pensamiento con sus efectos en la Enseñanza militar española y, en este sentido, este trabajo es pionero, y estamos convencidos que los resultados que ahora presentamos servirán de base para posteriores estudios, en los que, teniendo como fin el aprovechamiento de las cualidades personales del alumno, pudiéramos deducir procedimientos educativos e incidir en los programas, con una base científica, en beneficio del individuo y de la Fuerzas Armadas.

Tan solo, como única referencia, hemos encontrado trabajos realizado en la República Argentina en la que su autor, Castro Solano [4, 5], afirma que "la competencia para el razonamiento abstracto, un estilo de personalidad dominante y las estrategias de afrontamiento focalizadas en la resolución de problemas predicen los logros académicos en primer año. Los alumnos próximos a graduarse se muestran más dominantes, asertivos y ambiciosos, con menos redes de apoyo social, mayores relaciones con amigos íntimos y son más globales en la forma de procesar la información".

Con todas estas premisas, nos hemos marcado los siguientes objetivos:

1º. Conocer si los cadetes de la Academia General Militar modifican su estilo de pensamiento a lo largo del periodo de su formación académica en el Centro y si existe un estilo predominante en la AGM.

2º. Conocer si existe entre los cadetes un determinado estilo de pensamiento que proporciona ventajas académicas para aquellos que lo posean.

3º. Conocer si entre los profesores de la Academia General Militar existe un estilo de pensamiento predominante y si este coincide con el de los futuros oficiales.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. Sujetos o participantes

La población general a la que se refiere el estudio son los alumnos de la enseñanza superior militar, para el acceso a la escala de oficiales del Cuerpo General de las Armas del Ejército de Tierra. La Academia General Militar es el centro docente donde se encuentran todos los alumnos de este tipo de enseñanza en sus tres primeros cursos. Los sujetos participantes en este estudio fueron 404 alumnos de la enseñanza superior militar para acceder a la escala de oficiales del Cuerpo General de las Armas. Los alumnos están distribuidos en tres cursos, 1º, 2º y 3º, con 171, 131 y 95 alumnos respectivamente, y de edad media 22 años. Hay 394 hombres y 10 mujeres. También participaron 75 profesores pertenecientes a la Jefatura de estudios de la AGM. En cuanto a los profesores, decir que están representados los 8 departamentos de la AGM: Departamento de Administración (DA), Departamento de Ciencias Jurídicas

y Sociales (DCJS), Área de Educación Física (DEF), Departamento de Idiomas (DI), Departamento de Instrucción y Adiestramiento (DIA), Departamento de Matemáticas, Física e Informática (DMFI), Departamento de Sistemas de Armas (DSA) y Departamento de Táctica y Logística (DTL).

2.2. Materiales e Instrumentos

Se emplearon los Cuestionarios de Estilos de Pensamiento, Thinking Styles Inventory (TSI), de Sternberg-Wagner en el nivel Función para los estilos de pensamiento legislativo, ejecutivo y judicial. Consta de 24 preguntas, con respuestas de tipo múltiple en una escala Likert de 1 a 7 según no se esté de acuerdo o el acuerdo sea total. Tiene una duración total aproximada de 20 minutos. Los cuestionarios de autoevaluación Sternberg-Wagner superaron las pruebas de validez y fiabilidad en un estudio realizado por Zhang y Sternberg (2002).

2.3. Análisis Estadísticos

Los análisis estadísticos empleados fueron la Chi-cuadrado, V de Cramer y coeficiente de Contingencia para Tablas de Contingencia 2x2 y 3x3. También la prueba F de Snedecor para el ANOVA de un factor y la prueba H de Kruskal-Wallis. Por último, se realizó un análisis gráfico descriptivo de las puntuaciones de los profesores en los "estilos de pensamiento". Hemos utilizado el Statistical Pakage for Social Sciences para Windows en su versión 17.0 (SPSS 17) [6].

3. Resultados y Discusión

Al estudiar la relación entre "estilo de pensamiento" y "curso" mediante la tabla de contingencia 3x3 (tabla 1, tabla 2 y gráfico 1), los resultados mostraron diferencias significativas, dependencia, entre los estilos de pensamiento de los alumnos de la AGM y curso (*sig. 0,030*). En los alumnos de 1º curso hay más frecuencia de la esperada con el estilo ejecutivo (residuo corregido +3.0) y menos de la esperada en el estilo legislativo (residuo corregido -2.6) (tabla 1). Esto indica una atracción de los alumnos de 1º hacia el estilo ejecutivo y rechazo hacia el legislativo. Los alumnos de 2º y 3º no presentan residuos tan altos, si bien se aprecia atracción al legislativo a medida que avanzan los cursos (+0,8 y +2,1).

Tabla de contingencia CURSO * Estilo de Pensamiento

			Estilo de Pensamiento			
			Legislativo	Ejecutivo	Judicial	Total
CURSO	1	Recuento	74	81	16	171
		Frecuencia esperada	86.8	66.5	17.8	171.0
		Residuo	-12.8	14.5	-1.8	
		Residuos tipificados	-1.4	1.8	-.4	
		Residuos corregidos	-2.6	3.0	-.6	
	2	Recuento	74	46	18	138
		Frecuencia esperada	70.0	53.6	14.3	138.0
		Residuo	4.0	-7.6	3.7	
		Residuos tipificados	.5	-1.0	1.0	
		Residuos corregidos	.8	-1.6	1.3	
	3	Recuento	57	30	8	95
		Frecuencia esperada	48.2	36.9	9.9	95.0
		Residuo	8.8	-6.9	-1.9	
		Residuos tipificados	1.3	-1.1	-.6	
		Residuos corregidos	2.1	-1.7	-.7	
Total		Recuento	205	157	42	404
		Frecuencia esperada	205.0	157.0	42.0	404.0

Tabla 1. Tabla de Contingencia de las variables Curso y estilo de pensamiento

La tabla 2 y el gráfico 1 muestran por curso el tanto por ciento y el número de alumnos en cada estilo de pensamiento.

Tabla de contingencia CURSO * Estilo de Pensamiento

% de CURSO

		Estilo de Pensamiento			
		Legislativo	Ejecutivo	Judicial	Total
CURSO	1	43.3%	47.4%	9.4%	100.0%
	2	53.6%	33.3%	13.0%	100.0%
	3	60.0%	31.6%	8.4%	100.0%
Total		50.7%	38.9%	10.4%	100.0%

Tabla 2. Tabla de Contingencia de las variables Curso y estilo de pensamiento en %

Si observamos el gráfico 1, se aprecia un patrón de comportamiento muy similar para los alumnos de 2º y 3º, siendo claramente diferente al de 1º curso.

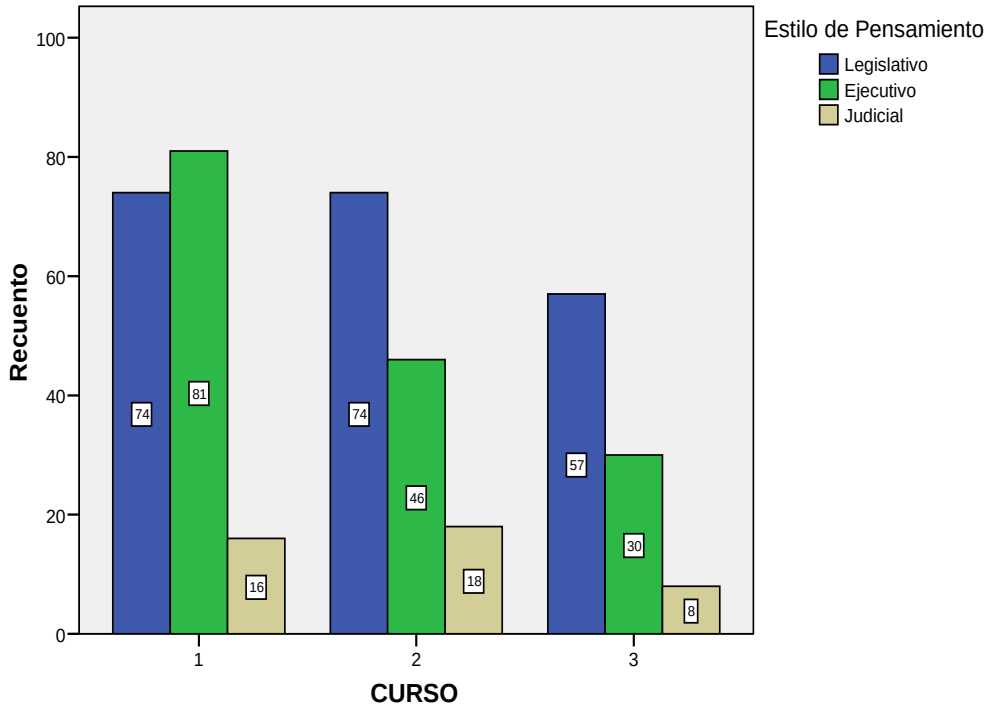


Gráfico 1. Estilos de pensamiento de los alumnos por curso

Al analizar los cursos dos a dos (tablas 2x3), los resultados mostraron diferencias significativas con nivel de confianza del 95% entre los alumnos de 1º y 2º curso (*sig. 0,043*) y los alumnos de 1º y 3º (*sig. 0,028*). Los alumnos de 2º y 3º curso no presentan diferencias significativas entre sí (*sig. 0,464*). Esto indica que los estilos de pensamiento de los alumnos sin formación militar (1º curso) son diferentes de los alumnos con uno y dos años de formación (2º y 3º curso)

Al estudiar la dependencia de las calificaciones finales de los alumnos respecto de los estilos de pensamiento mediante el ANOVA, los resultados no mostraron diferencias significativas (*sig. 0,153*) entre las notas finales de los alumnos de cada uno de los tres niveles: legislativo, ejecutivo y judicial. Pero si se observó que los alumnos con estilo de pensamiento Legislativo obtuvieron mejores calificaciones académicas en todos los cursos (Tabla 3).

Descriptivos

Nota Fin de Curso

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
Legislativo	57	6.5332	.55045	.07291	6.3871	6.6792	5.52	8.01
Ejecutivo	30	6.3177	.55232	.10084	6.1114	6.5239	5.35	7.59
Judicial	8	6.2963	.32258	.11405	6.0266	6.5659	5.96	6.95
Total	95	6.4452	.54235	.05564	6.3347	6.5556	5.35	8.01

Tabla 3. 3º curso. Estadísticos descriptivos de la variable Nota final por estilos de pensamiento.

Los alumnos de 2º curso también obtuvieron unas calificaciones medias más altas en el estilo legislativo. El análisis de la varianza nos confirma de nuevo la independencia de la variable "Nota final" respecto de la variable "Estilo de pensamiento" (*sig.=0,104*).

En cuanto al 1º curso y ante la ausencia de Nota final (los alumnos estaban comenzando el curso), se tomó como sustituto el "Escalafón de 1º curso", que presenta el orden obtenido en la oposición para ingreso en la escala de oficiales. La prueba de Kruskal-Wallis nos confirmó la independencia entre el "Escalafón de 1º curso" respecto del "estilo de pensamiento" (*sig.=0,157*). En este curso, los mejores puestos en la oposición los obtuvieron, a diferencia de los de 2º y 3º curso, los alumnos con el estilo de pensamiento judicial (rango promedio 70), seguidos de los legislativos (rango promedio 81,97) y por último los ejecutivos (rango promedio 92,84).

Por último, los profesores obtuvieron unos resultados más heterogéneos que los alumnos al analizar sus estilos de pensamiento. En el gráfico 2 se observan los estilos de pensamiento en los 8 departamentos, no observándose ningún patrón de comportamiento predominante. El estilo Legislativo es predominante en Administración, Educación Física e Idiomas. El estilo Ejecutivo es predominante en cuatro (Instrucción y Adiestramiento, Matemáticas, Sistema de Armas y Táctica y Logística). El estilo Judicial y el Ejecutivo son los estilos mayoritarios en un departamento (Ciencias Jurídicas y sociales).

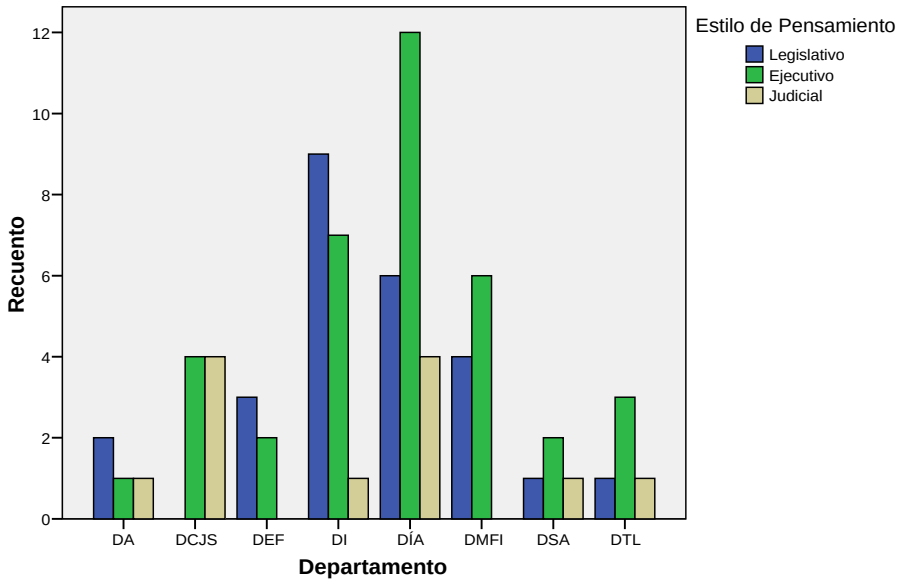


Gráfico 2. Estilos de pensamiento de los profesores por departamentos

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que existen diferencias significativas entre los estilos de pensamiento de los alumnos sin formación militar respecto de los alumnos con formación militar. Se constata un cambio en los estilos de pensamiento de los alumnos de 1º curso hacia el estilo legislativo tras la realización de un año de enseñanza militar, manteniendo y aumentando esta tendencia en los cursos siguientes (43%-53%-60%) (Gráfico 3). Se produce una atracción hacia el estilo legislativo y un rechazo del ejecutivo con el paso del tiempo en la AGM (47%-33%-31%). El estilo judicial no sufre modificaciones destacables.

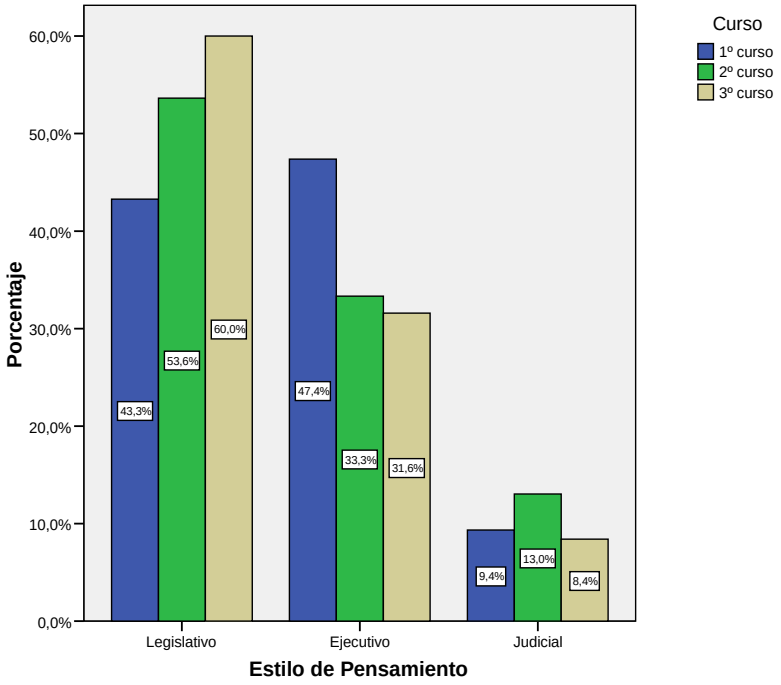


Gráfico 3. Porcentaje de alumnos con estilos de pensamiento por curso

Estos resultados atienden el Primer Objetivo que nos hemos planteado y sugieren que los cadetes modifican su estilo de pensamiento a lo largo de su periodo de formación académica en la AGM. Aunque los trabajos de Sternberg [7] identifican el estilo de pensamiento ejecutivo como propio, entre otros, de aquellos que ejercen la profesión militar y parece incluso de sentido común que la finalidad propia del militar de cumplir órdenes y llevar a cabo la misión encomendada nos confirme esta afirmación de Sternberg, para los autores de este trabajo resultan perfectamente comprensibles los resultados de este estudio que concluye con la desviación del estilo de pensamiento inicial hacia el pensamiento legislativo, por varios motivos, ya que en la Academia General Militar se fomenta la participación del alumno, el espíritu crítico, así como la discusión del problema táctico, profundizando en el sentido vocacional de la profesión mediante el estímulo constante de las virtudes militares, en busca del convencimiento y la responsabilidad personal, en contraposición al ciego cumplimiento de las órdenes.

El segundo objetivo de esta investigación era conocer si existe entre los cadetes un determinado estilo de pensamiento que proporciona ventajas académicas para aquellos que lo posean, y los resultados indican que, aunque no existe un estilo de pensamiento en la AGM que proporcione ventajas educativas,

los alumnos de estilo legislativo son mejores que los judiciales y ejecutivos, por este orden. Estos resultados están en consonancia con estudios e investigaciones anteriores.

Por otra parte, el tercer objetivo planteado era conocer si existe un estilo de pensamiento predominante entre los profesores y los resultados también nos confirman que no lo hay. Estos resultados también están en consonancia con estudios e investigaciones anteriores en el ámbito universitario.

Esta investigación sigue realizándose en la actualidad con las promociones que comenzaron su formación con el nuevo modelo de enseñanza militar. Estos alumnos incluyen un nuevo plan de estudios con doble titulación: una universitaria, "Grado de Ingeniero en Organización Industrial" y otra militar, "Enseñanza superior militar". En este modelo de enseñanza hay nuevos profesores pertenecientes al Centro Universitario de la Defensa (CUD Zaragoza), la mayoría civiles, lo que supone también un gran cambio. Nuestro proyecto tiene, en consecuencia, una clara vocación longitudinal, en la búsqueda de saber que ocurrirá con este nuevo modelo de enseñanza, su incidencia en los estilos de pensamiento de los cadetes y su posible comparación con los resultados obtenidos en esta investigación que aquí presentamos, por lo que queda abierto un interesante camino para nuevas investigaciones.

Agradecimientos

A la AGM y a sus caballeros y damas cadetes por ser los verdaderos protagonistas.

Referencias

1. Sternberg, R. J.; *Estilos de pensamiento*. Paidós. España. 1999.
2. Sternberg, R.J.; *Mental self government: A theory intellectual styles and their development*. EEUU, 1998. Human Development 31, pp 197-224.
3. Allueva, P.; *Estudio comparativo del estilo de pensamiento del alumnado de nuevo ingreso en el Curso 2008-2009, egresado y profesorado de 1º curso de la universidad de Zaragoza*. Innovación docente. Universidad de Zaragoza, 2009.
4. Castro, A. y Casullo, M. M.; *Predictores del rendimiento académico y militar de cadetes argentinos*. Anales de Psicología 2002, 18, (2), 247-259.
5. González, G., Castro, A. & González, F.; *Perfiles aptitudinales, estilos de pensamiento y rendimiento académico*. Anuario de investigaciones; Argentina 2008, volumen (XV), 33.
6. Pardo, A. y Ruiz, M.A.; *Análisis de datos con SPSS.* 1ª edición. McGraw-Hill; España 2005.
7. Sternberg, R.J., Li-fang Zhang; *Styles of Thinking as a Basis of Differentiated Instruction*. Theory into Practice 2005, 44, (3), 245-253.
8. Hervás, R.M.; *Estilos de enseñanza y aprendizaje en escenarios educativos*. Granada 2003: Grupo Editorial Universitario.
9. García, L., y Fumero, A.; *Personalidad y rendimiento académico en estudiantes universitarios: Un estudio predictivo en tres cursos académicos*. Análisis y modificación de conducta 1998; 24, 65-77.
10. Salas, R. y Jiménez, C.; *Estilos de aprendizaje y estilos de pensamiento entre estudiantes universitarios*. Estudios Pedagógicos 2006, XXXII (1), 49–75.
11. Sternberg, R. J.; Grigorenko, E. L.; *Styles of Thinking in the school*. European Journal for High ability 1995, 6, 201-219.

Sesión IV-A

Adquisición de Información y Procesado

Prueba de concepto de un sistema para detección de usuarios afines a ideologías terroristas a través de Twitter

Álvarez López, Tamara [1,]*, Rodríguez Trejo, Luis [1], Fernández Gavilanes, Milagros [1,], Juncal Martínez, Jonathan [1,], Costa Montenegro, Enrique [1,] y Burguillo Rial, Juan Carlos [1]

[1] Departamento de Ingeniería Telemática, Escuela de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad de Vigo. Campus Universitario Lagoas-Marcosende. 36310 Vigo, Pontevedra; Emails: talvarez@gti,uvigo.es (TAL), rodrigueztrejoluis@gmail.com (LRT), milagros.fernandez@gti.uvigo.es (MFG), jonijm@gti.uvigo.es (JJM), kike@gti.uvigo.es (ECM), jrial@det.uvigo.es (JCBR)

* Autor responsable del trabajo: talvarez@gti.uvigo.es

Abstract: En los últimos años se ha producido un gran auge de las redes sociales y el uso de Internet, medios cada vez más utilizados para expresar opiniones sobre diversos temas, en concreto acerca del movimiento terrorista, especialmente en Twitter y Facebook. Es por ello que muchos gobiernos y fuerzas de seguridad de todo el mundo se están interesando cada vez más en el análisis de toda esta información, con el fin de utilizarla para prevenir ataques terroristas o detectar usuarios potencialmente peligrosos. En este artículo se presenta una prueba de concepto, sobre la red social Twitter, para el análisis automático de un conjunto previamente seleccionado de tweets, identificando aquellos que muestren simpatía hacia conductas terroristas, en particular hacia el yihadismo. Para ello se aplican técnicas de análisis de sentimiento, para determinar si un usuario se muestra a favor o en contra de estas conductas, utilizando diccionarios de polaridad y las estructuras sintácticas de cada uno de los textos.

Keywords: análisis de sentimiento, Twitter, yihadismo, terrorismo, redes sociales

---

1. Introducción

Yihadismo es el término utilizado para denominar a las ramas más violentas y radicales del Islam político, que se basan en la frecuente utilización del terrorismo. Este movimiento ha sido una amenaza para Europa y Estados Unidos desde mediados de los años 90. Siguiendo esta ideología existen diversas organizaciones yihadistas, entre las que Al Qaeda es la más conocida e importante, responsables de

los atentados del 11 de septiembre de 2001. Desde el año 2014 surge otro grupo terrorista, Estado Islámico, muy relacionado con Al Qaeda en sus orígenes, convirtiéndose en la mayor amenaza yihadista en la actualidad [1], siendo autor de diversos ataques en Europa en los últimos años. Además posee un relevante aparato propagandístico, que le permite difundir sus objetivos y acciones a todo el mundo. Utilizan así las redes sociales, productoras propias e incluso poseen una revista, *Dabiq*, publicada en varios idiomas, llegando al mayor número de personas posibles y dándose a conocer en todo el mundo.

1.1. El yihadismo en España

El país europeo más amenazado durante los últimos años ha sido el Reino Unido, seguido por Francia, España e Italia. En España, durante el año 2013 se han producido multitud de amenazas yihadistas, siendo superadas en número sólo durante el año 2004, año del 11-M. La mayoría de ellas hacen referencia a la ”ocupación” española de los territorios de Ceuta y Melilla [2] o de la recuperación de Al-Andalus por parte de la Yihad. El atentado más importante sufrido en España tuvo lugar en marzo de 2004, con la detonación de varias bombas en trenes de cercanías de Madrid, en el que fallecieron 193 personas y 1858 resultaron heridas. Este hecho marca un punto de inflexión en la evolución del yihadismo en España [3]. Hasta esa fecha, la mayoría de los yihadistas pertenecían a redes organizadas, sin embargo, a partir del 2004 se empiezan a crear células independientes e individuos aislados que no pertenecen a ninguna organización, son los llamados ”lobos solitarios”, cobrando gran importancia en la actualidad.

Las redes yihadistas en España se encargan fundamentalmente de funciones logísticas, reclutamiento y envío de voluntarios a Irak [4]. Estas redes suelen encontrarse deslocalizadas, con sus miembros repartidos por diferentes ciudades, comunicándose a través del teléfono o internet. Hasta hace unos años, los lugares más frecuentes de reclutamiento eran las mezquitas, prisiones y otros lugares de encuentro. Hoy en día, Internet y las redes sociales juegan un papel muy importante en este aspecto.

Las autoridades españolas han llevado a cabo diversas medidas a lo largo de estos años, así como la creación de nuevas leyes para combatir el terrorismo. Algunas de ellas han sido la creación del Centro Nacional de Coordinación Antiterrorista (CNCA), se han reforzado las unidades de investigación en ciberterrorismo o ciberdelincuencia, especialización de los funcionarios y protocolos de actuación en instituciones penitenciarias para un mayor seguimiento de los internos islamistas, o creación de bases de datos comunes a las que tienen acceso diversas instituciones y fuerzas de seguridad del estado. Además, han aumentado las operaciones policiales antiterroristas [5], y se llevaron a cabo alrededor de 600 detenciones entre 1996 y 2012, aunque sólo 77 de ellos fueron condenados finalmente [2].

1.2. Yihadismo y redes sociales

Actualmente, las redes sociales en Internet proporcionan nuevos métodos de comunicación, frecuentemente utilizados en los últimos años por grupos yihadistas, ya que estas nuevas tecnologías aportan mayor efectividad a sus actividades de difusión de propaganda, financiación, comunicaciones internas, reclutamiento o formación [6]. Antiguamente, aquellas personas interesadas en unirse a movimientos yihadistas, debían viajar lejos o hacer contactos de forma personal. Con el auge de las redes sociales esto ya no es necesario, pues existen foros, páginas, perfiles de redes sociales, etc., que facilitan mucho esta tarea.

La evolución de la tecnología a lo largo de los años proporciona nuevos medios de acceso a todo tipo de información a través de Internet, de forma inmediata y relativamente anónima. Además, se multiplican también los dispositivos desde los que nos podemos conectar a la red, como móviles, tablets, ordenadores, etc., y también el número de personas que tienen los recursos suficientes para ello, que son la inmensa mayoría de la poblaciíon. Por otra parte, se suman también cuestiones técnicas como el aumento de la velocidad de transmisión o capacidad de almacenamiento, permitiendo reproducir imágenes y vídeos de alta calidad. Así, las organizaciones yihadistas se aprovechan de este hecho para difundir su mensaje y hacerlo llegar a un público más amplio y a nivel internacional.

Ya desde el nacimiento de Internet, diferentes grupos e individuos lo identificaron como un medio de comunicación y una fuente de información de cada vez más bajo coste [7]. La ventaja que ofrecía esta nueva herramienta es la capacidad de publicar información sin ningún tipo de edición o censura. En primer lugar, los grupos terroristas lo utilizaban como medio de comunicación entre los distintos miembros, a través de foros. Posteriormente, las organizaciones mejor estructuradas y con mayores recursos comienzan a crear sus propios sitios web. Sin embargo, esto ya requería una dedicación y mantenimiento, lo que implicaba mayores gastos económicos y de personal. Además, suponía mayor exposición a ser rastreados e investigados por las fuerzas de seguridad, a través de los servidores que alojaban estas páginas. Por tanto, con la aparición de los blogs y las redes sociales, los grupos y organizaciones yihadistas encontraron una nueva vía, más adecuada y efectiva para la difusión de propaganda terrorista, con un alcance a nivel mundial. Las ventajas que aportan este tipo de redes son el alcance global, la acción inmediata y la facilidad de coordinación con otras acciones paralelas [7].

Un caso concreto de la utilización de Internet y las redes sociales por parte del movimiento yihadista es Twitter, y en él se centra el sistema desarrollado en este artículo. Twitter posee una estructura mucho más abierta que otras redes sociales, y se basa en el sistema de hashtags, que facilitan la difusión de contenidos y la coordinación de campañas. En redes sociales como Facebook, se eliminan constantemente perfiles asociados a actividades terroristas, problema que no sucede en Twitter. Además, en ocasiones se han utilizado hashtags camuflados en otros tweets para hacer llegar el contenido a un mayor número de personas. Por ejemplo, publicando sus comentarios con hashtags referidos al mundial o a otros acontecimientos de gran relevancia.

Ante estas nuevas formas de comunicación entre individuos relacionados con el yihadismo, los gobiernos y fuerzas de seguridad de todo el mundo, han comenzado a enfocar su atención en dichas tecnologías y realizar un seguimiento y control de estas amenazas. Sin embargo, se presentan diversos desafíos. Las redes sociales generan mucha información y hay multitud de usuarios involucrados en conversaciones sospechosas, con lo que llevar a cabo esta monitorización requiere gran cantidad de recursos, y es complicado entender cómo diferenciar estos comentarios inofensivos de los realmente significativos [8].

2. Metodología aplicada

El sistema que se presenta en este artículo trata de realizar un análisis sobre un conjunto previamente seleccionado de tweets, de tal forma que se detecten automáticamente aquellos que expresen opiniones o comentarios de apoyo a movimientos terroristas, en concreto yihadistas.

En esta sección se expone una introducción al estado del arte sobre análisis de sentimento y una breve descripción del sistema desarrollado.

2.1. Estado del arte

El auge de la Web 2.0 y la aparición de multitud de blogs y redes sociales, donde usuarios de todo tipo pueden expresar su opinión sobre diversos temas, hacen que toda esta información sea una fuente muy valiosa para empresas y otras organizaciones. El proceso de monitorizar todos estos datos plantea un nuevo desafío, pues hacerlo manualmente implica un gran consumo de tiempo y recursos. Esta es la motivación para el desarrollo de herramientas que simplifiquen este trabajo. Así surgen multitud de estudios en el ámbito del procesamiento del lenguaje, y en concreto del análisis de sentimiento [9], de forma que se procesen los textos automáticamente, analizando la semántica de los mismos.

Los estudios sobre análisis de sentimiento son numerosos y variados, pudiendo dividirse en dos tipos de sistemas: supervisados con aprendizaje de máquina y sin supervisión, basados en aproximaciones semánticas. Los primeros suelen ser clasificadores construidos mediante características de representaciones tipo *bag of words* [10]. Por otro lado, el objetivo de los segundos es capturar y modelar el conocimiento lingüístico mediante el uso de diccionarios [11]. En este trabajo se presenta un método sin supervisión para el idioma español, utilizando dependencias sintácticas y diccionarios de polaridad.

Sobre esta temática, y en concreto para la red social Twitter, existen diversos congresos, donde empresas y universidades muestran sus sistemas. Uno de ellos, a nivel internacional, es el SemEval, al que ha sido presentada una adaptación de nuestro sistema para el inglés [12], obteniendo una buena posición en el mismo.

2.2. Descripción del sistema

El objetivo principal es detectar el sentimiento de los tweets de un conjunto seleccionado, es decir, determinar si expresan un sentimiento positivo o negativo acerca del movimiento yihadista, o si no expresan sentimiento alguno.

El proceso a seguir consta de varias fases. En primer lugar, hay que aplicar un preprocesado a los tweets; el siguiente paso sería el análisis léxico y sintáctico de los textos; se debe generar también un diccionario de polaridades, que será una lista de palabras con el sentimiento asociado; y por último, la detección de sentimiento en sí misma.

2.2.1. Preprocesado

Trabajar con tweets presenta varias singularidades en el procesamiento del lenguaje. La forma en que los usuarios se expresan en este tipo de redes sociales no suele ser la correcta gramaticalmente, conteniendo faltas de ortografía, palabras escritas en formato SMS, signos de puntuación incorrectos, etc. Por este motivo, es necesario realizar una normalización previa del texto, transformándolo a su forma correcta, eliminando caracteres repetidos o sustituyendo abreviaturas por su forma completa. Además, Twitter posee algunas características específicas, como el empleo de hashtags, menciones,

URLs o emoticonos, que serán detectados y sustituidos por las etiquetas ”hashtag”, ”mention”, ”URL” y los emoticonos se sustituyen por diferentes etiquetas según el sentimiento que representen.

En esta fase se detectan también las entidades a las que hace referencia el tweet, como ISIS, yihad o yihadismo, siendo necesario tenerlas localizadas para el posterior tratamiento.

2.2.2. Análisis léxico y sintáctico

Una vez que los textos han sido preprocesados, se separa cada tweet en frases y palabras (tokens) y se obtienen sus correspondientes lemas (forma en la que una palabra aparecería en la entrada de un diccionario) y etiquetas morfológicas. Esto se hace a través de la herramienta Freeling [13], que proporciona diversas funciones de análisis del lenguaje. El siguiente paso a realizar es la obtención de las dependencias sintácticas, que también las proporciona Freeling, resultando una salida en forma de árbol según dichas dependencias.

2.2.3. Diccionario polar

Para el desarrollo de este sistema es necesario contar con uno o varios diccionarios de polaridad, que serán la entrada, junto con los tweets preprocesados y analizados, a la última fase de detección del sentimiento. Un diccionario polar, o diccionario de sentimiento es una lista de palabras (sustantivos, adjetivos y verbos) con un valor numérico asociado, representando el sentimiento que expresa. En nuestro caso, se representa mediante un número real, comprendido en el intervalo [-5, 5], siendo -5 el sentimiento más negativo, y 5, el más positivo.

Existen diversos diccionarios polares para el español, disponibles en la red, como el SOCAL [14] o el SpanishDAL [15]. Sin embargo, estos léxicos son genéricos, no dependen del contexto, por lo que es necesario mejorar su cobertura, de forma que se adquieran nuevas palabras propias de un contexto determinado, que no se encuentren en los anteriores diccionarios, y se adapten las polaridades de aquellas que ya existan. Se aplica, para ello, un algoritmo de expansión de polaridades basado en grafos [16]. Se genera un grafo a partir de las dependencias sintácticas de todos los tweets del conjunto a analizar, considerando sólo sustantivos, adjetivos y verbos. El punto de comienzo es un conjunto de palabras, muy positivas y muy negativas, que actúan de semillas, y a partir las cuales se comienza a propagar la polaridad a través del grafo creado.

2.2.4. Detección de sentimiento

En esta última fase obtendremos la polaridad final del tweet, para lo cual fijamos un intervalo de [-1, 1], de forma que si la polaridad calculada se encuentra dentro de éste, concluimos que es neutro; si es mayor que 1, será positivo; y menor que -1, negativo.

Una vez creado el árbol de dependencias de cada tweet, se le asignan las polaridades existentes en el diccionario a cada palabra y se aplica una propagación de polaridades desde las hojas del árbol hasta llegar al nodo padre, sumándolas y aplicando reglas de intensificación, negación, etc. Para el tratamiento de la intensidad, se tiene en cuenta la presencia de ciertos adverbios que tienden a enfatizar la orientación semántica de las palabras que los acompañan. Para el tratamiento de la negación, se detectan partículas

negadoras, como ”no” o ”nunca” y se aplica un factor correctivo a la polaridad de la expresión negada. Además se tratan otras construcciones, como las adversativas o los conflictos de polaridad [12].

Además de detectar tweets con polaridad positiva referente al yihadismo y conceptos relacionados, se analizan también ciertas estructuras gramaticales que, a pesar de no tener polaridad, denotan también un sentimiento positivo hacia el terrorismo islámico. Algunas de ellas son: *unirse a, participar, iniciar, ayudar, colaborar, apoyar a, entrar en*, etc. seguidas de palabras clave como *ISIS* o *yihad*.

3. Resultados y Discusión

En esta sección se muestran algunos de los resultados obtenidos y cómo se podría realizar la selección previa de los tweets a analizar.

3.1. Recopilación de tweets

En Twitter, existe una gran cantidad de información, generándose millones de nuevos comentarios todos los días. Entre todos estos datos, encontrar aquellos que nos resulten relevantes para nuestro análisis resultó ser una tarea complicada. Existen, sin embargo, dos opciones válidas para crear el conjunto de tweets inicial, aunque ambas necesitan cierta supervisión manual.

El primero de los métodos propuestos es la búsqueda por palabras clave. Esta es una opción que proporciona la API de Twitter, donde se puede seleccionar, además, el idioma en que están escritos los tweets, español en este caso. Las palabras escogidas para hacer el filtrado dependerán del tipo de investigación que se quiera realizar. Para la detección de usuarios afines a ideologías yihadistas, podrían ser: *ISIS, yihad, Al Qaeda, yihadismo, Estado Islámico*, etc. Realizando esta búsqueda, nos encontramos con un problema de exceso de información y de información irrelevante.

La segunda opción sería la monitorización de tweets de un conjunto conocido de usuarios, que sean sospechosos y ya conocidos por las fuerzas de seguridad. En este caso, se obtendrían los tweets publicados por estos usuarios y a partir de ellos se procede a aplicar nuestro sistema.

En el artículo presentado, se han monitorizado un conjunto de tweets conteniendo palabras clave, haciendo posteriormente un filtrado manual, para eliminar aquellos que introducen ruido al sistema.

3.2. Resultados obtenidos sobre un conjunto de prueba

Una vez seleccionado el conjunto de tweets a analizar, se introducen como entrada para su análisis. Previamente se ha generado el diccionario con este mismo conjunto de textos, tal y como se ha explicado en la sección anterior.

Se ha escogido un tweet en particular para observar paso a paso cómo se realiza el análisis. El tweet escogido como ejemplo es el siguiente: *Unirme a la yihad fue lo mejor q hice :-)*

La primera fase que se aplica es el preprocesado. Se hace la normalización, detección de entidades, segmentación en tokens y etiquetado de los mismos, obteniendo los resultados de la tabla 1.

Para la fase de detección de sentimiento, es necesario obtener el análisis sintáctico del tweet, el etiquetado léxico y su representación en forma de árbol. Una vez hecho, se localizan las

Table 1. Preprocesado del tweet.

Tipo	Comienzo	Fin	Características
Token	0	5	kind=word, length=6, string=Unirme
Token	6	7	kind=word, length=1, string=a
Token	8	10	kind=word, length=2, string=la
Token	11	16	kind=word, lemma=grupo-terrorista length=5, string=yihad
Token	17	20	kind=word, length=3, string=fue
Token	21	23	kind=word, length=2, string=lo
Token	24	28	kind=word, length=5, string=mejor
Token	29	30	kind=word, length=1, string=q, string2=que
Token	31	35	kind=word, length=4, string=hice
Token	36	39	kind=emoticono, length=3, string=:-), type=EmoticonoFeliz

polaridades existentes en el diccionario creado previamente y también las estructuras que hemos señalado anteriormente, así como las entidades que haya en el tweet, y sobre las que se analiza la polaridad final.

En este caso, la entidad detectada es ”yihad”, que tiene una polaridad negativa. Además se encuentra la estructura ”unirse a la yihad”, que se considera negativa en su conjunto. La segunda parte del tweet expresa un sentimiento positivo hacia ”unirse a la yihad”, y por ello, se concluye que la polaridad final del tweet es negativa, con lo cual, para nuestro estudio, es un texto potencialmente peligroso, y así lo detectamos. Finalmente sólo tendríamos que extraer el autor de dicho tweet, que se encuentra almacenado en nuestra base de datos.

Otros ejemplos de textos analizados son los siguientes:

- *Alguien me explica como hacer una bomba lapa casera???? Es que me estoy iniciando en esto de la yihad* - Polaridad negativa
- *viva la yihad !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! si aqui todos somos amigos* - Polaridad negativa
- *El yihadismo es algo realmente horrible y debera desaparecer.* - Polaridad positiva

4. Conclusiones

En los últimos años, las redes sociales se han convertido en una nueva forma de comunicación y expresión para todo tipo de usuarios. Por ello, organizaciones y grupos terroristas, en concreto de ideologías yihadistas, han aprovechado estas redes para hacer propaganda, comunicarse o para reclutar y formar a nuevos seguidores. Esto hace que las fuerzas de seguridad y gobiernos de todo el mundo deban dedicar recursos para el análisis y monitorización de esta información en Internet, y así prevenir posibles amenazas. La prueba de concepto presentada en este artículo surge de esta necesidad, tratando de detectar potenciales usuarios peligrosos de forma automática, y facilitando así esta tarea. Se ha desarrollado un sistema basado en análisis de sentimiento con el fin de extraer aquellos tweets que expresen afinidad a este tipo de ideologías. Sin embargo, sigue siendo necesario una revisión manual de los resultados,

aunque simplifica mucho el trabajo y los recursos necesarios para este fin, que es el objetivo final del sistema desarrollado.

Referencias

1. Priego Moreno, A. El Estado Islámico. ¿Segunda parte de Al-Qaeda o algo nuevo? *Razón y fe* **2014**, *270*, pp. 491-504.
2. Péres-Ventura, O. La amenaza de Al Qaeda en España diez años después del 11-M. *Revista Aequitas* **2014**, *4*, pp. 389-409.
3. Jordan, J. The evolution of the structure of jihadist terrorism in Western Europe: the case of Spain. *Studies in Conflict and Terrorism* **2014** *37*, pp. 654-673.
4. Jordan, J.; Horsburgh, N. Mapping Jihadist Terrorism in Spain. *Studies in Conflict & Terrorism* **2005** *28*, pp. 169-191
5. Operaciones policiales contra el terrorismo yihadista en España (2015). http://www.seguridadinternacional.es/?q=es/content/operaciones-policiales-contra-el-terrorismo-yihadista-en-españ. Accedido el 17 de julio de 2015.
6. Flores-Sánchez, M.L. Internet como herramienta del Integrismo Yihadista. *Boletn de Informacin*, **2008**, *303*, pp. 23-56.
7. Arin, O. M. Redes sociales en Internet y el Estado Islámico. *VII Congreso del IRI/I Congreso del CoFEI/II Congreso de la FLAEI (La Plata)*, **2014**
8. CNN (2013). http://mexico.cnn.com/tecnologia/2013/04/28/las-formas-en-que-el-terrorismo-puede-surgir-desde-las-redes-sociales. Accedido el 23 de Julio de 2015.
9. Liu, B. Sentiment Analysis and Opinion Mining. *Synthesis Digital Library of Engineering and Computer Science, Morgan & Claypool Publisher*, **2012**.
10. Minqing, H. y Liu, B. Mining and summarizing customer reviews. *Proc. of the 10th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, **2004**, pp. 168-177.
11. Taboada, M., Brooke, J., Tofiloski, M., Voll, K. y Stede, M. Lexicon-based Methods for Sentiment Analysis. *Journal of the Computational Linguistics*, **2011**, *35*, pp. 267-307.
12. Fernández-Gavilanes, M., Álvarez-López, T., Juncal-Martínez, J., Costa-Montenegro, E. y González-Castaño, J. GTI: An unsupervised approach for sentiment analysis in Twitter. *Proc. of the 9th Int. Workshop on Semantic Evaluation (SemEval 2015)*, **2015**, pp. 533-538.
13. Padró, L. y Stanilovsky, E. FreeLing 3.0: Towards Wider Multilinguality. *Proc. of the 8th International Conference on Language Resources and Evaluation*, **2012**, pp. 23-25.
14. Brooke, J., Tofiloski, M. y Taboada, M. Cross-linguistic sentiment analysis: From English to Spanish. *Proc. of the Int. Conf. RANLP-2009*, **2009**, pp. 50-54.
15. Dell Amerlina Ríos, M. y Gravano, A. Spanish dal: A Spanish dictionary of affect in language. *Proc. of the 4th Workshop on Computational Approaches to Subjectivity, Sentiment and Social Media Analysis*, **2013**, pp. 21-28.
16. Cruz, F. L., Troyano, J. A., Ortega, F. J. y Enríquez, F. Automatic expansion of feature-level opinion lexicons. *Proc. of the 2nd Workshop on Computational Approaches to Subjectivity and Sentiment Analysis*, **2011**, pp. 125-131.

Sistemas de comunicaciones militares de banda ancha basados en tecnologías inalámbricas 4G

Fraga Lamas, Paula [1,*], Castedo Ribas, Luis [1], Morales Méndez, Antonio [2], y Camas Albar, José M. [2]

[1] Universidade da Coruña. E-mails: paula.fraga@udc.es, luis@udc.es.

[2] Indra Sistemas S.A. E-mails: ammendez@indra.es, jmcamas@indra.es.

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-mail: paula.fraga@udc.es.

Abstract: La necesidad de desarrollar nueva tecnología militar que confronte las carencias operacionales actuales y los retos emergentes en los despliegues modernos, junto con la madurez y evolución de las tecnologías de banda ancha 4G civiles, convergen en el desarrollo de un sistema MBWCS (*Military Broadband Wireless Communication System*). La viabilidad de las tecnologías de banda ancha, WiMAX, LTE y WLAN, debe examinarse en ciertos escenarios tácticos para probar su potencial y concluir cómo optimizar el diseño de la forma de onda minimizando el coste de implementación de las modificaciones. Este es el objetivo del grupo de estudio exploratorio ET-068 – "*LTE vs WiMAX for Military Applications*" de la OTAN, sobre el que se respaldan los resultados que se exponen en este artículo.

Keywords: 4G; LTE; WiMAX; WLAN; NATO; NNEC; NCW; MBWCS; C2; QoS.

---

1. Introducción

Este trabajo está motivado por la exigencia de desarrollar tecnología militar recurriendo a la ventaja estratégica que representa el uso de tecnologías de banda ancha validadas en escenarios civiles. Las especificaciones actuales de estándares comerciales obedecen a distintos objetivos y prioridades, por tanto las formas de onda civiles deben modificarse para satisfacer las necesidades de los despliegues tácticos. La viabilidad potencial de las tecnologías 4G es objeto de estudio por los autores desde el año 2010, con un análisis de aplicabilidad de la tecnología WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) en entornos militares financiado por un proyecto del programa COINCIDENTE.

Con posterioridad se continuó el trabajo analizando la última versión del estándar, WiMAX 2 (IEEE 802.16m) [1] y añadiendo otros estándares inalámbricos prometedores como LTE-A (Long Term Evolution – Advanced, Release 11) [2,3] o WLAN (Wireless LAN, IEEE 802.11-2012) [4]. Como se puede ver en la **Tabla 1**, WiMAX/LTE/WLAN tienen características técnicas similares pero como el origen de su evolución difiere presentan cierta divergencia en múltiples aspectos.

Características	**IEEE 802.16m**	**LTE-A (Release 11)**	**IEEE 802.11-2012**
Orientación inicial de la tecnología	Arquitectura all-IP, inicialmente WiMAX fijo. Orientado a datos con posterior evolución a voz.	Centrado en voz, gradualmente progresa a servicios de datos (GSM/GPRS/EGPRS/UMTS/HSPA)	Compatibilidad entre dispositivos
Bandas de frecuencia	LOS: 10-66 GHz NLOS: 2-11 GHz bandas con/sin licencia	700,1700,1900, 2100, 2500 y 2600	2.4 y 5 GHz
Tamaño FFT	1.25 – 28 MHz / 128-2048	128-2048	20 MHz – 40/64 o 128
Esquema de acceso múltiple	DL: OFDMA/UL: OFDMA	DL: OFDMA/UL: SC-FDMA	OFDM (200 canales), DSSS, CSMA/CA
Ancho de banda nominal	5, 7, 8.75, 10, 20 y hasta 100 MHz.	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 y hasta 100 MHz	20 y 40 MHz
Cobertura	Hasta 50 km	Hasta 100 km	>200 m
Movilidad	Max 350 km/h	Max 350 km/h	200 km/h (IEEE 802.11p)
Feedback CSI	Base *codebook* con matriz de covarianza de canal *long-term* y *sounding*.	*Long-term* CSI y *short-term* CSI (i.e. *sounding*)	Matriz CSI y *sounding*
Ancho de banda útil	En 10 MHz, 864 subportadoras × 10.9375 kHz (espaciado subportadora) = 9.45 MHz (ocupación del espectro= 94.5%)	En 10 MHz, 600 subportadoras × 15 kHz (espaciado subportadora) = 9 MHz (ocupación del espectro= 90%)	56 subportadoras en 20 MHz 114 subportadoras en 40 MHz
Tasa de transmisión pico	UL: 200 Mbit/s en 20 MHz DL: 500 Mbit/s en 20 MHz	UL: 1.5 Gbit/s en agregado 100 MHz DL: 3 Gbit/s en agregado 100 MHz	75 Mbit/s en 5MHz
Esquemas multi-antena *IMT-Advanced*	*Multi-user MIMO/Beamforming*, sin límite de antenas.	*Single-user, multi-user MIMO/Beamforming*, Transmisión multipunto coordinada.	*MIMO/Beamforming* (máximo 4 antenas)
Duración trama	5 ms, con subtrama y supertrama (20 ms)	10 ms, longitud de subtrama: 1 ms	Variable
Soporte para movilidad	Alta velocidad	Alta velocidad	Estacionario/*pedestrian*
HARQ	Soportado con redundancia incremental y *chase combining*	Soportado con redundancia incremental	No soportado
Latencia	Capa de enlace < 10 ms, *Handover* < 30 ms	Capa de enlace < 5 ms, *Handover* < 50 ms	*Handover* < 50 ms (IEEE 802.11f and 802.11r)

Tabla 1. Principales características de las tecnologías analizadas.

En este contexto nace el grupo exploratorio ET-068 – "*LTE vs WiMAX for Military Applications*" de la OTAN, formado por un consorcio compuesto por los autores de este artículo y un conjunto de expertos internacionales procedentes de las siguientes entidades: CRC (Canadá), FKIE (Alemania) y HAVELSAN (Turquía). El presente artículo es una continuación de la publicación expuesta en el congreso DESEi+d 2013 [5] que resumía las contribuciones efectuadas hasta la fecha por el grupo ET-068. El principal objetivo de esta nueva participación es presentar los resultados finales y, por consiguiente, las consideraciones sobre la óptima definición del sistema MBWCS. Por completitud, en esta nueva revisión se resumirá también la definición de escenarios relevantes en los que las tecnologías WiMAX/LTE/WLAN puedan ser aplicables dentro de los despliegues tácticos de los países de la OTAN, una síntesis de los principales requisitos operativos y técnicos de los escenarios

detectados, y los principales resultados del subsiguiente análisis de aplicabilidad. Como conclusión se expondrá una propuesta de hoja de ruta para su implementación, despliegue y evolución.

2. Escenarios de aplicación

El paradigma NATO NNEC/NCW, las necesidades operacionales nacionales y una metodología "basada en escenario", han sido los fundamentos para la selección del subsistema táctico de distribución de datos (DSS) como escenario principal de operación del sistema MBWCS. El sistema táctico debe dar soporte a los subsistemas de radio de combate (*Combat Net Radio*, CNR) mediante perfiles específicos y mitigar los huecos potenciales prestando apoyo aéreo (*Close Air Support*, CAS). El sistema MBWCS está claramente orientado a los siguientes despliegues terrestres:

Escenario A: comunicación inalámbrica entre sistemas C2 a nivel de Batallón y Brigada. La distancia máxima de un solo salto entre centros de mando es de unos 50 km. La movilidad existirá a nivel del centro de mando de Batallón, mientras que el nivel del centro de comando de Brigada carece de movilidad. Se considera que el esquema de comunicación sigue una topología de malla (mesh) con condiciones LOS (*Line-of-sight*). El rango a cubrir en un salto se sitúa entre 100 – 150 km.

Escenario B: comunicación inalámbrica entre sistemas C2 a nivel de Compañía y Batallón. La máxima distancia en un solo salto será de aproximadamente 20 km. El entorno es típicamente rural con LOS. La movilidad puede existir en los dos extremos con topología de malla.

Escenario C: infraestructura de comunicaciones inalámbrica dentro de un puesto de mando de despliegue rápido, habitualmente a nivel de cuartel general y Batallón, equivalente al NATO Batallion Command centre. Escenario de carácter fijo que permite la cobertura en un radio de 2 km. Se espera que las modificaciones tácticas necesarias sobre las tecnologías COTS existentes sean despreciables.

Escenario D: infraestructura con comunicaciones a nivel de Compañía con movilidad limitada y una cobertura de 5 km. Es soportada por un vehículo sirviendo como un punto de acceso central a la red con mástiles de antena que se elevan, o a través de un aeróstato, con un punto de acceso COTS.

Escenario E: comunicaciones a nivel de Compañía con movilidad completa. Para soportar el despliegue de pelotón o compañía/coalición, un grupo puede abandonar una infraestructura de red fija y formar una MANET. Los requisitos de seguridad y robustez a la interferencia serán primordiales.

3. Requisitos operativos

Esta sección cita los requisitos operativos primordiales agrupados por capacidades operativas:

Características del despliegue: sus singularidades se deben en gran medida al nivel de la jerarquía de la unidad desplegada. El carácter general es estático o semi-estático en las grandes unidades: escenarios A y B; con tiempos de instalación no restrictivos, aproximadamente 20 minutos a nivel de Brigada. En las pequeñas (escenarios C, D y E) se requiere alta movilidad y el tiempo de despliegue a excepción de las antenas no debe ser superior a 10 minutos. MBWCS debe permitir la integración de sistemas C4ISR (*Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance).*

Gestión del sistema y herramientas de planificación: el sistema MBWCS debe proporcionar una GUI simple capaz de soportar la gestión local y remota, y la transferencia de la gestión de la red

(información de la configuración de la misión) de un C2 a otro al mismo nivel o superior. La gestión debería configurarse a nivel de Brigada con opciones limitadas en niveles inferiores.

Servicios soportados y aplicaciones: el sistema MBWCS debe proporcionar servicios con distinta prioridad como PTT (Push-To-Talk), mensajería instantánea, datos críticos e información táctica, mensajes C2, BFT, ILS, mapas/imágenes de alta resolución, video y mensajes electrónicos.

Capacidades de red: el sistema MBWCS debe soportar el concepto NNEC mediante NII (*Networking and Information Infrastructure*). Para ello es necesaria una arquitectura IP con mecanismos de *soft handover* en los escenarios B, C y E.

Topologías de red soportadas*:* el sistema MBWCS debe soportar enlaces punto a punto, punto-multipunto, capacidad mesh con auto-descubrimiento y enrutado automático eficiente, y redes MANET de alto rendimiento en despliegues rápidos. Los requisitos de conectividad incluyen comunicación vertical en la cadena de comando, horizontal en cada nivel, horizontal en cada nivel entre formaciones adyacentes, y horizontales y verticales fuera de la cadena de comando. La red táctica IP debe ser de alta velocidad, extensible y fiable con capacidad de back-up y reconfiguración, pudiendo soportarse capacidades relay en el mismo, y distintos niveles de jerarquía operando a distintas bandas de frecuencia. El tamaño de la red considerará usuarios por estación base de 23 para los escenarios A y B, y entre 5- 15 usuarios para los escenarios C, D y E.

Capacidad de movilidad: los C2 de Brigada se soportan sobre una infraestructura fija, mientras que los de Batallón y Compañía son nodos de comunicación móviles (*Armored Combat Vehicles*, ACV) con velocidades de hasta 150 km/h, o helicópteros de apoyo con una velocidad de 400 km/h. Un soldado debe ser capaz de unirse a la red con una velocidad de hasta 5 km/h.

Seguridad

INFOSEC: el sistema MBWCS debe soportar la clasificación de seguridad nivel 3 (NATO SECRET) para grandes unidades y nivel 2 (NATO CONFIDENTIAL) para pequeñas unidades.
COMSEC: el sistema MBWCS debe utilizar y adaptarse a varios mecanismos basados en soluciones criptográficas nacionales o de coalición.
TRANSEC: el sistema MBWCS debe soportar medidas EPM, i.e. LPI, LPD y resistencia al *jamming*.
NETSEC: el sistema MBWCS debe soportar mecanismos de protección frente a ataques (e.g. envenenamiento de caché, bomba de mensajes, *black hole, replay, wormhole*…).

Robustez: MBWCS debe ser robusto frente al *jamming* y usar técnicas de radio cognitiva proporcionando mecanismos de *fast switching* entre la tecnología escogida y comunicaciones de back-up en un evento de fallo. Debe considerarse el soporte de sistema de alimentación ininterrumpida para garantizar 15 minutos de energía en pequeñas unidades y del orden de magnitud de 1 a 2 horas para las grandes unidades, con un uso continuo de la plataforma durante 3 meses sin interrupción.

Bandas de frecuencia: el sistema MBWCS debe considerar la operación en multibanda, NATO IV (4.4 – 5 GHz) y NATO I (225 – 400 MHz).

Cobertura: el radio de acción de las Brigadas es aproximadamente 150 km. La máxima distancia en un salto entre los centros de comando de Brigada y Batallón es aproximadamente 60 km bajo condiciones LOS. Entre los C2 de Batallón y Compañías está limitado por el radio de acción de las Compañías, que es aproximadamente 20 km. En ambas situaciones debe incluirse capacidad relay

en condiciones NLOS. Las comunicaciones entre Brigada y Batallón se realizan en áreas suburbanas, mientras que entre Batallón y Compañías se consideran también áreas rurales.

Interoperabilidad: el sistema MBWCS debe ser interoperable tanto entre las fuerzas nacionales como en coalición, y en términos de seguridad y servicios. Asimismo, debe ser cargable en un dispositivo reprogramable/multi-modo.

Plataformas objetivo: Deben considerarse plataformas vehiculares, barcos de guerra o helicópteros, plataformas específicas fijas (principalmente a nivel de Brigada), despliegues portátiles (*manpack o hand-held*) a nivel de Compañía y pelotones. El sistema desplegará antenas externas para configuraciones vehiculares o fijas, y antenas integradas para las portátiles. Los procedimientos, valores de diseño y equipamiento deberán verificar las condiciones de los estándares MIL-STD 810G, MIL-STD 461-F, MIL-STD-1275, entre otros.

4. Requisitos técnicos y análisis de viabilidad

Tras un examen exhaustivo de los requisitos operativos, los principales requisitos técnicos fueron recopilados y divididos en consideraciones sobre la plataforma (PTF) y consideraciones sobre la forma de onda (WF). A su vez, fueron analizados según las capas afectadas por el requisito, es decir: capa PHY, MAC, red o CL (*cross-layer*), haciendo especial hincapié en las consideraciones sobre seguridad disponibles en las últimas versiones de los estándares elegidos. Una vez examinado con detalle cómo se cumple cada requisito, las conclusiones se representan en una tabla de *compliance* para obtener una visión general de WiMAX/LTE/WLAN: NC (*Non compliant*), PC (*Partially compliant*), C (*Compliant*) o U (*Unkown*) si no se conoce si se verifican todas las especificidades requeridas. Las modificaciones necesarias para que se cumplan los requisitos NC y PC fueron también evaluadas en términos de impacto y coste de implementación en cada tecnología. Las principales diferencias en el comportamiento de los estándares considerados pueden verse resumidas en la **Tabla 2.**

CAPACIDAD	REQUISITOS TÉCNICOS	WIMAX	LTE	WLAN
Despliegue	**PHY**: Modulaciones eficientes en potencia	PC	PC	NC
	PHY: Esquemas de codificación eficientes	C	C	C
	CL: Gestión de potencia con distintos modos de operación y tecnologías *fast-switching*	C	C	C
Gestión	**MGT**: API basada en el estándar POSIX que contemple distintos niveles de permisos de usuarios y permita modificar QoS, AMC, distintas frecuencias de transmisión…	NC	NC	NC
	MGT: Arquitectura de sistema interactiva (por ej. modelo-vista-controlador) que permita la reconfigurabilidad completa de la onda mediante una API específica	NC	NC	NC
	MGT: Parámetros predefinidos en el perfil de usuario para facilitar configuración	NC	NC	NC
	PHY: Sensado del espectro o uso de redes de sensores para proporcionar feedback a los planificadores del sistema	PC	PC	PC
Servicios	**CL**: La capa MAC soportará tráfico con tasas de datos altas, soportando simultáneamente streaming de video, tráfico de voz prioritario así como e-mail, chat, transferencia de ficheros tácticos sobre el mismo canal…	C	C	C
	NEC: Soporte para servicios IP	C	C	C
	MAC: Esta capa incluyendo el planificador , y el TTI (Transmission Time Interval) deben contemplar los requisitos de tiempo real	C	C	PC

	CL: Conexiones VoIP	C	PC	C
	CL : Servicios de voz con latencia < 300 ms Transferencia de video con tasas de datos > 1Mbps y latencia < 200 ms Transferencia de datos con baja criticidad con tasa > 9.6 Kbps y latencia < 1 seg Transferencia de datos críticos con tasa de datos > 384 Kbps y latencia < 200ms	C	C	C
	MAC: Algoritmos específicos en el planificador para proporcionar la QoS necesaria según el tipo de tráfico contemplado en cada escenario	PC	PC	PC
	NET: Características adecuadas para soportar la QoS necesaria a nivel de red: ancho de banda, retardo, disponibilidad, seguridad…	PC	PC	PC
	CL: Funciones de gestión de la congestión, *traffic shaping* y clasificación de paquetes	C	C	C
	NET: La información de enrutado se priorizará por encima de cualquier otro tráfico	PC	NC	C
Capacidades de red	**NET**: Protocolos IPv4/IPv6 para permitir el concepto NNEC con capacidades de *broadcast*, *unicast* y *multicast*	C	C	C
	NET: Servicios TCP/UDC así como aplicaciones como SIP (*Session Initiation Protocol*) o la arquitectura IMS (*IP Multimedia System*)	C	C	C
	NET: Técnicas de compresión de cabeceras: PHS (*Packet Header Suppresion*), ROHC (*Robust Header Compression*) o ECRTP (*Enhanced Compressed Real Time Protocol*)	C	C	NC
	MAC: Técnicas de retransmisiones rápidas, i.e. ARQ (*Automatic Repeat Request*)	C	C	PC
	MAC: Capacidades avanzadas de relay	C	C	C
	CL: Técnicas de *cross-layering*	C	C	PC
	NET: Gestión de la movilidad en la capa de red (Escenarios B,C y E), puede hacerse mediante protocolos como MIPv6 (*Mobile IPv6*), HMIPv6 (*Hierarchical mobile IPv6*), FMIPv6 (*Fast mobile IPv6*) o Proxy MIPv6	C	C	PC
Topologías de red	**CL**: Topología MANET con soporte para entornos de red dinámicos entre convoys, personas… donde los nodos puedan agregarse/dejar la red y la conectividad entre los nodos pueda cambiarse frecuentemente	PC	NC	NC
	CL: Protocolos de red con capacidades *ad-hoc*, *self-healing*, *self-forming* y optimización de rutas	PC	PC	C
	NET: Protocolos de enrutado MANET que maximicen la eficiencia de la red: operación distribuida, *loop-freedom (open, closed)*, operación proactiva en el caso de suficiente ancho de banda y permiso de *energy supply*, i.e. QOLSR, Fast-OLSR, TBRPF, OSPF, OLSRv2… *operación híbrida y seguridad*	NC	NC	PC
	MAC: Mecanismos de petición y asignación de ancho de banda	C	C	PC
	CL: Control de potencia y mecanismos AMC	C	C	C
	CL: Capa MAC con soporte de entrada en la red, *ranging*, gestión de claves, *multicast*… de forma acorde a la topología de red	C	PC	C
Movilidad	**PHY**: Estructura de trama y parámetros apropiados (i.e., señales de referencia, prefijo cíclico, espaciado entre subportadoras, retardo temporal…) con el objetivo de mitigar errores debido al efecto Doppler.	C	C	NC
	MAC: Capacidad de establecer distintos enlaces simultáneamente para el *handover*	NC	NC	NC
	PHY: Capacidad de proporcionar métricas, por ejemplo, SINR y RSSI, para medir la calidad del enlace	C	C	PC
	MAC: Uso de métricas específicas en la toma de decisiones de *handover*	C	C	C
	CL: Infraestructura *backbone* para la gestión de la movilidad para los mecanismos de *handover* (también requisito de PTF)	C	C	U
Seguridad	**TRANSEC**, técnicas LPD (*Low Probability of Detection*): salto en frecuencia o espectro ensanchado	NC	PC	NC
	PHY: TRANSEC y técnicas LPD, utilizar antenas inteligentes y/o sistemas MIMO para explotar el DOA (*Direction Of Arrival*) (también requisito de PTF)	C	C	NC
	TRANSEC, técnicas LPI (*Low Probability of Interception*): usar generadores de secuencia PN seguros (también requisito de PTF)	PC	C	NC
	TRANSEC, técnicas LPI: *scrambling* de los datos y la información de control (también requisito de PTF)	PC	C	C
	CRYPTOSEC: Cifrado, infraestructura AAA, y algoritmos de gestión de claves adaptables a las necesidades nacionales o de coalición, proporcionando soporte NATO Suite B (también requisito de PTF)	PC	U	C
	CRYPTOSEC: Autenticación mutua para BSs y SSs.	C	C	PC
	CRYPTOSEC: MBWCS debe ser reconfigurable y reprogramable dando soporte a dispositivos de seguridad internos y externos de cifrado (IPSEC, firma digital y posibilidad de almacenamiento de material crítico volátil)	PC	C	NC

	(también requisito de PTF)			
	MGT: Soporte de operaciones OTA, e.g. transmisión de material de seguridad usando OTAR (*Over-The-Air Rekeying*)	C	NC	PC
	INFOSEC: Seguridad NATO Nivel 3 considerando protocolos de seguridad IP (IPSec/HAIPE) y protocolos de tunnelling (NAT, Transición IPv4/IPv6)	C	C	C
Robustez	**MAC:** Modulación y codificación adaptativa y/o estrategias HARQ/ARQ para ofrecer robustez a la interferencia	C	C	PC
	PHY: MBWCS debe ser compatible con las máscaras espectrales de emisión para evitar la interferencia *co-site*	C	C	C
	PHY: Técnicas de cancelación de interferencias para mitigar el *jamming*	PC	PC	NC
	CL: Algoritmos y técnicas de procesado de señal para rastrear de forma activa señales e instanciar algoritmos en la capa PHY y de red, para permitir el cambio de perfiles de transmisión (i.e. frecuencia de transmisión)	NC	C	PC
	CL: Algoritmos de señalización MAC o red que proporcionen los suficientes indicadores de calidad del canal para permitir la rápida adaptación de la red	C	C	C
	NET: Frente a una pérdida en una señal de sincronización externa, i.e. GPS/GNSS, el sistema deberá auto-configurarse y mantener la conectividad de red	C	C	C
	PHY: La red debería configurarse en todos los niveles de la arquitectura para proporcionar redundancia. Técnicas MIMO y/o *beamforming* mejorarán el rendimiento del enlace	C	C	C
	CL: Soporte para algoritmos de control de potencia y modos *sleep/idle*	C	C	C
	CL: Capacidad de recuperación y *self-healing*, con el objetivo de que la pérdida de por ejemplo, un enlace no afecte al rendimiento de la red	C	PC	C
	PHY: Codificación FEC (*Forward Error Correction*) de canal diseñados para aumentar la robustez	C	C	C
Bandas frec	**PHY:** Perfil específico diseñado para la banda NATO I basado en anchos de banda limitados (i.e. 1.25 MHz) y modulaciones uniportadora	NC	NC	NC
	PHY: Perfil específico diseñado para la banda NATO IV basado en anchos de banda grandes (i.e. 20 MHz) con modulaciones multiportadora	PC	NC	NC
Cobertura	**PHY:** Establecer enlaces en condiciones LOS y NLOS	C	C	PC
	CL: Tecnologías relay en las capas MAC y RED, pudiendo usar antenas dirigidas para aumentar la cobertura entre dos nodos sin usar nodos intermedios	C	C	C
	CL: La capa PHY y MAC deben dar el soporte adecuado a la tecnología relay usada	C	C	C
	CL: Topología mesh para las comunicaciones a nivel compañía siendo capaces de enrutar o cambiar el tráfico de los nodos para extender la cobertura	C	PC	C
	PHY: Asignar un canal de baja frecuencia con la opción de baja tasa de datos (cambiando a un esquema de modulación más robusto) para aumentar la cobertura entre dos nodos sin usar nodos intermedios	NC	NC	PC
	PHY: Testado según los modelos de canal ITU-R *recommendation* M.1225 y IMT-*Advanced* M.2135-1 para escenarios rurales, suburbanos y costeros	NC	NC	NC
Interoperabilidad	**CL:** Contemplar la interoperabilidad en la definición de las funcionalidades de las capas PHY, MAC y NET y el concepto de forma de onda. Por ejemplo, poder considerar limitaciones físicas adicionales, propagación en el enrutado o la definición de un conjunto de protocolos de transmisión adecuados	C	C	C
	NET: Protocolos IP para dar soporte a ciertos protocolos/aplicaciones en las capas superiores	C	C	C
	CL: Consumo reducido para configuraciones *man-pack* or *hand-held* (también requisito de PTF)	C	C	C
Plataforma	**PHY:** Los frontales RF de las plataformas soportarán tecnología MIMO. Las configuraciones *hand-held* pueden considerar como opcional su soporte (también requisito de PTF)	C	C	C

Tabla 2: Análisis de aplicabilidad de WiMAX/LTE/WLAN a los escenarios tácticos definidos.

Se puede concluir que las tecnologías 4G cumplen gran parte de las necesidades detectadas en estos escenarios. Al mismo tiempo, la tecnología WLAN requerirá más modificaciones que WiMAX 2 y LTE-A. Ambas verifican los requisitos de forma similar aunque se ha detectado la necesidad de las siguientes modificaciones: cambiar el diseño de la capa PHY para verificar los requisitos TRANSEC, salto en frecuencia y espectro ensanchado (sólo incluidos en IEEE 802.11-2012 en 2.4 GHz),

proporcionar movilidad en ausencia de infraestructura (MANET), modificaciones en la pila de protocolos de los estándares para dar soporte a redes MANET, establecer distintos enlaces simultáneos durante el *handover*, inclusión de modulaciones diferenciales, soporte para las bandas de la OTAN, necesidad de incluir técnicas avanzadas de cancelación de interferencias, testeo previo en los escenarios previstos acorde con modelos ITU (ITU-R M.1225, IMT-*Advanced* M.2135-1), usabilidad en plataformas SDR, proporcionar una API basada en el estándar POSIX que permita la reconfigurabilidad total de la forma de onda, entre otras. También se han mostrado vulnerabilidades en el framework de seguridad de todas las tecnologías y la necesidad de tomar decisiones adicionales de diseño e implementación que no están especificadas en los estándares.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos promueven la definición y desarrollo de una forma de onda táctica 4G que combine los tres estándares analizados considerando sus principales ventajas y teniendo en consideración las peculiaridades de los cinco escenarios descritos. El objetivo que se persigue es minimizar el número y complejidad de las modificaciones necesarias optimizando métricas como el rendimiento o la seguridad.

Para las conclusiones finales se ha tenido en cuenta información de otros desarrollos actualmente en marcha, a nivel internacional y OTAN (COALWNW, ESSOR…), para ver cómo se están cubriendo las carencias detectadas. Este análisis inicial deriva en una propuesta de hoja de ruta para la implementación de una nueva forma de onda, su despliegue, integración y evolución. Se propondrá un RTG específico de la OTAN para profundizar en el análisis llevado a cabo en este estudio.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el GTEC (Grupo de Tecnología Electrónica y Comunicaciones), Xunta de Galicia (R2014/037) e Indra Sistemas S.A. Los autores agradecen a Colin Brown, Mehmet Hayri Kucuktabak y Matthias Tschauner su colaboración en el grupo IST-ET-068 (STO-OTAN).

Referencias

1. IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std 802.16-2012 (Revision of IEEE Std 802.16-2009).
2. Dahlman, E.; Parkvall, S.; Sköld J. 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband; Academic Press, 2011.
3. 3GPP TS 36 300, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access; Overall Description: Stage 2, Release 11, v11.6.0 (2013-06).
4. 802.11-2012- IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
5. Fraga Lamas, Paula; Morales Méndez, Antonio; Castedo Ribas, Luis; Camas Albar, José M. Actas: Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad – DESEi+d 2013, Estudio comparativo de aplicabilidad de tecnologías inalámbricas de banda ancha civiles en entornos militares, 2013.

Sistemas de información para la anticipación y prevención en materia de bioseguridad en la industria alimentaria

Pinazo-Sánchez, José Miguel[1,*], Martínez-Simarro, David[2]

[1] Técnico del Dpto. de Tecnologías de la Información de ainia. Email: jmpinazo@ainia.es (JPS)
[2] Jefe del Dpto. de Tecnologías de la Información de ainia; Email: dmsimarro@ainia.es (DMS)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: jmpinazo@ainia.es (JPS);

Abstract:

A diferencia de la seguridad alimentaria, centrada en ataques accidentales, el objetivo de la defensa alimentaria es la protección de los productos alimenticios contra la adulteración intencionada por agentes NBQRF (definición USDA). A pesar de que el concepto se originó en EEUU, existen claros ejemplos referenciados en la literatura que demuestran que el sistema agroalimentario europeo es también vulnerable. Es por ello que, a pesar de que el APPCC y los códigos de BBPP, unidos a los controles de la Administración, han sido suficientes en materia de seguridad alimentaria, resulta necesario implantar otros mecanismos de control accesorios, o cambiar la filosofía de los existentes para obtener un óptimo nivel de protección frente a la contaminación malintencionada.

Este artículo se centrará en la descripción de una instalación moderna, hasta cierto punto futurista, de una empresa de alimentación que, a través del uso de los recientes avances en materia de tecnologías de la información y comunicaciones, es capaz de anticiparse y prevenir las amenazas malintencionadas, en contraposición al tradicional enfoque de empresa centrada en la reacción y respuesta.

Keywords: seguridad alimentaria, defensa alimentaria, protección alimentaria, toxiinfección alimentaria, tecnologías, sistemas de información, vulnerabilidad, inteligencia artificial, interoperabilidad

1. Introducción

Los últimos avances en materia de tecnología de sensorización y detección rápida microbiológica, química y/o radiológica, unida a las capacidades de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones de recolección y procesado de grandes cantidades de información (Big Data), detección de patrones, automatización de mecanismos de decisión y respuesta automática (inteligencia artificial), geolocalización, modelos de simulación, colaboración y coordinación, abre un cambio de paradigma en los sistemas empresariales hacia sistemas híbridos de bioseguridad (seguridad-defensa) que minimicen tanto el riesgo de la industria alimentaria como del consumidor.

Las tecnologías de posicionamiento (GPS), los sistemas de monitorización de entornos globales (GIS), proveen a las empresas alimentarias de la capacidad de escanear constantemente el entorno en busca de indicadores de amenaza a la bioseguridad de sus productos: aprovisionamiento, mercado, procesos. En la misma línea, una nueva generación de sistemas software inteligentes y mecanismos de aprendizaje automático y algoritmos adaptativos pueden ayudar no sólo en la identificación y detección temprana de señales y eventos de bioterrorismo, sino también apoyar en la toma de decisiones en cuanto a la respuesta óptima a cada situación. Por otra parte, las tecnologías de simulación y visualización permiten a las empresas comprender mejor el impacto y la propagación del riesgo en su cadena. Para los gerentes es posible establecer escenarios y simular una gran variedad de eventos de contaminación de alimentos, guiando al usuario gráficamente a través de las posibles consecuencias derivadas del ataque malintencionado (inoperatividad, pérdidas económicas), incluso asistiéndole en los planes de acción.

Este tipo de tecnologías están siendo extrapoladas desde otros sectores para probarlas en el sector alimentario en uno de los mayores proyectos de seguridad financiados jamás a nivel europeo

2. Materiales y Métodos.

EDEN, "End-user driven DEmo for cbrNe", es un proyecto europeo que ha sido financiado por el FP7 Séptimo Programa Marco Europeo con un presupuesto cercano a los 25 millones de euros y más de 40 socios, entre los que se encuentra BAE Systems, EADS, Indra, Fraunhofer EMI. El objetivo del proyecto es la puesta en común de conocimiento, desarrollo e implementación de sistemas de información interoperables para mejorar la prevención y actuación frente a amenazas CBRNe, liderando ainia conjuntamente con Tecnoalimenti el ámbito alimentario.

3. Resultados y Discusión

3.1. Protección de la cadena alimentaria.

En idioma inglés los conceptos de "*food security*" y "*food safety*" aparecen claramente diferenciados en bibliografía, refiriéndose el primero a garantizar el acceso seguro a los alimentos, mientras que el segundo atiende a la inocuidad de los alimentos [1]. En castellano estos dos términos se traducen general e indistintamente como seguridad alimentaria. En nuestro caso, entendemos seguridad alimentaria como la producción, manejo, preparación, almacenamiento y calidad de los alimentos en la forma que garantice su salubridad, previniendo toxiinfecciones alimentarias, incluyendo también la trazabilidad del producto de la granja a la mesa. Como tal, la seguridad alimentaria así entendida engloba ambos conceptos anglosajones, ya que tanto salubridad como trazabilidad contribuyen en sí mismo a la disponibilidad del alimento.

Los recientes escándalos alimentarios, sobre productos cárnicos adulterados con carne de caballo, leche contaminada, bacterias en vegetales y productos con dioxinas, antibióticos y melamina han evidenciado la vulnerabilidad de la cadena de suministro y la necesidad de proteger al consumidor frente a casos de contaminación del alimento que puedan poner en riesgo su salud, pero no solamente natural o accidental (caso del que se ocupaba la seguridad alimentaria) sino también malintencionada. Es aquí donde surge un nuevo concepto evolucionado del de seguridad alimentaria: la defensa alimentaria (traducido del *food defence* en inglés), que añade un factor cualitativo y se centra en la provisión de alimentos sanos y seguros libres de contaminantes añadidos de forma intencionada [2]. La defensa alimentaria conlleva pues las actividades relacionadas con la protección del suministro de alimentos contra actos deliberados o intencionales de contaminación o manipulación. El Servicio de Seguridad Alimentaria e Inspección del USDA la define con más detalle refiriéndose a los posibles agentes contaminantes, concretando que consiste en la protección de los productos alimenticios contra la adulteración intencionada por agentes biológicos, químicos, físicos o radiactivos.

Aunque existen acepciones en algunas definiciones vinculadas a bioterrorismo y contraterrorismo, cabe recalcar que no siempre son terroristas los causantes de la contaminación malintencionada. Por ejemplo en el caso reciente de adición de melamina a leche en China por parte de algunos granjeros que causó la muerte a 5 personas y desencadenó más de 60.000 casos de cálculos renales en niños. Se concluye pues que la defensa alimentaria aplica por tanto a cualquier acción de cualquier persona (incluyendo empleados desleales) que pueda provocar daño con materiales que no se encuentran de manera natural o que no se suelen controlar de forma sistemática en la cadena de abastecimiento, producción y suministro de productos alimenticios.

Aunque el concepto es todavía incipiente en Europa, la defensa alimentaria se ha convertido en un asunto estratégico. Ya en 2010, el BSI (*British Standard Institution*) publicó el PAS (*Publicy Available Specification*) *96 – Defending Food and Drink*. Dicho documento manifestaba que "la industria de alimentación y bebidas en Reino Unido pudiera estar amenazada por grupos con motivaciones ideológicas". Tras ello, en 2011, los consejeros de seguridad del gobierno británico avisaron a los principales fabricantes y distribuidores acerca de la posibilidad de que grupos terroristas pudieran estar intentando envenenar los suministros de alimentos vendidos en el país, con el objetivo de causar muerte. El aviso surgió del CPNI (*Centre for the Protection of National Infrastructure*). Recientemente, en Noviembre de 2014, tuvo lugar el simposio "*Protecting the Consumer by*

Enhancing Food Safety and Security", organizado por IAEA (*International Atomic Energy Agency*) y FAO. Entre los asuntos relevantes que se analizaron por parte de organizaciones internacionales, científicos, políticos, expertos y Estados Miembros merece la pena destacar los relacionados con la detección de alimentos inseguros, la lucha contra el fraude, el etiquetado incorrecto intencionado y la irradiación de alimentos.

El concepto de protección de la cadena alimentaria surge como combinación de los esfuerzos de seguridad y defensa alimentaria.

3.1. Casos de la industria alimentaria

A pesar de lo que pueda parecer, las acciones de contaminación, ya sea intencionales o no intencionales, que han tenido una gran repercusión en cuanto a enfermedad o muerte se han ido sucediendo con relativa frecuencia en la industria alimentaria. Estos eventos han incrementado nuestra percepción del riesgo y nuestro sentido de vulnerabilidad para con las empresas del sector. Como ejemplos referenciados:

- El brote clasificado finalmente bajo *Salmonella Saintpaul* en 2008 que causó enfermedad en más de 1.400 personas en los Estados Unidos y unas pérdidas por valor de 90 millones de euros en la industria del tomate [3];

- Los brotes de *E. coli* O104:H4 causantes de la infección en Alemania en 2011, con un total de 3.910 personas enfermas en Europa y Noruega, de los cuales murieron 46, resultando en la prohibición por parte de Rusia de la importación de vegetales europeos[4];

- Los brotes de Listeria en Canadá, 2008, asociados a jamón cocido fileteado que causó 56 casos de infección, 22 víctimas y 20 millones de dólares canadienses de pérdidas [5];

- El caso de las ensaladas en 2010, donde la central de inteligencia de Estados Unidos sugería que un grupo terrorista estaba planeando un ataque en grandes complejos hoteleros para contaminar la comida preparada. Se pensaba que el agente a emplear sería ricino y cianuro.

- El trabajo de lo que se calificó por parte de ciertos "idiotas" en Calgary respecto a la contaminación intencionada de todo tipo de alimentos con pedazos metálicos: naranjas, batidos, comida preparada.

- La alerta por contaminación de agua mineral en Italia en 2003 causada por un hombre misterioso con un líquido jabonoso.

A pesar de que en seguridad alimentaria el estándar de APPCC ha funcionado bien, existe todavía cierto desconocimiento de métodos y tecnologías aplicables al caso de defensa alimentaria que ayuden a anticipar, prevenir, detectar y actuar de forma más rápida frente a ataques malintencionados. La vulnerabilidad en el caso de ataques malintencionados se incrementa en cuanto a que el acceso a las zonas de cultivo, producción y distribución es abierto y accesible de forma general por parte del

público. Además el peligro aumenta en los casos en que interviene producto de temporada y se emplean operarios foráneos con contratos temporales.

3.2. Retos de la industria alimentaria en materia de defensa

Reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia [6] de la industria alimentaria es posible en cuanto se mejore el control de acceso a los materiales, procesos, servicios e instalaciones de forma general, así como las inspecciones rutinarias en este ámbito. En otras palabras, mejorando la protección a lo largo de la cadena completa de la granja a la mesa. Es cierto que el sistema alimentario no está actualmente preparado para los casos de defensa alimentaria. Sin embargo, sí está mucho más avanzado para la prevención y control de eventos de seguridad alimentaria. Es por tanto cuestión de sacar partido de las infraestructuras de "seguridad" actuales para elevarlas hacia un nivel de infraestructuras de "protección total".

A continuación se resumen los principales retos en la industria alimentaria para alcanzar esta situación deseada de protección total frente a vulnerabilidades que pueden ser abordados mediante el empleo de tecnologías facilitadoras que luego analizaremos:

- Transformar los tradicionales enfoques de sistemas de control de calidad hacia un enfoque de sistemas más centrados en el riesgo, es decir, de reacción y actuación hacia proactividad y prevención.

- Migrar desde el concepto de "puntos de control" hacia "puntos de vigilancia" a lo largo de la cadena de valor.

- Ajustar los sistemas y herramientas existentes a las nuevas amenazas de seguridad (control de acceso, detección de patrones en analíticas, valores anómalos).

- Adaptar las herramientas existentes que se estén empleando en otros sectores (químico, defensa) para su aplicación en el ámbito alimentario.

- Aprovechar las herramientas específicas en otros usos o sectores a través de su acceso mediante interfaces a dichos sistemas desde los sistemas implantados en las empresas alimentarias.

- Integrar y acceder rápidamente a fuentes de información externa de agricultura, alimentación, salud pública, ambiental, para mejorar en prevención, respuesta y restitución (RASFF, RAPEX, entre otras por ejemplo)

- Orquestar toda la información de la empresa relacionada con seguridad y defensa alimentaria en una capa de información superior vinculada estrictamente a protección alimentaria y ponerla a suposición de los gerentes/operarios a través de un único sistema (cuadro de mando).

- Disponer de acceso a dicha información en los puntos de vigilancia para su visualización e interacción.

- Compartir información en caso de crisis con otros agentes en tiempo real a través de una infraestructura de sistemas interoperable: agentes públicos de salud, agencias de seguridad alimentaria, operadores de defensa.

3.3. Tecnologías y soluciones aplicables

En el proyecto EDEN se ha trabajado en la identificación de las necesidades desde el punto de vista de sistemas de información y su necesidad de adaptación para la lucha frente a los ataques CBRN en el sector agroalimentario. A continuación se resumen las necesidades y capacidades a implementar en dichos sistemas:

- Procedimientos para el chequeo y verificación de perfiles y antecedentes de operarios contratados, así como sistemas de monitorización y registro de comportamientos anómalos en planta.

- Mejora de la detección de señales de riesgo que puedan evidenciar la presencia de un contaminante en planta, por ejemplo, a partir de los cambios físico-químicos causados por la contaminación (a nivel de actividad de agua, pH, etc.).

- Mejora del control de materias primas e insumos de materiales.

- Implementación de sistemas de alerta rápida y de detección precoz de riesgos emergentes, como paso necesario a la anticipación de la crisis antes de que se produzca.

- Nuevas capacidades de monitorización, filtrado y visualización de datos que permitan a gerentes y operarios en planta prevenir riesgos.

- Bases de datos de posibles contaminantes así como materiales formativos acerca de cómo detectarlos, combatirlos y controlarlos.

- Implementación de sistemas de gestión de crisis que garanticen una acción eficiente y coordinada de las partes implicadas cando ocurre una crisis, en particular, para la retirada de producto, destrucción.

- Desarrollo de sistemas de trazabilidad mejorados que ayuden a verificar y controlar las retiradas efectivas de producto.

- así como nuevos mecanismos en estos sistemas para garantizar la integridad y autenticidad del producto, detectando casos de fraude, adulteración, manipulación indebida o etiquetado incorrecto malintencionado.

- Nuevos canales específicos de comunicación entre la industria alimentaria, autoridades sanitarias y partes interesadas para mejorar la comunicación y control del impacto.

- Nuevas capacidades de monitorización de redes sociales para la detección de malas intenciones, sentimientos negativos, ideologías hacia una marca/producto que pudieran desembocar en un ataque posterior.

La siguiente figura esquematiza la visión de una infraestructura de protección total en la industria alimentaria que haría uso de las capacidades de dichos sistemas para mejorar en la prevención, detección y actuación ante alertas de seguridad y defensa alimentaria.

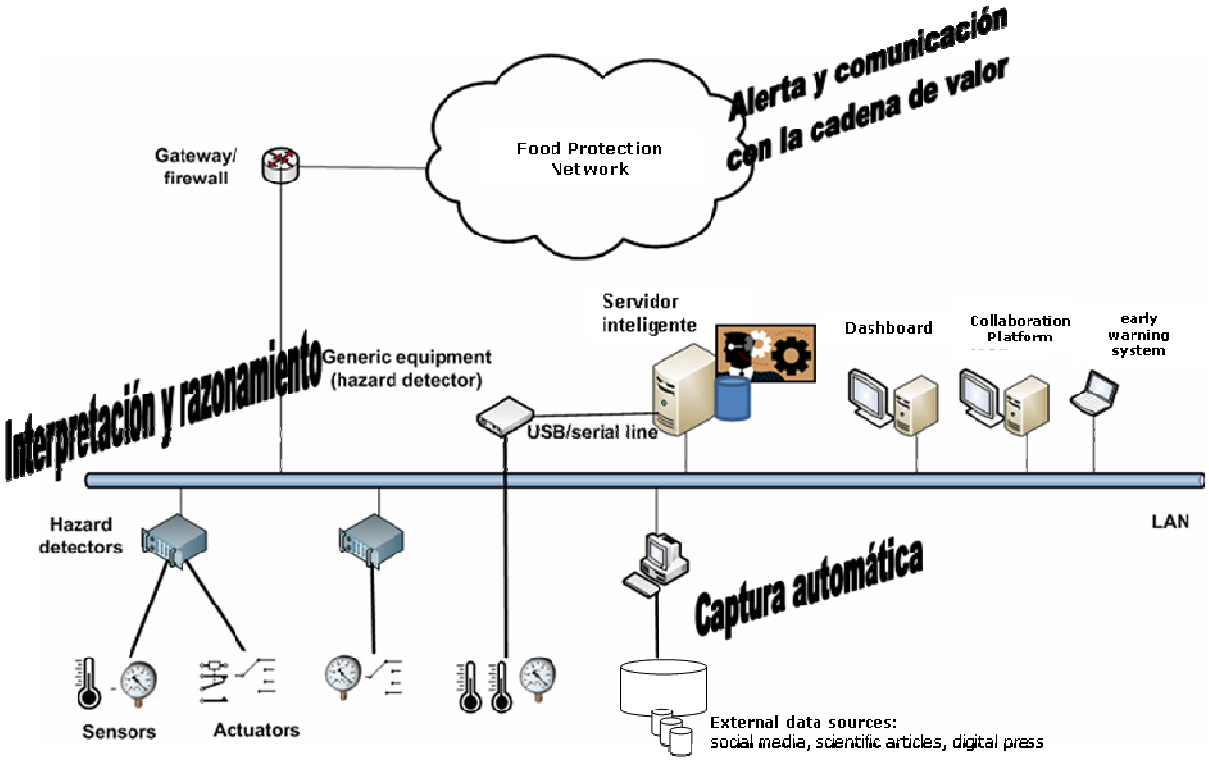


Figura 1. Infraestructura de protección total de una empresa alimentaria.

La información monitorizada por los sistemas ciber-físicos será accesible de forma ubicua por parte de los operarios a través de interfaces de usuario (*dashboard*, *collaboration platform*, *early warning*) que les permita evaluar el riesgo en la zona monitorizada. Los interfaces proveerán mecanismos de ayuda guiada al usuario para la:

- Detección de puntos de riesgo
- Interpretación del riesgo y su correlación con patrones de comportamiento de agentes contaminantes
- Mecanismos de localización precisa de lotes afectados
- Análisis cualitativo a alto nivel
- Desencadenamiento de alertas para la retirada colaborativa del producto afectado
- Notificación automática a entidades sanitarias
- Notificación a entidades colaboradoras para la confirmación de la detección y la descontaminación

4. Conclusiones

A través del acoplamiento de dichos componentes computacionales (ontologías, razonamiento automático) y físicos (sensores, *sniffers* de información) distribuidos en las áreas más vulnerables de la cadena de producción y distribución alimentaria, el sistema interactuará con el entorno productivo de forma continua y dinámica para mejorar en la prevención, detección y actuación ante amenazas NBQRF.

Agradecimientos

Este artículo describe algunos resultados alcanzados durante la ejecución del proyecto EDEN, proyecto financiado por la Comisión Europea en su FP7 bajo contrato nº 313077.

Referencias

[1]Agencia Catalana de Seguridad Alimentaria. Las dos acepciones de la seguridad alimentaria. Octubre 2009, número 57 (accedido 01/06/15). Disponible en: http://www.gencat.cat/salut/acsa/html/es/dir1599/Dd11642/infoacsa57octubre09cast.pdf

[2] http://www.fsis.usda.gov/wps/portal/fsis/topics/food-defense-defense-and-emergency-response

[3] http://www.nytimes.com/2008/07/31/health/policy/31outbreak.html?_r=0

[4] Commission's press release, 8 August 2011 available to: http://ec.europa.eu/food/food/coli_outbreak_germany_en.htm

[5] Report of the Independent Investigator into 2008 - Government of Canada

[6] Del inglés *resilience*: la capacidad de un sistema para adaptarse y superar la adversidad, volviendo a recuperar su estado inicial antes de que ocurriera esta.

Factores de riesgo en el uso de redes de comunicación inalámbricas: Amenazas y aseguramiento.

Pérez Rodríguez, Belén [1,*], Cerqueiro Pequeño, Jorge [1] y Valiente Pérez, José [2]

[1] Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales de Vigo; Email: belenpr@ingenierosvigo.com, decano@coitivigo.es

[2] Centro de Ciberseguridad Industrial; Email: info@cci-es.org

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: belenpr@ingenierosvigo.com;

Abstract: Las redes de comunicación inalámbrica suponen un importante desafío a la hora de su utilización segura por parte de los usuarios, pues su característica fundamental es la utilización de un medio compartido. Esto obliga a un diseño cuidadoso de estas redes, que sin comprometer su funcionalidad permita mantener las condiciones de seguridad de la información exigidas por la organización para el cumplimiento de sus fines en el marco de la legislación de aplicación. En este trabajo se exponen los factores de riesgo más relevantes de las redes de comunicación inalámbricas más utilizadas, y se describen las posibles técnicas a utilizar en cada caso para alcanzar el nivel de seguridad requerido.

Keywords: Comunicación Inalámbrica; WiFi; IEE 802.11; Ciberseguridad; Aseguramiento;

---

1. Introducción

Se define como seguro un sistema de comunicaciones cuando cumple con los considerados como tres pilares fundamentales de la seguridad:

- DISPONIBILIDAD: el sistema es accesible (transmite información) y funciona 24 horas/día los 365 días del año.
- CONFIDENCIALIDAD: el sistema impide la divulgación de la información que se transmite a personas o sistemas no autorizados.
- INTEGRIDAD: la información trasmitida está libre de modificaciones no autorizadas, es decir, lo que se emite es lo que llega a destino sin ser manipulada o alternada por personas o procesos no autorizados.

Uno de los tipos de acceso más extendidos en la actualidad, y precariamente gestionado, es el acceso a través de conexiones inalámbricas. No siempre se es consciente de que los accesos inalámbricos usan un medio compartido, que es el aire, y al que todo el mundo puede acceder, por lo que necesita de mecanismos de control de la seguridad mucho más robustos.

Si se parte de la base de que un sistema inalámbrico (en cualquiera de sus modalidades) utiliza un medio compartido (el aire) el sistema es, por definición, INSEGURO, ya que cualquier sistema o dispositivo de inhibición de frecuencias interrumpe el servicio de forma inmediata.

Si además se utilizan sistemas de transmisión de la información sin ningún tipo de cifrado o con cifrados débiles, la parte de la confidencialidad estará también afectada.

De igual forma, al usar un medio compartido de transmisión, la Información estará accesible, y si no se introducen mecanismos de verificación de la integridad, los tres pilares fundamentales de la seguridad se verán afectados.

Para poder concluir que un sistema de comunicación inalámbrico es inseguro, se analizarán todos los tipos de sistemas inalámbricos existentes, su funcionamiento (acorde a los estándares conocidos y definidos por la IEEE) y los problemas que pueden presentar por su uso, mal uso, administración-configuración y/o mala administración-configuración.

2. Tipos de Comunicaciones Inalámbricas

Un sistema de comunicaciones o transmisión de la información de forma inalámbrica está sujeto a una serie de estándares que, regulados por la IEEE, permiten a desarrolladores y fabricantes introducir en el mercado dispositivos compatibles entre sí, independientemente del modelo/fabricante.

Cuando se habla de sistemas inalámbricos, actualmente se puede estar haciendo referencia a cualquiera de los sistemas estandarizados por IEEE, que se describen a contunuación:

a) PAN (Personal Area Network):

- Bluetooth: permite altas tasas de envío de información a cortas distancias. Se regula a través del estándar IEEE 802.15. Funciona en la banda de 2.402-2.480 GHz (70 canales de 1 MHz de ancho de banda cada uno). Uno de sus principales inconvenientes es la limitación de la conexión de dispositivos simultáneos: ocho.
- ZigBee: se usa para comunicaciones seguras, de baja tasa de envío de datos, y que maximiza la vida útil de las baterías. Se regula con el estándar IEEE 802.15.4 y lo suelen usar equipos de domótica. Presenta la ventaja, frente al sistema Bluetooth, que permite 65.535 conexiones simultáneas, con menor consumo eléctrico. Su limitación es la baja tasa de velocidad: 250 kb/s frente a los 3.000 kb/s del Bluetooth.



Figura 1. PAN

b) LAN (Local Area Network) y WLAN (Wireless Local Network):

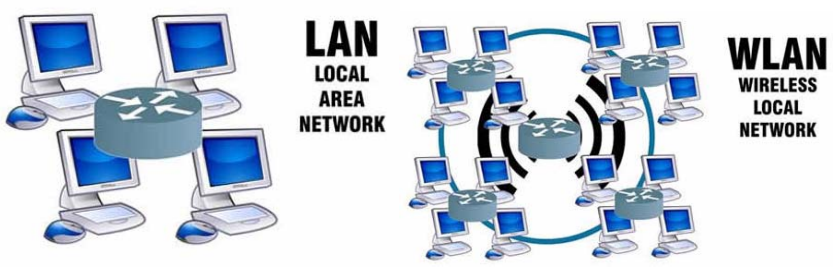


Figura 2. LAN y WLAN.

- WiFi: su conexión tiene un alcance medio de 20 metros a través de un punto de acceso (AP). Su implementación y desarrollo se realiza bajo el estándar IEEE 802.11 en sus diferentes actualizaciones. La velocidad de transmisión dependerá de la versión de IEEE 802.11 usada por los distintos elementos (servidor y clientes), y ancho de banda del canal (seleccionable en algunas de las versiones), frecuencia de transmisión, tipo de modulación, cifrado usado… La mayoría de las versiones emiten en la misma frecuencia, lo que hace que los canales están, casi siempre muy saturados, lo que obliga al continuo desarrollo de nuevas versiones con nuevas capacidades y especificaciones:

	Frecuencia	**Velocidad máx**	**Velocidad media real**	**Canales**	**Compatibilidad**
802.11a	2,4GHZ	54Mbps	20 Mbps	12	No con 802.11b
802.11b	2,4GHZ	11Mbps	7,1 Mbps	11	g/n
802.11g	2,4GHZ	54Mbps	22 Mbps	11	a/b/n
802.11n	2,4GHZ-5GHz	600MBps	300 Mbps	4-11	TODOS
802.11 ac	5GHZ	1Gbps	850 Mbps	8	Con b/g/n

Tabla 1. Comparativa de velocidades por estándar WiFi.

En este tipo de conexiones se hacen imprescindibles dos mecanismos de control y seguridad: autenticación-autorización y cifrado:

- La autenticación se puede hacer de forma local en el propio AP o centralizada en un servidor remoto como el resto de dispositivos y sistemas de la red en la que está integrado. Aunque es habitual el uso de un único perfil de acceso, o a veces acceso sin autenticación (OSA), lo ideal es que cada usuario de la red se pueda autenticar de forma independiente y con su propio perfil de seguridad (IEEE 802.11x – servidor de autenticación centralizado). A la hora de elegir la clave de acceso bien se puede optar por una clave fija pre-compartida fijas (SKA o PSK) o por claves pre-compartidas temporales (TKIP).
- A partir de ahí, e independientemente del tipo de autenticación usado, lo prioritario es el sistema de cifrado de la información. De poco vale usar sistemas robustos de autenticación si el tráfico viaja en formato plano que cualquiera puede interceptar y descubrir. Existen, a este respecto, distintos tipos de cifrado para los sistemas WiFi.

Además no se debe olvidar que realizar un ataque de denegación de servicio (DoS) es sencillo utilizando un simple inhibidor de frecuencias.

c) MAN (Metropolitan Area Network):



Figura 3. MAN.

- WIMAX: sistema de acceso inalámbrico a través de microondas. Usa ondas de radio de frecuencias entre 2,3 y 3,5 GHz y permite cobertura de hasta 50 km. Se regula a través de la norma IEEE 802.16. Para este tipo de conexiones se necesita una antena receptora en el cliente y una pareja emisora de mayor envergadura. Para establecer una adecuada conexión es imprescindible la visión directa entre la antena emisora y la receptora, por lo que el diseño y el despliegue debe ser muy minucioso. Especialmente indicado en zonas rurales o muy alejadas sin accesos cableados.

d) WAN (Wide Area Network):

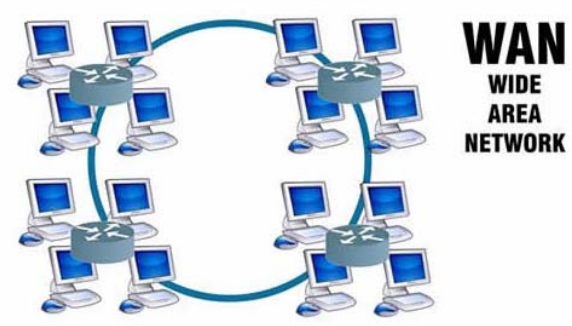


Figura 4. WAN.

- GSM-UMTS: conexión utilizada por los teléfonos móviles (*Mobile Broadband Wireless Access*, MBWA). Utiliza la banda que va desde los 825 MHz a los 1.990 MHz. Permite el envío de gran cantidad de información a distancias elevadas (casi ilimitadas) en un corto espacio de tiempo. Presenta la ventaja de la seguridad frente a otros sistemas inalámbricos ya que implementa mecanismos para: Autenticación y Confidencialidad de la identidad del abonado, Confidencialidad de los datos de señalización, y Confidencialidad de los datos del abonado.

  Considerando que es un sistema completamente implementado en todos los países, se debería tener en consideración a la hora del intercambio de datos. El único inconveniente puede ser el

coste de la tarificación de este tipo de tráfico, especialmente el internacional (*roaming*/satélite), que puede ser muy elevado.

3. Comunicaciones WiFi

Uno de los sistemas de trasmisión inalámbrico, más extendido y usado en la actualidad, es el sistema WiFi.

Para poder establecer una red WiFi se necesita un punto de acceso (AP), que facilite la conexión inalámbrica creando una red local inalámbrica (WLAN), y un cliente (tarjeta de red inalámbrica).

El punto de acceso puede crear dos tipos de comunicaciones con sus clientes:

- Sistema abierto: permite que cualquier cliente se conecte a la red (WLAN) sin ningún tipo de autenticación.
- Sistema cerrado: para poder conectarse a la red (WLAN) el cliente debe autenticarse. La autenticación de las WLAN se produce en la capa 2 del modelo OSI. Es el proceso de autenticar el dispositivo, no al usuario. Este es un punto fundamental a tener en cuenta con respecto a la seguridad, detección de fallos y administración general de una WLAN.

El proceso de autentificación se inicia cuando el cliente envía una trama de petición de autenticación al AP y éste acepta o rechaza la trama. El cliente recibe una respuesta por medio de una trama de respuesta de autenticación. También puede configurarse el AP para derivar la tarea de autenticación a un servidor de autenticación (IEEE 802.1x → RADIUS, KERBEROS, etc.), que realizaría un proceso de evaluación de credenciales más exhaustivo y que además integra autorización con niveles de permisos o perfiles de acceso, además de auditoría y control del servicio: AAA.

Una autenticación se puede realizar acorde a diferentes métodos:

- SÉ - Sistemas basados en algo conocido: una contraseña (*password*) o frase (*passphrase*, etc.).
- TENGO - Sistemas basados en algo poseído: una tarjeta de identidad, una tarjeta inteligente (*smartcard*), dispositivo USB tipo *epass token*, una tarjeta de coordenadas, *smartcard* o *dongle* criptográfico, etc.
- SOY - Sistemas basados en una característica física del usuario o un acto involuntario del mismo: verificación de voz, de escritura, de huellas, de patrones oculares, etc. (sistemas biométricos).
- HAGO – Sistemas basados en algo que el usuario hace de forma unívoca: firma, patrón de comportamiento, etc.

Es, cada vez más habitual, el sistema de autenticación de métodos multifactor (implica varios métodos de autenticación simultáneos): TENGO+SE: llave/tarjeta + clave/PIN, o TENGO/SE+SOY: llave-tarjeta/clave-PIN + huella/iris.

La asociación que se realiza después de la autenticación es el estado que permite que un cliente use los servicios del AP para transferir datos. Los tipos de autenticación y asociación son los siguientes:

- No autenticado y no asociado: el cliente está desconectado de la red y no está asociado a un punto de acceso.
- Autenticado y no asociado: el cliente ha sido autenticado en la red pero todavía no ha sido asociado al punto de acceso.

- Autenticado y asociado: el nodo está conectado a la red y puede transmitir y recibir datos a través del punto de acceso.

3.1. Sistemas de Autenticación WiFi

Dentro de los sistemas cerrados, los tres sistemas estandarizados de autenticación WiFi que se siguen usando a día de hoy, son:

a) WEP:

El funcionamiento de este método se puede dividir en cuatro fases:

I) La estación cliente envía una petición de autenticación al Punto de Acceso.
II) El punto de acceso envía de vuelta un texto modelo (texto plano sin cifrar).
III) El cliente tiene que cifrar el texto modelo usando la clave WEP ya configurada, y reenviarlo al Punto de Acceso en otra petición de autenticación.
IV) El Punto de Acceso descifra el texto codificado y lo compara con el texto modelo que había enviado. Dependiendo del éxito de esta comparación, el Punto de Acceso envía una confirmación o una denegación.

Después de la autenticación y la asociación, WEP puede ser usado para cifrar los paquetes de datos intercambiados (CRC4+Pre-Share Key) con la misma clave de autenticación.

Las claves usadas son 64-128 bits lo que implica, que en función de la longitud de contraseña o clave definida, podremos usar distintos caracteres para esa contraseña. Cada carácter necesita una serie de bits o códigos (ASCII o hexadecimal) que lo identifiquen. A mayor número de bits, mayor cantidad de caracteres distintos que se pueden usar para la clave-contraseña:

- ASCII de 64 bits: Utiliza 5 caracteres de texto: por ej., “WLLAN” (distingue entre mayúsculas y minúsculas).
- Hexadecimal de 64 bits: Utiliza 10 dígitos de datos hexadecimales: por ej., “71f2234aba”.
- ASCII de 128 bits: Utiliza 13 caracteres de texto: por ej., “Wirelesscomms” (distingue entre mayúsculas y minúsculas).
- Hexadecimal de 128 bits: Utiliza 26 dígitos de datos hexadecimales: por ej., “71f2234ab56cd709e5412aa2ba”.

b) WPA:

WPA (*Wi-Fi Protected Access* – Acceso Protegido Wi-Fi) es un sistema para asegurar redes inalámbricas, creado para corregir las carencias de seguridad de WEP; con el paso del tiempo y el uso del estándar se detectaron varias debilidades en WEP (tal como un ataque estadístico o fuerza bruta, que permitía recuperar la clave WEP). WPA implementa la mayoría del estándar IEEE 802.11i, creado como una medida intermedia para ocupar el lugar de WEP mientras se desarrollaba el estándar de seguridad IEEE 802.11x. Aun así no todas las funcionalidades de seguridad del 802.11i están integradas en este método.

WPA fue diseñado para utilizar un servidor de autenticación (normalmente un servidor RADIUS), que distribuye claves diferentes a cada usuario; sin embargo, también se puede utilizar en un modo menos seguro de clave pre-compartida (PSK – *Pre-Shared Key*). La información es cifrada utilizando el algoritmo RC4, con una clave de 128-256 bits y un vector de

inicialización de 48 bits. Una de las mejoras de WPA sobre WEP es dada por el Protocolo de Integridad de Clave Temporal (TKIP – *Temporal Key Integrity Protocol*), que cambia claves dinámicamente a medida que el sistema es utilizado. Cuando esto se combina con un vector de inicialización (IV) mucho más grande, evita los ataques de recuperación de clave (ataques estadísticos o de fuerza bruta) a los que es susceptible WEP.

Adicionalmente a la autenticación y cifrado, WPA también mejora la integridad de la información cifrada. El comparador de redundancia cíclica (CRC) utilizado en WEP es inseguro, ya que es posible alterar la información y actualizar el CRC del mensaje sin conocer la clave WEP. WPA implementa un chequeo de integridad del mensaje e incluye protección contra ataques de "repetición", ya que incluye un contador de tramas. Al incrementar el tamaño de las claves y el número de claves en uso, al agregar un sistema de verificación de mensajes, WPA hace que la entrada no autorizada a redes inalámbricas sea mucho más difícil. El algoritmo fue el más fuerte que los diseñadores de WPA pudieron crear, bajo la premisa de que debía funcionar en las tarjetas de red inalámbricas más viejas; sin embargo, con el paso del tiempo, el sistema WPA es susceptible a ataques. Aun así, para limitar este riesgo, las redes WPA se desconectan durante 30 segundos cada vez que se detecta un intento de ataque lo que puede afectar la disponibilidad de la red para los usuarios autenticados.

c) WPA2:

En este nuevo estándar se integran todas las funcionalidades de seguridad de IEEE 802.11i y 802.1x.

3.2. Vulnerabilidades del sistema WiFi

Aun siendo el estándar de autenticación más seguro, el WPA2 presenta una serie de vulnerabilidades reconocidas y achacables, fundamentalmente a la mala configuración-administración del sistema:

- El primer problema es la longitud de la clave utilizada. Simplificándolo una clave de más de 12 caracteres no puede ser descifrada por los métodos desarrollados hasta el día de hoy, porque sería necesario mucho tiempo, o bien procesadores muy avanzados, de los que se carece en la actualidad:

Tipo de caracteres	Tamaño de clave	Tiempo de cómputo para recorrer todas las posibles combinaciones
Mayúsculas/minúsculas 26 posibilidades	8	7 días - 1 día y 8 horas
Mayúsculas/minúsculas + Números 36 posibilidades	8	93 días - 18 días
Mayúsculas y minúsculas 52 posibilidades	8	4 años y 300 días - 353 días
Mayúsculas y minúsculas + Números 62 posibilidades	8	474 años - 4 años
Mayúsculas/minúsculas	12	8.645 años - 1.730 años

26 posibilidades		
Mayúsculas/minúsculas + Números 36 posibilidades	12	430.000 años - 85.858 años
Mayúsculas y minúsculas 52 posibilidades	12	35 millones de años - 7 millones de años
Mayúsculas y minúsculas + Números 62 posibilidades	12	292 millones de años - 58 millones de años
Mayúsculas/minúsculas 26 posibilidades	16	Infinito
Mayúsculas/minúsculas + Números 36 posibilidades	16	Infinito
Mayúsculas y minúsculas 52 posibilidades	16	Infinito
Mayúsculas y minúsculas + Números 62 posibilidades	16	Infinito

Tabla 2. Análisis temporal de obtención de contraseña por tipo de carácter usado.

Es por ello, importante e imprescindible la configuración de contraseñas robustas (en longitud y con combinaciones de caracteres: letras mayúsculas-minúsculas, números, caracteres especiales, etc.).

Es, incluso mejor, el uso de *hash* (resultado de algoritmos matemáticos de un solo sentido. Si se envía el *hash* de una clave, se puede comparar ese *hash* con el de la clave de que se dispone para saber si es el correcto. Con un hash, sin embargo, no se puede obtener la clave o entrada del algoritmo), certificados digitales, sistemas biométricos de autenticación, etc.

- El segundo problema es el uso de mecanismos automáticos de autenticación como el WPS. Es habitual que los routers o puntos de acceso WiFi incluyan soporte de la funcionalidad WPS para facilitar el intercambio de claves entre el punto de acceso y el usuario sin necesidad de usar la contraseña WiFi. Este proceso puede ser interceptado con herramientas como *Reaver* o *wpscrack*, y puede permitir obtener la clave de acceso a la red WiFi independientemente de su longitud o complejidad. La recomendación básica o primera recomendación debe ser inhabilitar WPS si está soportado.
- El tercer problema es el uso del nombre de la red WIFI (SSID). El algoritmo de cifrado de WPA o WPA2 hace uso del nombre de la red WIFI para generar la clave criptográfica. Para evitar el uso de ataques de *cracking* con tablas *rainbow* se debe evitar usar un nombre de red conocido (p.e. WLAN_XX, RWLAN_X, VodafoneXXX, …) y en su defecto usar nombres nuevos y que no identifiquen a la empresa o al usuario.
- El cuarto problema es el uso de redes públicas. La mayoría de dispositivos (teléfonos, ordenadores portátiles, …) preguntan periódicamente a su alrededor la lista de redes guardadas y a las que se ha conectado previamente solicitando esta información al aire, mediante el envío de un paquete WiFi conocido como frame de tipo *Probe Request*. Si un usuario configura incorrectamente la red WiFi y establece la contraseña como nombre de la red, cualquiera que se encuentre escuchando con un scanner WiFi podrá ver la contraseña de la red solicitada por el dispositivo del usuario. Usar redes gratuitas o de uso público, implica que todos aquellos que

están conectados a la red puedan interceptor el tráfico que se está intercambiando con el punto de acceso.

- El quinto problema es que, en la mayoría de los casos, especialmente a nivel doméstico (aunque en ocasiones también a nivel empresarial) es habitual que el punto de acceso WiFi sea un router ADSL o un router de cable. Estos dispositivos pueden estar configurados con contraseñas de administración remotas como "admin/admin", "1234/1234", "support/support", etc. y accesibles desde Internet a través de HTTP con un navegador web. Se debe cambiar la contraseña de administración y limitar el acceso al panel de administración del router WiFi desde otras redes, como Internet, para evitar que un usuario pueda obtener la contraseña WIFI explotando un fallo de configuración del router WiFi desde internet. Lo mismo sucede con la Administración de los puntos de acceso puro, que suele ser vía web por HTTP.
- El sexto y no menos importante problema de seguridad a nivel WiFi, es el usuario. El ser humano, como eslabón más débil de la cadena, puede estar dando acceso (consciente o inconscientemente) a redes corporativas a través de las conexiones WiFi. Cuando se usan conexiones WiFi en las organizaciones y los usuarios, al abandonar las instalaciones siguen enviando la petición de conexión con su cliente, están enviando al aire información confidencial. Para los administradores de la red y los sistemas es un quebradero de cabeza introducir mecanismos de control que prevengan y detecten este tipo de intrusiones.

4. Conclusiones

Los sistemas de comunicaciones WiFi, son por definición, sistemas INSEGUROS, en tanto son vulnerables en los tres pilares de la seguridad:

1. DISPONIBILIDAD: es imposible controlar su disponibilidad al 100% ya que son vulnerables a cualquier sistema inhibidor de frecuencia que limite su área de cobertura. Además, no es frecuente la instalación de sistemas redundados de transmisión que palíen la carencia de los distintos puntos de acceso en caso de fallo.
2. CONFIDENCIALIDAD: el medio utilizado para la transmisión de la información es un medio compartido, el aire y por tanto se hace complicado el garantizar la confidencialidad de la información intercambiada al 100%.
3. INTEGRIDAD: los sistemas habituales, no suelen usar mecanismos de integridad que garanticen que la información emitida y recibida coincide y no ha sido modificada en algún punto del camino.

Aunque las ventajas a la hora de instalar este tipo de redes (costes, rapidez, …) son evidentes y por tanto su uso se ha generalizado de forma exponencial en las últimas décadas, la inseguridad va a limitar su uso en determinados ámbitos o entornos:

- En organizaciones en las que se intercambie información confidencial (protegida o no por algún tipo de legislación o norma empresarial).
- En ámbitos cuya disponibilidad sea imprescindible y total.

No obstante, existen, en el mercado, mecanismos de prevención, que permiten un uso controlado y seguro de los sistemas de transmisión WIFI:

- Sistemas de autenticación por métodos biométricos o mixtos.

- Sistemas de autenticación, autorización y auditoria (AAA) del acceso y uso de la red.
- Sistemas de cifrado de la comunicación (VPNs, túneles IPSec, SSH, …).
- Rotación de la contraseña WIFI: Tanto si SE USA una contraseña WiFi WPA a nivel doméstico, como a nivel empresarial, las contraseñas se deben cambiar periódicamente. Usando contraseñas de al menos 12 caracteres, un tiempo razonable de cambio de contraseña son 6 meses.
- Deshabilitar TKIP: Su uso está desaconsejado en la actualidad y se debería deshabilitar. Si es estrictamente necesario podemos mantenerlo haciendo uso de contraseñas seguras de al menos 12 caracteres.
- Análisis periódico de clientes conectados a la red configuración de aquellos que se conecten, por algo más que una contraseña (dirección MAC, certificado, …).
- Medida de la propagación de la señal: Para mejorar la cobertura WiFi y para evitar que la señal inalámbrica salga del perímetro del edificio o de la oficina/organización, se hará un análisis de cobertura. De esta forma se podrán ajustar los parámetros del punto de acceso con el fin de evitar una propagación no deseada de la red, y seleccionar su mejor ubicación para mejorar el rendimiento WiFi.

Sin obviar todo lo anterior, el usuario final sigue siendo el eslabón más débil de la cadena, y las organizaciones habrán de invertir en campañas de información-formación y concienciación del uso y mal uso de los sistemas WiFi. El empleado o miembro de la organización lo es en ella, pero también fuera de ella, y en la actualidad, con la integración de las comunicaciones, cualquier usuario puede acceder a cualquier red, en tiempo real y desde cualquier punto, lo que implica una mayor implicación de todos los usuarios en la seguridad y de una mayor labor de control de los administradores de la redes y sistemas.

Referencias

1. Recurso Web: Estándares IEEE 802.11™: Wireless LANs. Disponibles en: http://standards.ieee.org/about/get/ 802/802.11.html
2. Recurso Web: Estándares IEEE 802.20™: Mobile Broadband Wireless Access (MBWA). Disponibles en: http://standards.ieee.org/about/get/802/802.20.html
3. Recurso Web: Material de estudio para el examen de certificación CISCO 640-722 IUWNE. Disponible en: https://learningnetwork.cisco.com/community/certifications/wireless_ccna/iuwne/study-material
4. Recurso Web: Estándar IEEE 802.11i Wi-Fi Security: WEP & WPA / WPA2. Disponible en: http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11i-security-wpa2-wep.php
5. Centro de Ciberseguridad Industrial. *Estado de la Ciberseguridad Industrial en España. Edición 2015*. Disponible en: https://www.cci-es.org/web/cci/detalle-actividad/-/journal_content/56/10694/146874

Nuevas Tecnologías aplicadas a Defensa y Seguridad

Troncoso, Carmela[1], Fernández Castro, Bruno*[1,] Vázquez Fernández, Esteban[1], Adkinson Orellana, Lilian[1], Jiménez Balsa, Gonzalo[1], Rodríguez Artolazábal, José Antonio[1], Dosil Lago, Raquel[1], Argones Rúa, Enrique[1], Rodríguez Negro, José Antonio[1] y Gómez Alonso, Iago[1].

[1] Gradiant: bfernandez@gradiant.org (BFC), ctroncoso@gradiant.org (CT), ladkinson@gradiant.org (LAO), gjimenez@gradiant.org (GJB), evazquez@gradiant.org (EVF), jarodriguez@gradiant.org (JAR), rdosil@gradiant.org (RDL), eargones@gradiant.org (EAR), jarnegro@gradiant.org (JARN), igomez@gradiant.org (IGA)

*Bruno Fernández Castro; bfernandez@gradiant.org (BFC)

Abstract: El avance de las tecnologías de la información y comunicación, así como la facilidad de acceso a dispositivos e infraestructuras con gran capacidad de procesado abren la puerta a nuevas aplicaciones y servicios en el sector de Defensa y Seguridad. En este artículo se ofrece una visión de conjunto de estas tecnologías y sus aplicaciones en este ámbito, tanto a nivel de Ciberseguridad como de Seguridad física. En el ámbito de la Ciberseguridad se repasan las siguientes tecnologías: técnicas criptográficas, análisis de datos en redes sociales, en tráfico de red y de señales GNSS. Por otro lado, en el ámbito de la seguridad física se analizan aplicaciones de control de acceso, videovigilancia y comunicaciones ópticas.

Keywords: criptografía; HSMs; procesado de datos en el dominio cifrado; análisis de datos; big data; red; GNSS; acceso; videovigilancia; comunicaciones ópticas.

---

1. Introducción

En el ámbito de la Ciberseguridad se repasan las siguientes tecnologías:

- Nuevas técnicas criptográficas (e.g., procesado en el dominio cifrado o almacenamiento seguro en la nube) que permiten la externalización de servicios y aplicaciones sobre datos sensibles.
- Análisis de datos en redes sociales basado en nuevas tecnologías Big Data para la identificación de eventos anómalos (e.g., organización de disturbios).

- Análisis de tráfico de red basado en aprendizaje automático para detección de intrusos, identificación de comunicaciones anónimas, o de patrones de actividad.
- Análisis de señales GNSS (e.g., GPS o GLONASS) para detección de ataques de denegación de servicio (jamming) o modificación de contenidos (spoofing).

Por otro lado, en el ámbito de la seguridad física cobra mucho interés el aumento en la capacidad de procesado en dispositivos tradicionales y móviles en aplicaciones de control de acceso y videovigilancia desde imagen aérea. En este dominio se repasan las siguientes tecnologías:

- Disciplinas biométricas: voz, reconocimiento facial, firma manuscrita; y los complementos necesarios para su funcionamiento en escenarios críticos de control de acceso, como la detección de vida o la capacidad para detectar suplantaciones de identidad.
- Se da una visión del valor añadido de aplicar técnicas de aprendizaje máquina a la videovigilancia, donde los últimos avances permiten el conteo de personas, la identificación de objetos, o la detección de trayectorias y eventos anómalos. Se considera especialmente la videovigilancia desde vehículos no tripulados (e.g., drones) y en condiciones de visibilidad reducida utilizando fusión de sensores en diferentes bandas del espectro.
- En este entorno, se revisan tecnologías ópticas en espacio libre no guiado aplicadas a enlaces de datos y videovigilancia con robustez ante ataques por inhibición RF y amenazas de interceptación de señal.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. Ámbito de la Ciberseguridad:

En el ámbito de la Ciberseguridad se repasan las siguientes tecnologías:

2.1.1. Nuevas técnicas criptográficas de computación:

La externalización de servicios es un proceso habitual a día de hoy, y resulta ampliamente utilizado tanto a nivel empresarial como a nivel individual. Uno de las formas más habituales de realizar esta externalización es mediante la utilización de los servicios ofrecidos por un proveedor en la nube. Esto se debe a que sus usuarios se pueden beneficiar de un gran número de ventajas, como son la despreocupación por el mantenimiento de los servicios, una alta disponibilidad y una escalabilidad teóricamente infinita, entre otras [1]. Sin embargo, estas ventajas tienen un elevado coste asociado: la pérdida del control sobre los datos. Este hecho toma una mayor relevancia cuando la información externalizada tiene un carácter sensible. Por este motivo, con el tiempo han ido surgiendo nuevas técnicas criptográficas, como son el procesado en el dominio cifrado o almacenamiento seguro en la nube, que buscan solventar este problema, facilitando la externalización de servicios y datos sensibles de un modo seguro.

Existen dos métodos que cumplen dicho propósito, orientados tanto hacia ofrecer un procesamiento como un almacenamiento seguro de los datos. En el primer caso, estos métodos se encuentran basados principalmente en la utilización de un software específico o en el uso de hardware criptográfico. Los

métodos basados en software emplean módulos criptográficos avanzados basados en técnicas de procesado de datos en el dominio cifrado, los cuales permiten realizar operaciones directamente sobre datos cifrados, protegiendo su confidencialidad [2]. Estas soluciones han sido utilizadas como herramientas que facilitan la externalización y compartición de datos sensibles en entornos no confiables (ej. la nube). Por su parte, los métodos basados en hardware se basan en el empleo de HSMs (Hardware Secure Modules), unos dispositivos que disponen de protección física y permiten realizar operaciones criptográficas a gran velocidad y gestionar claves de forma segura. Se han hecho experimentos con módulos para la creación de aplicaciones específicas para HSMs programables (ej. eVoting), así como la creación de un middleware que permite la integración y brokering de HSMs de varias marcas para provisión de demanda y ofrecer una fácil integración con otras aplicaciones cloud. Finalmente, en el caso del almacenamiento seguro se han realizado experimentos que permiten realizar backups seguros en la nube, cifrando los datos para garantizar su confidencialidad a la vez que se aplican técnicas de deduplicación en el dominio cifrado con el fin de eliminar la redundancia entre diferentes usuarios.

2.1.2. Análisis de datos en redes sociales basado en tecnologías Big Data:

Las redes sociales generan una gran cantidad de información, extensos volúmenes de datos multimedia y texto no estructurado, extremadamente complejos de analizar y examinar. En este contexto, las tecnologías de Big Data aportan su capacidad de procesar grandes flujos de datos ejecutándose sobre un conjunto de nodos empleando el paradigma *MapReduce* [3].

Estos sistemas posibilitan, mediante la ejecución en paralelo de algoritmos de análisis de texto y minería de datos, la monitorización continua del contenido ofrecido en las redes sociales, la extracción de tendencias temporales y la caracterización y seguimiento de determinados usuarios o grupos de usuarios considerados de interés.

2.1.3. Análisis de datos de red basado en tecnologías de Machine Learning:

El análisis de tráfico de red basado en técnicas de aprendizaje automático, o *Machine Learning*, tiene como objetivo hacer frente a los nuevos escenarios de riesgo originados por la disolución de las fronteras entre las redes de datos, el creciente volumen y heterogeneidad de los dispositivos conectados, o la sofisticación de las tecnologías empleadas para eludir los sistemas de defensa tradicionales.

Estas tecnologías [4] permiten indexar automáticamente las diferentes fuentes y estructuras de datos de la red, realizando inferencias, detección de anomalías, modelos predictivos y de clasificación, o la búsqueda de relaciones ocultas entre los diferentes eventos de red registrados.

2.1.4. Análisis de señales GNSS

Actualmente, los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) desempeñan un papel crucial en el mundo de la defensa y la seguridad (al igual que en el civil), sin embargo en los últimos años diversos estudios han mostrado su vulnerabilidad ante ataques de denegación de servicio (jamming) y de suplantación (spoofing) [5], interrumpiendo la disponibilidad del servicio en el primer caso y llegando

a modificar la trayectoria y posición del objetivo atacado en el segundo. En paralelo han ido surgiendo diversas alternativas para la implementación de spoofers GNSS [6].
En este escenario se evidencia la necesidad de realizar un análisis pormenorizado de las diversas técnicas de procesado de señal que puedan ser empleadas para la detección de este tipo de ataques (monitorización de las frecuencias L1 y L2, monitorización de potencia, discriminación de ángulo de llegada, etc.) y la posibilidad de ser implementadas en los receptores GNSS actuales.

2.2. Ámbito de la Seguridad Física:

2.2.1. Reconocimiento biométrico en dispositivos móviles

En el contexto actual de movilidad, la seguridad en el acceso a información y servicios (e.g. transacciones bancarias) es fundamental. Continuamente vemos noticias que alertan sobre contraseñas y cuentas robadas [7] siendo este problema crítico en los dispositivos móviles. Sin embargo, los dispositivos móviles también forman parte de la solución, pudiendo proporcionar mayores niveles de seguridad gracias a la utilización de tecnología de reconocimiento biométrico. Algunas de las soluciones biométricas para reconocimiento en movilidad son Luxand (www.luxand.com), Keylemon (www.keylemon.com), y Gradiant (www.gradiant.org).

La autenticación biométrica consiste en verificar la identidad de una persona mediante el uso de características propias de esa persona, ya sean intrínsecas (cara, iris, huella) o de comportamiento (firma manuscrita). Por último, deben destacarse dos aspectos cruciales en el ámbito de la autenticación móvil mediante reconocimiento biométrico: 1) la necesidad de detectar que la muestra biométrica (e.g. la cara) y 2) la necesidad de proteger las muestras biométricas almacenadas.

2.2.2. Videovigilancia

El campo de la detección de objetos (y, más concretamente, de embarcaciones) desde imagen aérea no ha sido analizado profundamente en la literatura. La mayoría de los sistemas usan radar de apertura sintética (SAR) aeroembarcado o imagen por satélite [8]. Los SAR actuales son relativamente costosos y su tamaño y peso dificulta su uso en un UAV. Debido al coste más ajustado y a sus características de dimensiones y peso, los sensores ópticos se hacen más adecuados para detección remota de objetos desde UAV. Por su parte, el análisis de imagen satélite para detección de embarcaciones es una tecnología bastante madura gracias al programa europeo para el desarrollo del Vessel Detection System (VDS). No obstante, el análisis de imagen satélite presenta dos problemas importantes: insuficiente resolución para la detección de embarcaciones de pequeño tamaño, y baja frecuencia de actualización de las imágenes. En este sentido, la utilización de vídeo aeroembarcado supone una herramienta complementaria a la imagen satélite. En los últimos años ha habido bastante actividad científica en el campo de la videovigilancia inteligente desde medios aéreos. Por ejemplo, en el estado del arte se encuentran diversos trabajos sobre detección de vehículos desde imagen aérea y escenarios terrestres. En escenarios marítimos, nos encontramos con los siguientes retos: 1) Movimiento constante y cambios de perspectiva, 2) Variaciones debidas a oleaje, espuma y reflejos del sol, 3) Variación en la luminosidad, y 5) Ausencia de marcas de referencia. Encontramos algún trabajo en la literatura orientado a detección de embarcaciones desde imagen aérea, con cámaras RGB e.g. Marqués [9].

2.2.3. Comunicaciones ópticas en espacio libre:

Los enlaces de comunicaciones inalámbricos basados en radiofrecuencia presentan ciertos problemas de seguridad con respecto a los enlaces cableados, sin embargo, éstos son la única forma de resolver las comunicaciones en ciertos escenarios: comunicaciones por satélite, comunicaciones entre vehículos (turismos, aeronaves, barcos…), comunicaciones con zonas de difícil acceso, etc. Algunos de los problemas de seguridad más importantes que plantean las comunicaciones inalámbricas son:

- Detectables: Las emisiones electromagnéticas transmitidas en los enlaces inalámbricos son fácilmente detectables mediante analizadores de espectros.
- Acceso no autorizado a la información: La señal transmitida puede llegar a cualquier dispositivo que se encuentre dentro de la zona de cobertura.
- Suplantación (spoofing): Se puede generar señal desde cualquier punto de la zona de cobertura y suplantar la señal legítima.
- Denegación de servicio mediante jamming: Transmitiendo una señal electromagnética aleatoria de gran potencia en la banda de operación de la transmisión se puede provocar una denegación de servicio ya que el receptor no podría recibir la señal legítima ante un nivel de interferencia tan alto.

Estos problemas de seguridad son especialmente críticos en determinados escenarios como el enlace de comando y control de los aviones no tripulados, donde un fallo en las comunicaciones pueden provocar una catástrofe.

3. Resultados y Discusión

3.1. Ámbito de la Ciberseguridad:

A continuación se exponen los principales resultados y conclusiones obtenidas de los experimentos realizados con las tecnologías de seguridad expuestas en la sección previa.

3.1.1. Nuevas técnicas criptográficas

Como resultado de la aplicación de los diferentes métodos de técnicas criptográficas, se extrae que éstas se pueden aplicar de forma general en diferentes escenarios. Uno de ellos es la (1) externalización de cálculos o los (2) servicios de compartición segura de grandes volúmenes de datos de alta sensibilidad (ej. datos médicos), evitando que la nube tenga acceso a su contenido. Este segundo mecanismo ofrece ciertas ventajas, dado que no es necesario que los usuarios que comparten los datos sensibles compartan también una clave, ni que estén online en el mismo instante obtengan acceso al fichero completo, pudiendo acceder únicamente a una parte del mismo.

Otro resultado de interés es (3) la realización de cálculos entre varias entidades con el objetivo de encontrar coincidencias en sus datos sin revelar ninguna información adicional (ej. pacientes o enfermedades comunes). Por último, estas técnicas facilitan (4) la anonimización de datos, lo que permite compartir esa información con entidades de investigación tanto públicas como privadas, garantizando así su confidencialidad.

3.1.2. Análisis de datos en redes sociales basado en tecnologías Big Data:

La proliferación de las redes sociales introduce un nuevo paradigma en la definición de los mecanismos de seguridad en la red. La caracterización de la actividad de los usuarios constituye una herramienta fundamental en la detección de amenazas y disturbios.

Resulta de gran interés el desarrollo de estas tecnologías Big Data con el objetivo de optimizar el rendimiento durante el almacenamiento y procesado distribuido de los diferentes tipos de datos presentes en las redes sociales susceptibles de ser analizados (texto, video, imágenes, etc.), reduciendo la transferencia de datos entre nodos para el procesado de heterogéneos y mayores flujos de información.

3.1.3. Análisis de datos de red basado en tecnologías de Machine Learning:

La detección de ataques o eventos anómalos de red es una tarea compleja en entornos multiplataforma no necesariamente estacionarios, con un gran número de dispositivos diferentes conectados entre los que se establecen relaciones jerárquicas espaciales y temporales, generándose ininterrumpidamente una gran cantidad de información, en ocasiones redundante.

En este contexto resultan de interés las tecnologías que incorporan de forma natural las secuencias y la dependencia temporal del conjunto de parámetros y variables de red a procesar [10], optimizando los tiempos de respuesta, y permitiendo la implementación de plataformas no supervisadas capaces de adaptarse dinámicamente a los cambios en la infraestructura.

3.1.4. Análisis de señales GNSS:

Se ha confirmado que la gran mayoría de los receptores GNSS no proporciona medios específicos para la detección de este tipo de ataques, y en el caso de proporcionarlo únicamente monitorizan parámetros básicos tales como SNR (signal-to-noise ratio) o la detección de ruido jamming, resultando estas medidas insuficientes para garantizar un detección confiable. Frente a esta situación, adquiere gran potencial la combinación de algunas de las múltiples técnicas disponibles en el estado del arte.

3.2. Ámbito de la Seguridad Física:

3.2.1. Reconocimiento biométrico:

A continuación se describen brevemente los resultados obtenidos en competiciones internacionales por los sistemas de reconocimiento facial y de firma manuscrita desarrollados por Gradiant, así como links para la descarga de aplicaciones de demo en Google Play y AppStore:

Reconocimiento facial[1]: primer puesto en ICB'2009; seleccionado como uno de los mejores sistemas en ICB'2013 para funcionamiento en dispositivos móviles; cabe destacar que el actual sistema de reconocimiento incluye módulos de detección de cara viva y protección de plantillas biométricas.

Reconocimiento de firma manuscrita[2]: primer puesto en ESRA'2011; sistema compatible con tabletas Wacom y smartphones/tablets, incluyendo un módulo de protección de plantillas biométricas.

[1] https://itunes.apple.com/us/app/gradiant-face-recognition/id911827140?mt=8
https://play.google.com/store/apps/details?id=org.gradiant.gfrs

[2] https://itunes.apple.com/us/app/gradiant-signature-recognition/id926707021?mt=8

3.2.2. Videovigilancia:

En el ámbito del análisis inteligente de vídeo, destacamos los desarrollos de Gradiant para a) segmentación de terreno y detección (y seguimiento) de objetos desde imagen aérea **(Figura 1** izqda.) y b) detección de embarcaciones desde cámaras térmicas PTZ (**Figura 1** dcha.).



Figura 1: Detección de personas en imagen aérea (izquierda) y detección de embarcaciones en imagen térmica (derecha)

3.2.3. Comunicaciones ópticas en espacio libre:

La tecnología de comunicaciones ópticas en espacio libre permite transmitir grandes anchos de banda, tener acceso a una banda espectral libre en todo el mundo y sobretodo construir enlaces de gran seguridad. En la actualidad existen multitud de sistemas ópticos en espacio libre, tanto basado en tecnología LED[3] como en tecnología láser[4] . Los haces de transmisión y recepción en estos sistemas son muy estrechos (pocos grados para los sistemas LED y décimas de grados para los sistemas láser), esto provoca que para detectar, acceder a la señal o realizar un ataque mediante jamming, el atacante deba situarse en la línea imaginaria que une el transmisor y el receptor, lo que dificulta enormemente el ataque. Además, a esto se suma que los enlaces ópticos son inmunes a las interferencias electromagnéticas (ver **Figura 2**)

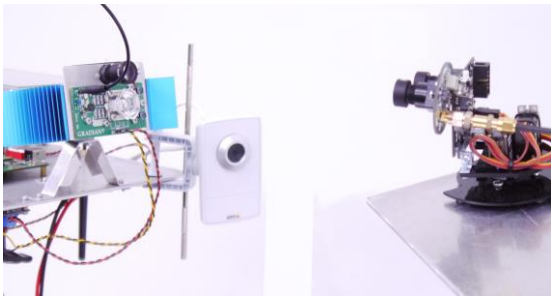


Figura 2: *Prototipo de comunicaciones ópticas de Gradiant.*

https://play.google.com/store/apps/details?id=com.gradiant.svlclient.app

[3] http://www.solectek.com/files/pdf/datasheets/FSO-100E.pdf

[4] http://www.lightpointe.com/images/LightPointe_AireBridge_Software_Defined_SD-FSO_Lasers_Brochure_v112114a.pdf

4. Conclusiones

En este artículo se ofrece una revisión de las tecnologías y aplicaciones en el ámbito de la Ciberseguridad: técnicas criptográficas aplicadas especialmente a operaciones de cálculo y compartición de datos sensibles en entornos no confiables como es la nube, análisis de datos en redes sociales basados en tecnologías Big Data y análisis de tráfico de red basado en técnicas Machine Learning; además de análisis de señales GNSS. Asimismo, en el ámbito de la seguridad física, se analizan aplicaciones de control de acceso mediante reconocimiento biométrico, videovigilancia, especialmente aplicada a imagen aérea y comunicaciones ópticas en espacio libre.

Agradecimientos

Prestamos especial agradecimiento a las empresas y organismos de investigación que colaboran con Gradiant para el desarrollo de estos experimentos.

Referencias

1. Armbrust, M.; Fox, A.; Griffith, R.; Joseph, A. D.; Katz, R.; Konwinski, A.; Zaharia, M. A view of cloud computing. Communications of the ACM, 2010, 53(4), 50-58.
2. Rodríguez-Silva, D. A.; González-Castaño, F. J.; Adkinson-Orellana, L.; Pedrero-López, B. Cloud Spreadsheets supporting Data Processing in Encrypted Domain. Proceedings of 5th International Conference on Cloud Computing and Services Science (CLOSER 2015), 2015. Lisboa (Portugal), 20–22 mayo, 2015.
3 J. Dean; S. Ghemawat. MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters. In OSDI 2004, 137–150.
4 M. Gupta; J. Gao; C. Aggarwal; J. Han. Outlier Detection for Temporal Data. TKDE, 2014.
5. HUMPHREYS, Todd. Statement on the vulnerability of civil unmanned aerial vehicles and other systems to civil GPS spoofing. University of Texas at Austin (July 18, 2012), 2012.
6. Tippenhauer, N. O., Pöpper, C., Rasmussen, K. B., & Capkun, S. (2011, October). On the requirements for successful GPS spoofing attacks. In Proceedings of the 18th ACM conference on Computer and communications security, pp. 75-86.
7. Al Pascual, IDENTITY FRAUD REPORT: Card Data Breaches and Inadequate Consumer Password Habits Fuel Disturbing Fraud Trends, Technical report, Javelin, 2014.
8. F. Bi, B. Zhu, L. Gao, and M. Bian. A visual search inspired computational model for ship detection in optical satellite images. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 9(4): pp. 749–753, 2012
9. Marques, J. S., Bernardino, A., Cruz, G., & Bento, M. (2014, August). An algorithm for the detection of vessels in aerial images. In Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), 2014 11th IEEE International Conference, pp. 295-300.
10. Hawkins, J.; Ahmad, S.; Dubinsky, D. Hierarchical temporal memory including HTM cortical learning algorithms. 2010. Techical report, Numenta, Inc, Palto Alto http://www.numenta.com/htmoverview/education/HTM_CorticalLearningAlgorithms.pdf.

Implementación de un sistema de control de personal a bordo basado en iBeacon-BLE y Raspberry Pi

Camacho Lorenzo, Ione[1], Barragáns Martínez, Belén [1,*] y Fernández García, Norberto [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar; Emails: icamlor@fn.mde.es (ICL), belen@cud.uvigo.es (BBM), norberto@cud.uvigo.es (NFG).

***** Autor Principal y responsable del trabajo; Email: belen@cud.uvigo.es (BBM).

Abstract: La tendencia en el desarrollo de buques militares lleva a convertir a estos en entornos inteligentes que puedan interactuar con el personal embarcado, de forma que cada miembro de la dotación intercambie con los sistemas del barco información relevante para cumplir con sus cometidos. Como un primer paso en esta línea, el presente trabajo propone la implementación de un sistema de control de personal a bordo de los buques de la Armada Española. Dicho sistema permite localizar al personal embarcado y enviar alertas y órdenes al mismo. El sistema propuesto, basado en el uso de la tecnología *iBeacon* y *Bluetooth Low Energy* (BLE), se ha implementado usando placas *Raspberry Pi*. Para validar su funcionamiento, se ha llevado a cabo un despliegue del sistema en el patrullero "Tabarca", donde se ha evaluado su potencial aplicación en diferentes escenarios, obteniéndose resultados prometedores.

Keywords: control de personal; *iBeacon*; *Bluetooth Low Energy*; *Raspberry Pi*; localización

---

1. Introducción

El problema de la localización en interiores ha sido ampliamente investigado en los últimos años sin haber alcanzado una solución tan aceptada y extendida como es el GPS para el posicionamiento en exteriores. En el caso de este artículo, el interés se centra en los sistemas de control de personal a bordo de buques, cuestión que no ha sido resuelta satisfactoriamente todavía.

Este trabajo propone la implementación de un sistema de control de personal a bordo que proporcione un mecanismo de intercambio de información de interés. En particular, se proponen tres

principales escenarios de aplicación del sistema a desarrollar: (1) resolución del problema de localización de personal a bordo de buques, (2) sistema de envío de alarmas y órdenes al personal embarcado, y (3) detección temprana de la situación de *hombre al agua*.

Para desarrollar un sistema que cumpla con estos requisitos, se realiza, en primer lugar, una revisión de las tecnologías utilizadas en la actualidad en lo que respecta a la localización en interiores. Tras este análisis, se resuelve emplear la tecnología *Bluetooth Low Energy* (BLE) como base para el desarrollo de un sistema *iBeacon* que, empleando placas de ordenador reducido *Raspberry Pi* (RPi), permita realizar las funciones de control de personal a bordo.

Una vez diseñado e implementado el sistema basado en RPi y BLE [1], se realizan una serie de experimentos con la finalidad de validar empíricamente su aplicación en los tres escenarios propuestos. Las pruebas permiten concluir que el bajo consumo energético, el bajo coste, la facilidad de implantación de dicha tecnología y el tamaño relativamente reducido de los componentes que la implementan, convierten BLE en una buena opción para la configuración de un sistema *iBeacon* capaz de localizar personal a bordo de buques e intercambiar información con el mismo.

Tras esta introducción, la sección 2 de este artículo revisa las principales tecnologías empleadas en el ámbito de localización y posicionamiento en interiores. La sección 3 presenta el sistema *iBeacon* desarrollado. Los escenarios de aplicación de este sistema así como las pruebas de validación llevadas a cabo se muestran en la sección 4. Por último, la sección 5 presenta las principales conclusiones del artículo así como las líneas futuras de investigación que permitirán continuar este estudio.

2. Estado del arte

Esta sección compara los cuatro estándares de mayor interés existentes en la actualidad para resolver el problema de la localización y posicionamiento en interiores: tecnología *WiFi* (IEEE 802.11.a/b/g) [2], tecnología UWB (*Ultra WideBand* o radio de banda ultra ancha (IEEE 802.15.3)) [3], *ZigBee* (IEEE 802.15.4) [4] y *Bluetooth* (IEEE 802.15.1) [5].

Estándar / Características	Bluetooth	UWB	ZigBee	WiFi
Banda de frecuencia	2.4 GHz	3.1- 10.6 GHz	868/915 MHz;2.4GHz	2.4 GHz; 5GHz
Máxima tasa de señal	1 Mb/s	110 Mb/s	250 Kb/s	54 Mb/s
Alcance nominal	10 m	10 m	10-100 m	100 m
Potencia nominal de TX	-10 - 0 dBm	-41.3 dBm/MHz	(-25) - 0 dBm	15 - 20 dBm
Número de canales RF soportados	79	1-15	1-10; 16	14
Ancho de banda de canal	1 MHz	500 MHz-7.5 GHz	0.3/0.6 MHz; 2 MHz	22 MHz
Mecanismo de coexistencia	Saltos de frecuencia	Saltos de frecuencia	Selección dinámica de frecuencia	Selección dinámica de frecuencia y control de potencia de TX
Tipo de celda básica	Piconet	Piconet	Estrella	Subsistema de estación base (BSS)
Extensión en la pila básica	Scatternet	Peer-peer	Malla en árbol	Conjunto de servicio extendido (ESS)
Máximo número de nodos	8	8	Hasta 6500	Según red

Tabla 1. Comparación de estándares.

Como se observa en la Tabla 1, en lo referente a potencia de transmisión de señal, *Bluetooth* y *ZigBee* están principalmente pensados para dispositivos portátiles, alcances relativamente cortos y bajo consumo. Por otro lado, UWB está diseñado principalmente para tasas elevadas de transmisión de

datos a corto alcance, lo que supone un mayor consumo energético. Un problema similar de consumo energético elevado lo presenta también *WiFi*, que está pensado para conexión inalámbrica de área local y tasas de transmisión relativamente altas.

Tras llevar a cabo una revisión técnica de las diferentes tecnologías estudiadas y desarrolladas hasta el momento (veáse [1] para más detalle), se puede considerar el estándar *Bluetooth* como una tecnología con tasa de bit, alcance, potencias de operación, arquitectura y relación coste/complejidad totalmente aceptables y factibles para la implementación de este trabajo. Todo lo anterior queda reflejado en la variedad de proyectos desarrollados por importantes empresas del sector tecnológico [1], situando a *Bluetooth* como un estándar para la localización en entornos cerrados en los que se requiera interactuar con el usuario. Un ejemplo de ello lo constituye el proyecto *iBeacon* desarrollado por Apple Inc. [6].

3. Desarrollo del sistema *iBeacon*

iBeacon se define como un sistema de posicionamiento en interiores, compuesto por transmisores de bajo consumo y bajo coste, que permite la interacción mediante notificaciones entre un entorno inteligente y los usuarios que se encuentran en él.

3.1. Arquitectura

El funcionamiento de *iBeacon* se basa en la tecnología de transmisión de datos a corta distancia empleando *Bluetooth Low Energy* (BLE). La comunicación de un *iBeacon* usando BLE se realiza mediante la transmisión periódica de una trama de datos. La carga útil de dicha trama incluye todo lo necesario para que los dispositivos receptores puedan realizar las diferentes acciones: lectura de características de la baliza, localización e identificación del *iBeacon*. Para ello se utilizan diferentes campos entre los que destacan:

- **UUID:** Se trata de un identificador estándar (*norma ISO/IEC11578* [7]) único y universal utilizado en entornos de computación distribuida (no necesita coordinación central). Su función en un sistema *iBeacon* es identificar a todas las balizas pertenecientes a un mismo grupo.
- ***Major*:** Especifica un subgrupo de balizas dentro de un grupo principal.
- ***Minor*:** Identifica a una baliza específica dentro de un subgrupo.
- ***Tx Power*:** Indicador de potencia de transmisión del *iBeacon* (teórica) a un metro de distancia medida en dBm.

3.2. Posicionamiento con iBeacon. RSSI

El posicionamiento en interiores con un sistema *iBeacon* se define como posicionamiento por proximidad. Este concepto está basado en el cálculo de la distancia a un *iBeacon* mediante medición de la potencia de señal recibida. La estimación de la distancia proporcionada por una baliza se basa en la relación de la potencia de la señal *iBeacon* recibida (RSS, *Received Signal Strength*) sobre la potencia calibrada del transmisor (*Tx Power*). Esta relación queda definida por el RSSI (*Received Signal Strength Indicator)* que toma la siguiente expresión:

$$RSSI\ [dBm] = -(10 * n)\log_{10}(d) - A \quad (1)$$

Siendo *n* la constante de pérdidas por propagación (toma valores entre 2.7 y 4, para propagación en el vacío, n=2), *d* la distancia entre emisor y receptor (en metros) y *A* el valor de *Tx power* (en dBm).

Despejando *d* de la expresión (1), se obtiene la distancia relativa entre emisor y receptor. Por tanto, la precisión en la posición dependerá de la correcta calibración previa del *iBeacon* para tener un ajustado valor de *Tx power* y la calidad de medición de la RSSI por el hardware receptor.

Hay un factor que debe considerarse al calcular la distancia emisor y receptor, que afectará de forma notable a dicho valor: la fluctuación de RSSI. Ésta puede producirse por diferentes motivos [8]: reflexión, refracción, difracción, s*cattering*, multitrayecto y la orientación relativa entre emisor/receptor. Los anteriores factores no se tienen en cuenta en los cálculos de distancia con la expresión (1), por lo que se ven reflejados en el valor *d*. Por este motivo, el posicionamiento *iBeacon* por proximidad utiliza un sistema de referencia relativo y centrado en el receptor en el que la situación se establece en tres rangos que son función directa de los valores en los que oscila *d*: *immediate* (0.1 m $< d <$ 1 m), *near* (1 m $\leq d <$ 10 m) y *far* ($d \geq$ 10 m). El rango teórico máximo de distancia para un *iBeacon* utilizando BLE es de 100 metros en condiciones ideales de propagación.

3.3. Modo LEAd con iBeacon

Otra de las funcionalidades que posee un sistema *iBeacon* es la de interactuar con el entorno en el que se encuentra. Para ello, la baliza envía un paquete de datos que contiene toda la información que se quiere compartir. Esta transmisión de información se realiza en modo *Bluetooth Low Energy Advertising* (LEAd), y consiste en la difusión del paquete de datos periódicamente. La carga útil es decodificada en los receptores por aplicaciones compatibles permitiendo identificar la baliza. Tras la identificación, el dispositivo receptor analiza la información relacionada con el *iBeacon* en una base de datos (servidor, nube, etc.) y presenta dicha información de forma intuitiva al usuario.

4. Escenarios de aplicación del sistema *iBeacon*

Una vez analizada la tecnología BLE y los principios teóricos de funcionamiento del sistema, se configura el sistema *iBeacon* [1] empleando un ordenador de placa reducida Raspberry Pi versión B+ [9]. Presentamos en la sección 4.1 los experimentos preliminares llevados a cabo como paso previo a la demostración de funcionamiento para cada uno de los escenarios de aplicación definidos.

4.1. Experimentos preliminares

Esta fase se ha llevado a cabo en tres tipos de ubicaciones con diferentes características físicas:

- Hall del Cuartel de Alumnos: Escenario libre de objetos, con una extensión de 80 m^2, recubrimiento de cemento y visión directa con los puntos de colocación de las balizas.
- Seminarios del CUD (Centro Universitario de la Defensa): Escenario compartimentado, con diferentes dimensiones cada uno, recubrimiento no metálico y sin visión directa con los puntos de colocación de las balizas.
- Patrullero “Tabarca”: Escenario compartimentado, con dimensiones variables y recubrimiento metálico, siendo éstas las características comunes de los buques en los que se pretende implantar el sistema *iBeacon*.

Los experimentos se realizaron en dos etapas principales. La primera etapa se orientó a la configuración del sistema *iBeacon* con el fin de determinar los patrones de comportamiento estables de la señal *Bluetooth* y su relación con la distancia escáner-*iBeacon*. Permitió concluir que el sistema *iBeacon* es suficientemente robusto frente a posibles interferencias de dispositivos *Bluetooth* con características similares. Asimismo, se estableció el intervalo de repetición de pulsos (PRI) en 1500 ms (la señal presenta mayor estabilidad en la propagación) y la posición de la baliza para obtener la configuración estable del sistema (baliza orientada en el plano XZ).

La segunda etapa se centró en el análisis de RSSI en diferentes escenarios y situaciones con el fin de validar la posibilidad de implementación del sistema de localización basado en *iBeacon*. Permitió determinar que es posible establecer un patrón de comportamiento de la señal *Bluetooth* en interiores. Asimismo, en entornos compartimentados y relativamente estancos, se constata que la señal presenta límites de propagación que determinan zonas de cobertura de señal. Se confirma también que existen zonas de incertidumbre en las que es difícil prever un patrón de comportamiento estable de la señal.

4.2. Escenario de localización a bordo

Tras el análisis anterior, se simuló un entorno de localización a bordo del patrullero “Tabarca” con el fin de analizar la viabilidad del sistema *iBeacon* para el posicionamiento en interiores. Este experimento requirió la instalación de una infraestructura fija formada por escáneres BLE, conectados entre sí y formando una red de sensores capaz de detectar la presencia de *iBeacon* en sus correspondientes áreas de cobertura. La prueba consistió en la monitorización de los datos escaneados por tres RPi (modo escáner) a medida que un individuo se desplazaba por el buque con el *iBeacon* en el bolsillo de su pantalón. Se siguió un itinerario registrando los tiempos en los que el *iBeacon* accedía a los compartimentos de interés así como el momento en el que se accedió a exteriores.

Cabe destacar que el itinerario se realizó a ritmo constante, anotando 20 valores de RSSI en cada uno de los puntos de registro de medidas. El objetivo del experimento era reproducir dicho itinerario analizando los valores de RSSI de cada uno de los escáneres, valores que permiten definir la proximidad del *iBeacon* a un escáner u otro. La distancia se calculó con la fórmula (1).

Se puede afirmar que, en el entorno interior definido por un buque, como es el escenario de pruebas a bordo del “Tabarca”, las dimensiones de los compartimentos permiten establecer la zona de cobertura de los escáneres a un radio no superior a los 10 metros. Por tanto, el rango de proximidad se centrará entre *immediate* y *near*. Para situar un *iBeacon* dentro de este entorno interior, bastará con analizar la distancia de éste a cada uno de los escáneres situados en puntos de referencia conocidos identificando en qué rango de proximidad se encuentra.

Con los resultados obtenidos pudo reproducirse un itinerario aproximado al realmente realizado donde la localización del *iBeacon* se realiza por compartimentos o por áreas dentro del buque. Existen algunas zonas de incertidumbre donde el posicionamiento no está claramente definido. Bastaría con la colocación de otro escáner para resolver estas indefiniciones. Por tanto, uno de los factores importantes a tener en cuenta para la implementación del sistema *iBeacon* de localización es la correcta colocación de los escáneres BLE dentro del escenario, permitiendo establecer en éste zonas de cobertura comprendidas solamente entre rangos *immediate* y *near*.

4.3. Escenario de envío de alarmas y órdenes

Se ha implementado un mecanismo que permite el envío de mensajes a un *iBeacon*. Esto posibilita el envío de alarmas y órdenes al personal portador de los *iBeacon*. Para ello, el escáner, actuando como maestro, recibe el paquete LEAd de un *iBeacon* que se encuentre en su zona de cobertura. El *iBeacon* se encuentra transmitiendo en modo LEAd y, a la vez, realiza un escaneo *Low Energy* pasivo que le permite identificar paquetes LEAd en caso de que el maestro los envíe.

Esta funcionalidad se implementa de dos formas diferentes: por un lado, el sistema de envío de alarmas está pensado para alertas generales que deben ser transmitidas a todo el personal del buque en una situación determinada (zafarrancho de combate, abandono de buque, etc.); por otro lado, el sistema de envío de órdenes está pensado para ser ejecutado entre un maestro (escáner) y un esclavo (*iBeacon*) en concreto dentro de su zona de cobertura, creando una línea de mando interna.

En el momento que sea necesario activar el sistema de envío de alarmas/órdenes, el maestro envía un paquete LEAd al *iBeacon* caracterizado por un valor de *UUID, Major y Minor*. El valor de *UUID* enviado por el maestro coincidirá:

- en el caso del envío de alarmas, con el *UUID* configurado en el sistema *iBeacon* para la activación del sistema de alarmas.
- en el caso del envío de órdenes, con el *UUID* del *iBeacon* al que se quiere enviar la orden.

El valor de *Major* identifica el grupo de alarma o de orden que se quiere enviar. El valor de *Minor* identifica la alerta u orden en concreto que debe ser enviada. Por ejemplo, en este caso se configuraron dos tipos de alertas agrupadas en el grupo de alarmas generales correspondiente a los *Major* de valor 10: Alerta de *Zafarrancho de Combate* (*Minor=1)* y alerta de *Abandono de Buque* (*Minor=2).* En ambos casos (órdenes y alertas), éstas se reprodujeron correctamente en audio una vez recibidas.

4.4. Escenario de detección de hombre al agua

La situación de hombre al agua en un buque puede producirse solamente cuando una persona se encuentra en exteriores del buque. Si un *iBeacon* no es registrado por un escáner situado en exteriores, puede ser por tres motivos diferentes: (i) *iBeacon* inoperativo: esta situación puede producirse por mal funcionamiento, falta de batería o avería, (ii) *iBeacon* accede a interiores: en esta situación, el *iBeacon* estará situado en la zona de cobertura de un escáner en interiores, (iii) *iBeacon* cae por la borda: el *iBeacon* sale de la zona de cobertura de un escáner en exteriores sin ser detectado por ningún otro escáner, ya sea de interiores o de exteriores.

Con lo expuesto en el apartado 4.2, se puede afirmar que en un escenario de localización a bordo es posible diferenciar cuando un *iBeacon* se encuentra en un compartimento interior o en una zona de exteriores. Por tanto, se descarta la situación de hombre al agua con una localización positiva en interiores. Además, se ha visto que es posible determinar el momento en el que un *iBeacon* accede o abandona exteriores realizando una correcta colocación de los escáneres BLE en los accesos. Sin embargo, se hace imposible distinguir entre los casos (i) y (iii), es decir, una situación de *iBeacon* inoperativo podría dar lugar a un falso positivo de la situación de hombre al agua.

La inoperatividad de un *iBeacon* puede ser consecuencia de avería, mal funcionamiento o falta de batería. La situación de avería o mal funcionamiento de las balizas es completamente impredecible,

presentando como única solución la realización periódica de revisiones y mantenimientos de los dispositivos. Por otro lado, la falta de batería es predecible haciendo uso de los indicadores visuales de carga remanente en las fuentes de alimentación, dependiendo completamente del factor humano.

Con el fin de aislar el factor humano de la gestión de carga de las fuentes de alimentación del sistema *iBeacon*, se ha incluido un sistema de aviso de nivel de batería (basado en la placa de monitorización energética *MoPi* [10]) que permita a éste informar el nivel de carga remanente a los escáneres próximos. El *iBeacon* transmitirá un valor de *Tx Power* correspondiente al nivel de energía remanente en su fuente de alimentación. El escáner, al recibir la información del valor de *Tx Power*, lo analizará y será capaz de determinar el nivel de batería del *iBeacon* que se encuentra dentro de su zona de cobertura. Utilizando este mecanismo es posible conocer el nivel de batería de nuestro sistema *iBeacon* en cada instante que se quiera. Una vez que los escáneres, dentro de un escenario de localización, son capaces de conocer el último valor del nivel de batería de un *iBeacon* del cual se pierde la señal en exteriores, se puede establecer un nivel de probabilidad de que la situación de hombre al agua sea real o no. En el caso de que el último valor registrado sea *batería baja*, la probabilidad real de hombre al agua es baja. Por otro lado, si el último registro coincide con un valor de *batería alta*, la probabilidad real de un hombre al agua es elevada.

Sin embargo, sigue siendo imposible descartar completamente la hipótesis de inoperatividad del *iBeacon* planteada al inicio de este apartado. Una posible solución es la redundancia de dispositivos, es decir, que el personal porte dos *iBeacon*, reduciendo la probabilidad de que se produzca la inoperatividad de estos en un mismo instante.

5. Conclusiones

Se concluye que el bajo consumo energético, el bajo coste, la facilidad de implantación y el tamaño relativamente reducido de los componentes que la implementan, convierten a BLE en una buena opción para la configuración de un sistema *iBeacon* capaz de localizar personal a bordo de buques e intercambiar información con el mismo. El sistema *iBeacon* propuesto resuelve el problema del control de personal en entornos cerrados salvando algunas limitaciones:

- la localización se realiza por proximidad, lo que limita ésta a zonas que deben ser acotadas previamente;
- el sistema *iBeacon* debe ser implementado conjuntamente con un *software* dedicado que sea capaz de gestionar la información necesaria para llevar a cabo el control de personal;
- el sistema de detección de hombre al agua se complementa con un sistema de transmisión de información acerca del nivel de batería del sistema *iBeacon*, con el fin de diferenciar la pérdida de recepción de señal *iBeacon* por caída al mar o por falta de energía en la baliza.

Por otro lado, la utilización de una placa RPi para la construcción de los tres prototipos de pruebas deja en evidencia las limitaciones de los mismos. El tamaño de los prototipos, así como el consumo registrado por el sistema *iBeacon* implementado sobre esta placa, son factores que hacen poco recomendable su uso en los dispositivos que transporta el personal a controlar, aunque sí sería viable su uso en los escáneres utilizados como infraestructura fija, ya que estos pueden ser alimentados por la instalación eléctrica del buque.

Expuesto lo anterior, se plantean dos líneas de investigación futuras principales. En primer lugar, se propone el estudio de la implementación del sistema *iBeacon* en dispositivos de tamaño y consumo reducido, empleando teléfonos móviles con tecnología BLE y microchips especializados en BLE [11], que permitan llevar a cabo las funciones del sistema en todos los escenarios propuestos con un consumo energético aceptable. En segundo lugar, se sugiere realizar el levantamiento de mapas de cobertura de los RPi en modo escáner, que permitan definir correctamente los puntos de instalación de los escáneres en la infraestructura fija a bordo de los buques. Con el apoyo de técnicas de aprendizaje máquina, se podría lograr la compartimentación de espacios de manera automática.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al comandante del patrullero “Tabarca”, TN Valentín Calvar Cerecedo, así como a su dotación, por su disponibilidad absoluta que ha permitido la realización de los experimentos aquí descritos.

Referencias

1. Camacho Lorenzo, I. Sistema de control de personal a bordo: Implementación de un sistema iBeacon-BLE basado en Raspberry Pi. Trabajo de fin de grado, Centro Universitario de la Defensa en la ENM, 2015. En línea: http://calderon.cud.uvigo.es/handle/11621/13 [28/07/2015]
2. WiFi Alliance, *WiFi Alliance Organization.* En línea: http://www.wi-fi.org [30/07/2015]
3. UWB, *ETSI-Ultra Band Wide.* En línea: http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/radio/ultra-wide-band [30/07/2015]
4. Tadakamadla, S. Indoor Local Positioning System for ZigBee, based on RSSI. M.Sc. Thesis Report within Electrical Engineering Department, Mid Sweden University, 2005. En línea: http://www.researchgate.net/publication/242665667_Indoor_Local_Positioning_System_For_ZigBee_Based_On_RSSI [28/07/2015]
5. Bluetooth Org, *Bluetooth SIG website.* En línea: http://www.bluetooth.org [28/07/2015]
6. Apple Inc., *iBeacons for developers.* En línea: https://developer.apple.com/ibeacon [28/07/2015]
7. International Organization for Standardization, ISO/IEC 11578:1996: *Information technology - Open Systems Interconnection - Remote Procedure Call* (RPC). En línea: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=2229 [28/07/2015]
8. Ghose, A.; Bhaumik, C.; Chakravarty, T. BlueEye: a system for proximity detection using bluetooth on mobile phones. In *Proceedings of the ACM Conference on pervasive and ubiquitous computing adjunct publication* (UbiComp'13 Adjunct). ACM, New York, NY, USA, 1135-1142. 2013. http://doi.acm.org/10.1145/2494091.2499771
9. GitHub, *Reliable Bluetooth LE (iBeacon) scanner for Raspberry Pi.* En línea: *https://github.com/switchdoclabs/iBeacon-Scanner-* [28/07/2015]
10. MoPi, *Hot-Swap Mobile Power for the Pi.* En línea: https://pi.gate.ac.uk/pages/mopi.html [28/07/2015]
11. CSR Products, *Development Boards and Development Kits Evaluation.* En línea: http://www.csr.com/products/csr101x-product-family [28/07/2015]

Sesión IV-B

Guiado, Energía y Materiales

Planificación y control de la trayectoria de un vehículo autónomo submarino para su recogida desde una plataforma submarina móvil

Martínez Ibáñez, Pedro [1,*], **Aguirre Martínez, José L.** [1], **Saura Sánchez, Mariano** [1], **Segado Cabezos, Pablo** [1] **y Luaces Fernández, Alberto** [2]

[1] Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica de Cartagena, Doctor Fleming, s/n, 30202 Cartagena, España; [joseluis.aguirre,msaura.sanchez]@upct.es, [pmi,psc1]@alu.upct.es

[2] Laboratorio de Ingeniería Mecánica, Universidad de La Coruña, Mendizábal, s/n, 15403 Ferrol, España; aluaces@udc.es

* Autor responsable del trabajo; pmi@alu.upct.es

Abstract: Los vehículos submarino autónomos (AUV) han experimentado un fuerte desarrollo durante la última década y sus aplicaciones crecen constantemente en muchos sectores. Sin embargo, existe un riesgo asociado a su recuperación y hay un gran interés en el desarrollo de algoritmos y métodos efectivos para asistir en esta compleja maniobra. En este artículo, se han desarrollado e implementado dos algoritmos que planifican y controlan la trayectoria de un AUV para su recogida submarina desde una plataforma móvil. La trayectoria presenta como principal característica una definición relativa a la plataforma móvil; esto ofrece ventajas respecto a las trayectorias globales como evitar obstáculos conectados a la plataforma mientras ésta se desplaza. La efectividad del algoritmo, aplicable a cualquier AUV, ha sido comprobada mediante simulaciones dinámicas de un REMUS 100, considerando variaciones en: posición y orientación inicial del AUV, velocidad y trayectoria de la plataforma móvil, y tasa de actualización del sistema de medida USBL. De los resultados se deduce que los algoritmos desarrollados son capaces de planificar la trayectoria en un amplio rango de condiciones iniciales, así como de controlar el vehículo durante toda la trayectoria con errores por debajo de 0,4 metros en posición y 10 grados en orientación.

Keywords: Planificación y control de trayectoria, Vehículos autónomos submarinos, Plataforma de recuperación submarina, Simulación dinámica.

---

1. Introducción

Los últimos avances en electrónica submarina, gestión energética a bordo del vehículo, así como en hardware y software para adquisición, tratamiento y almacenamiento de grandes cantidades de información, han permitido dotar a los AUV de unas prestaciones tan elevadas que han llamado la atención de organismos de diversa índole: armada, centros de investigación y empresas privadas, por citar algunos ejemplos.

Sin embargo, la recogida de un AUV desde una plataforma submarina móvil, que supone problema de gran interés en la actualidad, no está resuelta a pesar de los avances tecnológicos enunciados. Esto es debido, principalmente, a que los puntos de paso waypoints se definen en coordenadas respecto a un sistema inercial (no válidos para definir con precisión una trayectoria de recogida si la plataforma es móvil), a que la precisión requerida en la instrumentación para evitar choques y zonas prohibidas a la navegación es muy elevada y a que el limitado ancho de banda en las comunicaciones submarinas reduce significativamente las posibilidades de guiado y control preciso hacia el punto de recogida.

En este trabajo se propone una solución a este problema, basada en la planificación y seguimiento de una trayectoria definida en términos de posicionamiento relativo respecto a la plataforma móvil. De esta forma se puede cargar en el vehículo la trayectoria de recogida e, independientemente del movimiento del objetivo, quedará asegurado que el vehículo alcanzará la plataforma, evitando los obstáculos y las zonas de navegación prohibidas. El objetivo de este trabajo es, por tanto, definir y describir los algoritmos que permitan la planificación de la trayectoria y el control de un AUV durante el seguimiento y alcance de un objetivo en movimiento y comprobar su estabilidad ante posibles variaciones en las condiciones de recogida.

2. Material y métodos

En esta sección se describen el modelo dinámico del AUV y los algoritmos implementados para la planificación y control de trayectoria. También se describen las pruebas a llevar a cabo para evaluar la eficacia de los métodos propuestos.

2.1. Modelo dinámico del vehículo

La eficacia de los algoritmos de planificación y control de trayectoria propuestos se evalúa mediante simulación del comportamiento del AUV en un entorno submarino. Se ha considerado el AUV REMUS100 cuyo modelo de comportamiento dinámico se puede encontrar en [1].

2.2. Planificación de trayectoria

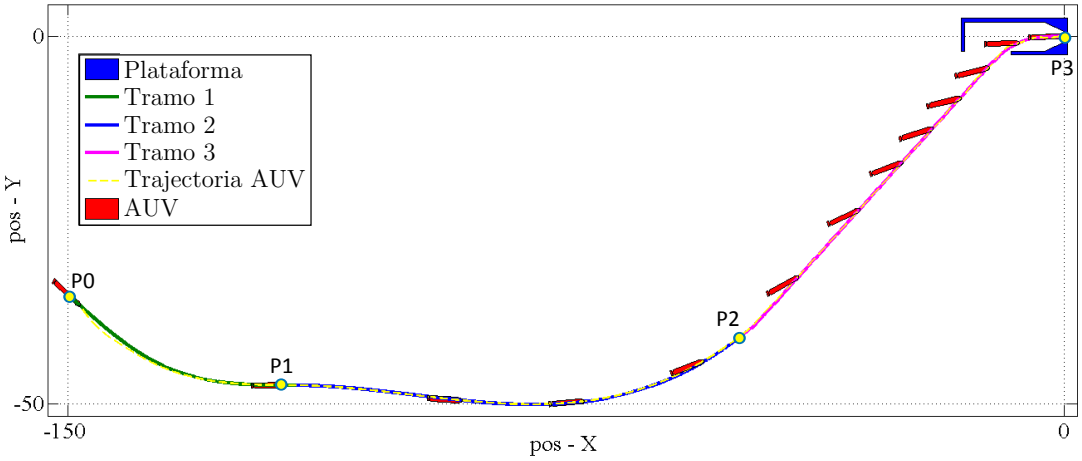
Considerando la posición y orientación actuales del AUV respecto a la plataforma de recogida, la velocidad a la que debe recorrer distintos tramos de la trayectoria, y la velocidad y trayectoria de la plataforma de recogida, el AUV ejecuta un algoritmo de planificación de trayectoria que le permitirá llegar al punto de destino evitando invadir determinadas zonas fijadas de antemano. Esta trayectoria se define en tres tramos (Figura 2.4):

Tramo $\overline{P_0P_1}$: trazado con curvas clotoide y circulares [2], permite al AUV orientarse con el mismo rumbo del objetivo, manteniendo la cota en todo el trayecto.

Tramo $\overline{P_1P_2}$: Mediante curvas spline de tercer grado se dirige al AUV hasta una posición preestablecida, próxima al objetivo y a su misma cota. En los ensayos realizados, esta posición se ha fijado en (-48,-41,0 m) respecto de un sistema de referencia solidario al objetivo.

Tramo $\overline{P_2P_3}$: Se define antes del inicio de la misión mediante clotoides, rectas y arcos de circunferencia.

Figure 1. Vista en el plano horizontal de los diferentes tramos de la trayectoria planificada y la trayectoria real seguida por el AUV. Velocidad del objetivo: 1 nudo.



El algoritmo de planificación de trayectoria tiene en consideración que la curvatura máxima no exceda la permitida para el AUV. Para el REMUS100 este radio de curvatura mínimo es de 6m.

2.3. Sistema de Control de trayectoria

El sistema de control implementado actúa sobre los tres elementos de gobierno del AUV: timón de buceo, timón de ceñida y propulsión, a partir de los errores de posición, orientación y velocidad calculados al comparar valores obtenidos mediante sus sistemas de navegación (IMU + USBL) con los planificados en su trayectoria (Fig.2).

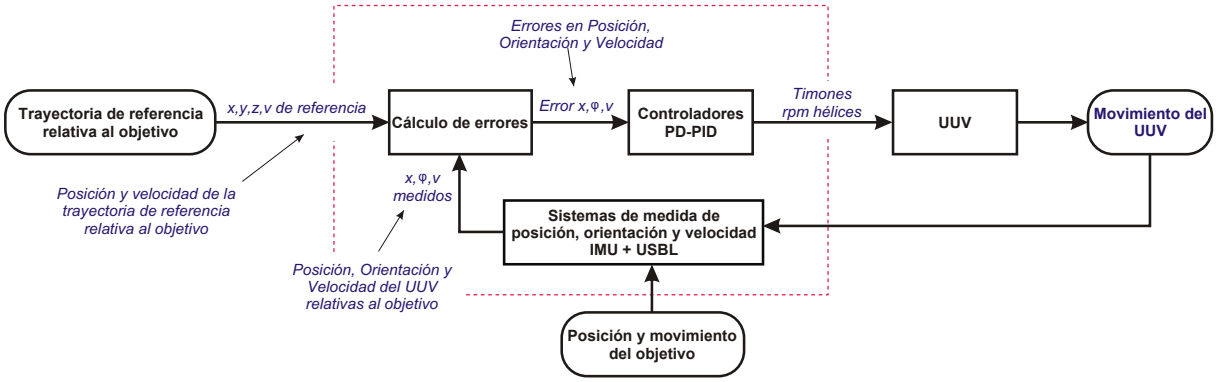
I. Sistemas de navegación: IMU + USBL: En los instantes indicados por la tasa de refresco del USBL, el algoritmo de control evalúa la posición y orientación del AUV relativa a la plataforma submarina (en el valor se incluye un error máximo de 0.1º y 0.01m, [3]).

El funcionamiento de la IMU es continuo. Para las simulaciones se ha considerado la IMU: 1750-IMU de KVH INDUSTRIES, INC con errores de $\pm 2mg$ y $\pm 2^o/hr$.

II. Cálculo de errores. Este módulo determina los errores del AUV en el seguimiento de trayectoria.

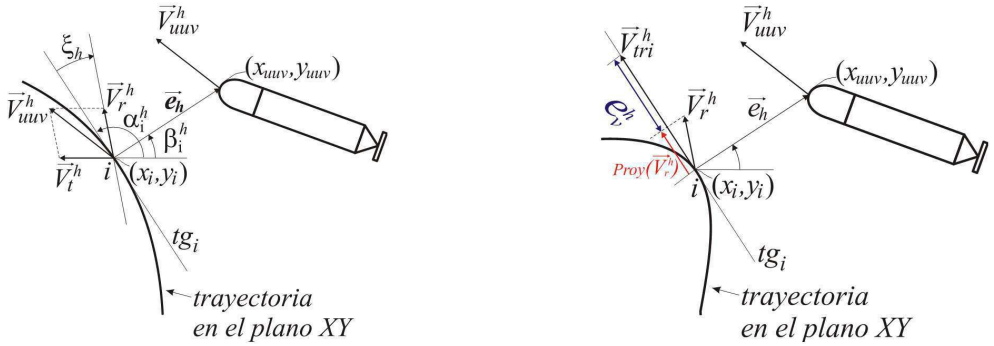
Error de posición: Se considera como plano vertical el generado a partir del eje z y la recta tangente a la trayectoria en cada punto, y como plano horizontal el que pasa por dicha recta y es perpendicular al vertical. En el plano horizontal (Fig.3.a) el error de posición $|\vec{e}_h(t)|$ se calcula como la mínima distancia

Figure 2. Esquema en el que se presentan los diferentes elementos del sistema de control.



entre la posición estimada de la proa del AUV (x_{auv}, y_{auv}), y la proyección horizontal de la trayectoria. En el plano vertical $|\vec{e}_z(t)|$ se calcula como la diferencia de cota entre el punto (x_i, y_i, z_i) de la trayectoria y su posición $(x_{auv}, y_{auv}, z_{auv})$ estimada.

Figure 3. Esquemas en el que se muestran en el plano horizontal: (a) las variables para el cálculo del error de trayectoria. (b) las variables para el cálculo del error de velocidad.



Error de orientación: Se define como la diferencia angular entre dos vectores: velocidad relativa del AUV respecto a la plataforma móvil $(\vec{V}^h_{auv} - \vec{V}^h_t)$ y la dirección de la recta tangente a la trayectoria en el punto de mínima distancia (x_i, y_i), que proyectados sobre el plano horizontal y vertical permiten calcular $\xi_h(t)$ y $\xi_z(t)$ respectivamente. La Figura 3.a muestra los vectores implicados en la definición del vector de orientación en el plano horizontal.

Error de velocidad: e_v, se calcula como la diferencia entre la velocidad,$\vec{V}_{tri}$, que debería llevar el vehículo en cada punto de la trayectoria (x_i, y_i), relativa al objetivo, y la proyección $Proy\vec{V}_r$ de la velocidad relativa real del AUV sobre la recta tangente a la trayectoria en ese punto. Los vectores y parámetros involucrado en este cálculo se muestran en la Figura 3(b).

Tres controladores PID (proporcional-integral-derivativo) actúan sobre la orientación de los timones de rumbo y de buceo, así como sobre la velocidad del giro de la hélice para controlar: ceñida, cabeceo y velocidad del AUV respectivamente.

El controlador de rumbo evalúa la orientación λ_{ti} de ese timón, en función de los errores de posición $(|\vec{e}_h|)$ y orientación horizontal (ξ_h) según se observa en Ec.1.

$$\lambda_{ti} = K_{pd}[\vec{e}_h(t) + T_{dd}\dot{\vec{e}}_h(t) + \frac{1}{T_{id}}\int \vec{e}_h(t)dt] + K_{pa}[\xi_h(t) + T_{da}\dot{\xi}_h(t)dt + \frac{1}{T_{ia}}\int \vec{\xi}_h(t)dt] \quad (1)$$

El controlador de buceo evalúa la orientación λ_{ti}^z de ese timón en función de los errores de posición $|\vec{e}_z(t)|$ y orientación vertical $\xi_z(t)$, según se muestra en Ec. 2.

$$\lambda_{ti}^z = K_{pd}^z[\vec{e}_z(t) + T_{dd}^z\dot{\vec{e}}_z(t) + \frac{1}{T_{id}}\int \vec{e}_z(t)dt] + K_{pa}^z[\xi_z(t) + T_{da}^z\dot{\xi}_z(t) + \frac{1}{T_{ia}^z}\int \vec{\xi}_z(t)dt] \quad (2)$$

El controlador de velocidad actúa sobre la velocidad angular n_{rpm} del sistema de propulsión (Ec.3).

$$n_{rpm} = K_p[e_v(t) + T_d\dot{e}_v(t)) + \frac{1}{Ti}\int e_v(t)dt] \quad (3)$$

Los parámetros se han ajustado por tanteo, buscando un compromiso entre estabilidad y rapidez.

2.4. Ensayos realizados

Para evaluar la eficacia de los algoritmos desarrollados se han realizado simulaciones dinámicas con Matlab que intentan comprobar sus capacidades para generar y seguir una trayectoria hasta un punto prefijado, con unas restricciones de navegación y cambiando condiciones tales como: la posición y orientación iniciales del AUV, la velocidad de la plataforma móvil, etc...

Como zonas de navegación prohibida se exige al AUV que alcance el punto objetivo del interior de una jaula con forma de prisma cuadrangular de $15 \times 4 \times 4m$, con una apertura lateral de $7m$. La proyección horizontal de esta caja se puede apreciar en la Figura .

Los errores máximos admisibles en el punto de llegada definidos para los ensayos son: $\pm 0,4m$ y $\pm 10^{\text{o}}$. Límites más exigentes que los encontrados en la bibliografía para este mismo AUV[4].

3. Resultados y Discusión

3.1. Verificación de la planificación de trayectoria

La Figura 4 muestra la capacidad del algoritmo de planificación para definir la trayectoria que el AUV debe seguir para alcanzar el objetivo móvil. En la Figura 4.a, cambiando el punto de partida y en la Figura 4.b, partiendo de una misma posición, y variando el punto inicial del último tramo.

3.2. Errores en seguimiento de trayectoria

En la Figura 5 se representan, a modo de ejemplo, los errores de posición y orientación del REMUS 100 en una simulación, tanto en el plano vertical como en el horizontal frente al tiempo.

En la gráfica del error de posición (Figura 5) se aprecian pequeñas oscilaciones ($\pm 0.2\,m$) a lo largo de todo el recorrido, algo mayores en ceñida.

El error en orientación (Figura 5) presenta una oscilación más acusada debido a su mayor sensibilidad frente a la actuación de los timones. La magnitud de estos errores es baja ($\pm 5\,^{\text{o}}$) en todo el trayecto, lo que indica que el controlador actúa eficazmente en tramos con diferente radios de curvatura.

Figure 4. Rutas planificadas al modificar algunos parámetros de la trayectoria.

(a) Modificación del punto inicial. **(b)** Modificación del tramo final.

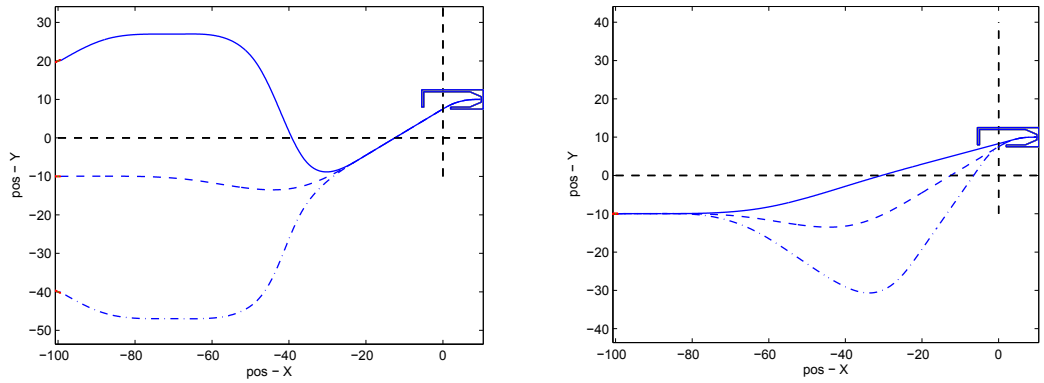
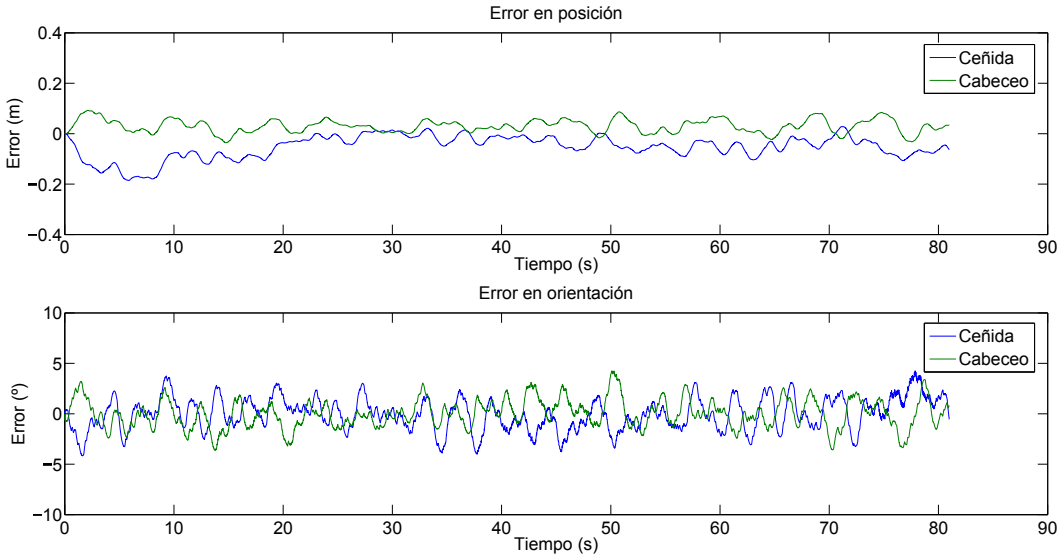


Figure 5. Errores para el REMUS 100 a lo largo de toda la trayectoria. Las condiciones del ensayo son: refresco del USBL (0.1 s), posición y orientación inicial (-110,20,-20 m) y (0°,0°), velocidad del objetivo (1 kn) y la velocidad relativa de llegada (0.5 m/s).

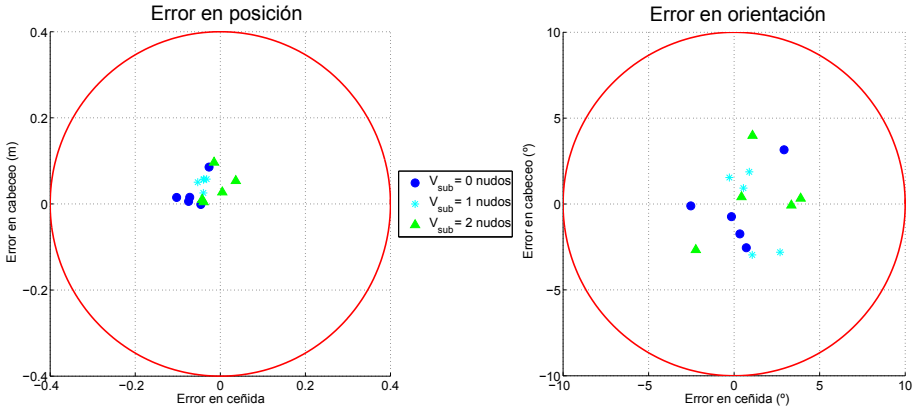


3.3. Errores de posición y orientación en el punto objetivo

La determinación de los errores de posición y orientación del AUV en el punto de llegada, o punto objetivo, permite evaluar la eficacia de los algoritmos de control desarrollados. Según se ha indicado en la sección 2.4, estos errores se evalúan bajo las condiciones definidas en el ensayo de referencia (sección 3.2), pero con las siguientes variaciones:

- Objetivo desplazándose a diferentes velocidades (0, 1 y 2 nudos).
- Objetivo describiendo una trayectoria curva (radios de curvatura: 100m, 500m y ∞).
- Diferentes tiempo de refresco del USBL

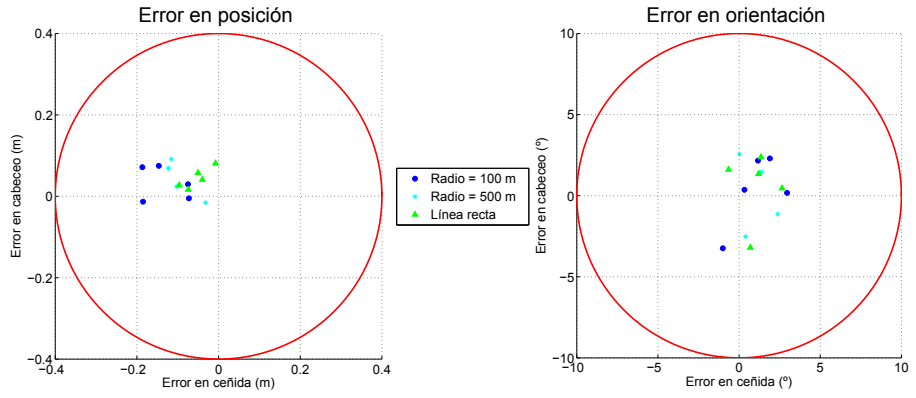
Figure 6. Errores finales en posición y orientación cometidos por el REMUS100 para diferentes velocidades de desplazamiento del objetivo.



Analizando la Figura 6.a se observa que el vehículo es capaz de alcanzar el área objetivo sin problemas para cualquiera de las velocidades del AUV ensayadas, con errores en posición máximos en torno a 0.1m. Existe una baja dispersión en los resultados y se aprecia que a menor velocidad del objetivo, los errores en posición más se desplazan hacia un lado. Esto es debido a un peor gobierno en la navegación del AUV como consecuencia de una disminución de su velocidad. Además, a medida que aumenta la velocidad del objetivo, la trayectoria real del AUV se suaviza, simplificando la maniobra.

En cuanto a la parte de error en orientación de la Figura 6.b, se aprecia que el vehículo acierta en el área objetivo con una desalineación inferior a $\mp 5^{o}$ para cualquier velocidad de las ensayadas.

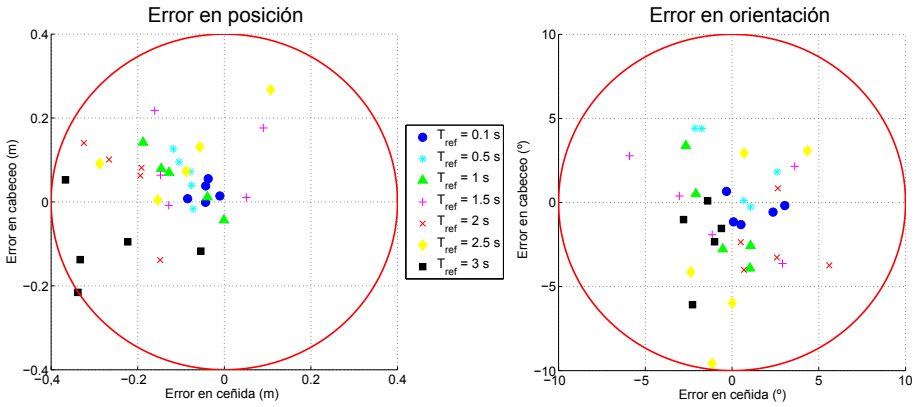
Figure 7. Errores finales en posición y orientación cometidos por el REMUS100 para diferentes radios de curvatura de la trayectoria descrita por el objetivo.



En la Figura 7 se aprecia que el vehículo acierta en el área objetivo con una desalineación inferior a $\mp 5^{o}$ para todos los radios de curvatura considerados en el análisis. Existe un pequeño incremento en la dispersión de los errores de posición en ceñida que puede explicarse por la mayor complejidad de la maniobra de aproximación conforme la trayectoria del objetivo es más cerrada.

En los ensayos realizados cambiando el tiempo de refresco del USBL (Figura 8) se aprecia que el vehículo no acierta en el área objetivo para intervalos de refresco superiores a 3s, en cambio, el error

Figure 8. Errores finales en posición y orientación cometidos por el REMUS100 para diferentes tiempos de refresco de la señal USBL.



en orientación, no supera en ningún caso los 10°. La dispersión del error de posición aumenta con el incremento del intervalo de refresco.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha descrito un algoritmo de planificación y control de un AUV que debe seguir una plataforma móvil y alcanzar un punto de recogida evitando unas zonas restringidas.

El algoritmo de planificación de trayectoria ofrece, entre otras, las siguiente ventajas: - la definición independiente del último tramo de la trayectoria permite asegurar que el vehículo alcanza el punto objetivo evitando obstáculos y las zonas de navegación prohibida conocidos de antemano - el seguimiento preciso de la plataforma independientemente de su trayectoria y velocidad, manteniendo pequeñas desviaciones en el error a la llegada - una alta flexibilidad en la definición de trayectoria al permitir un amplio rango de posición y orientaciones iniciales del AUV.

Del algoritmo de control, se deducen las siguientes conclusiones: - el error en orientación máximo se mantiene por debajo de $\mp 5^{o}$ a lo largo de la trayectoria, este error se encuentra por debajo de los límites definidos para una recogida segura - se obtienen pequeñas mejoras en la precisión en posición cuando la velocidad del objetivo se incrementa, y el efecto contrario cuando el radio de curvatura de la trayectoria se reduce. A pesar de estas variaciones, en todas las simulaciones el AUV acierta en el objetivo con una precisión alta.

Referencias

1. Prestero, T. Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Unverwater Vehicle. Tesis de master, *MIT/WHOI* **2001**.
2. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Instrucción de carreteras. *Norma 3.1-IC*.
3. EvoLogics. USBL positioning and communication systems. Product information guide 2013.
4. Allen, B.; Austin, T. et al. Autonomous Docking Demostrations with Enhanced REMUS Technology. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **2006**.

Arquitectura de control modular y escalable para vehículos autónomos no tripulados

Velasco, Francisco J. [1,*], Trujillo, Jesús [2], Lastra, Francisco J. [1], Revestido Herrero, Elías [1], Vega Luis M. [3]

[1] Dept. Tecnología Electrónica e Ingeniería de Sistemas y Automática, Univ. Cantabria,
. Email: velascof@unican.es (FJV), lastrafj@unican.es (FJL), revestidoe@unican.es (ERH)
[2] Iberalter, Email: *jesus.trujillo@iberalter.es* (JT).
[3] Dept. Construcciones navales y técnicas de la navegación, Univ. Cantabria, Email: vegalm@unican.es (LMV).

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: velascof@unican.es (FJV);

Abstract:

En el presente artículo se propone una arquitectura híbrida basada en sistemas multiagente para el control de movimiento de vehículos autónomos no tripulados. También se desarrolla una metodología para la generación y el seguimiento de la trayectoria en el interior de un espacio virtual fiable, sobre el cual, la navegación se desarrolla bajo condiciones operativas de mayor seguridad y efectividad.

Keywords:UUV; arquitectura de Control Distribuida; modularidad; escalabilidad; sistemas supervisores.

---

1. Introducción

Los sistemas de inspección de cables submarinos han ido evolucionando junto con el desarrollo de los sistemas robóticos submarinos. La tendencia operativa convencional, ha evolucionado a partir de la inspección visual de los cables submarinos por parte de buzos especializados, siendo una operativa peligrosa, ya que se encuentran expuestos a los peligros propios de las altas profundidades, hasta la utilización de vehículos submarinos para la supervisión de los cables por parte de un operador humano, de manera que el vehículo submarino desarrolla tareas básicamente de localización y de posicionamiento, con el fin de mejorar la inspección de los cables submarinos a través de los sistemas de visión submarina (estéreo-visión).

Tareas complejas, desarrolladas por este tipo de vehículos, implican el diseño y desarrollo de arquitecturas modulares avanzadas. La arquitectura de control modular y escalable, facilita el diseño de estos equipos ad-hoc, permitiendo la compatibilidad e inserción fiable de diferentes sub-sistemas dentro del conjunto del vehículo (diferentes grupos de adquisición de datos, etc.).

La arquitectura propuesta en el artículo parte del concepto convencional de arquitectura híbrida, formada por un hardware modular que permite un modelo de programación software basado en el comportamiento *"behavior-based hybrid architecture"*. Dividiendo el comportamiento del sistema en dos grandes grupos:

El comportamiento reactivo, en el que el sistema deberá reaccionar de una forma automática ante un determinado evento, caso de los sistemas delimitación de obstáculos que deberán modificar la trayectoria del sistema de tal forma que se reduzca la posibilidad de un impacto.

Así mismo el comportamiento deliberativo, en el que el sistema evalúa diferentes posibilidades determinando la más conveniente en cada situación, por ejemplo, la generación de trayectoria entre dos puntos dependiendo de los consumos, etc.

La plataforma utilizada es la plataforma multi-agente cooperativos [8][4][5] la cual está compuesta por un conjunto de agentes que aportan los conceptos de modularidad y escalabilidad necesarios para este tipo de aplicaciones. La modularidad del sistema permite un aumento en la capacidad de intercambiabilidad y conectividad entre los módulos, ausente de incompatibilidades y riesgos de comprensión entre los mismos, se corresponde a los módulos de verificación formal. Mientras que la escalabilidad del sistema permite la reducción entre potenciales errores, propiciados por el cambio de nivel o entorno entre capas.

Estos agentes aportan características tales como, autonomía, reactividad, sociabilidad/cooperación, e iniciativa. Adquiriendo el sistema, características de modularidad, simplicidad, reduciendo la complejidad al trabajar con módulos y sub-módulos para una determinada aplicación. Además, los sistemas distribuidos permiten la aparición del paralelismo ya que facilitan la distribución de tareas, comportamiento fiable ante fallos y flexibilidad, así como, se puede habilitar/deshabilitar de forma dinámica. En este tipo de sistemas se viene trabajando especialmente durante las dos últimas décadas, aumentando la complejidad de los mismos a medida que aumenta su autonomía.

2. Arquitectura Propuesta

El objetivo de la arquitectura propuesta es la inspección de cables submarinos mediante la utilización de sistemas autónomos no tripulados en entornos no estructurados, partiendo del desconocimiento de la posición del cable submarino en el lecho marino. Para ello, el sistema debe de realizar el seguimiento del cable on-line, y evaluar los datos obtenidos mediante los medios de captación para su posterior análisis en busca de los defectos en el cable. Es importante resaltar que la estructura interna de los cables submarinos incorpora en su interior cables de acero, evitando de esta manera cambios bruscos en la dirección de alojo del cable en el lecho marino.

Actualmente, la Universidad de Cantabria dispone de varios vehículos marinos que componen el parque de vehículos del "Laboratorio de Experiencias Marinas de Cantabria" ubicado en la E.T.S. de Náutica de Santander. Para el desarrollo de esta aplicación se ha seleccionado el vehículo submarino C'Inspector de Kongsberg.Este vehiculo está equipado con dos sistemas sonar independientes. Uno el sonar de navegación, cuya función es la obtención de una imagen sonar frontal del entorno utilizada para

la detección de objetos frontales a diferentes distancias y de un conjunto side-scan sonar, encargado de proporcionar las imágenes a ambos lados del vehículo del lecho marino para su posterior estudio.

El estudio de las imágenes proporcionadas por los sonares se realiza de forma independiente mediante la utilización de técnicas de visión artificial. A través del estudio de la imagen frontal del entorno se podrá detectar los objetos con anterioridad, tanto dinámicos como estáticos, proporcionando una trayectoria al sistema fiable y segura. Mientras que el estudio de la imagen proveniente de los sonares laterales proporcionará la detección de diferentes objetos en el lecho marino, en dicho estudio se debe de tener en cuenta el estudio de las sombras acústica ya que nos proporcionará características propias de los objetos.

Los sonares de barrido lateral se encuentran adosados a la zona central del vehículo C'Inspector proporcionando información de los objetos dentro de la zona de detección determinada por el ángulo de detección del sonar. Esta zona de detección depende directamente de la profundidad, existiendo unos límites, tanto superior como inferior, para la detección segura del cable submarino.

Después de analizar y detectar el cable mediante las imágenes del sonar de barrido lateral se obtendrán los nuevos puntos de posición corroborando el correcto path determinado por el bloque de navegación 'feedback'. Por tanto, el vehículo navega a partir del desarrollo teórico de una trayectoria obtenida por el ajuste de los puntos suministrados por el sonar mediante una función. Es importante destacar la existencia de una íntima relación entre la generación de la trayectoria y los cambios bruscos de velocidad del equipo, ya que la generación de estos nuevos puntos es totalmente dependiente de la velocidad del equipo y por tanto, de la posición obtenida en cada iteración.

El análisis de estos cambios de velocidad proporcionará la aceptación o negación de los nuevos puntos por parte de los sistemas de supervisión de navegación del sistema.

En la figura 1 se puede observar los diferentes módulos, de la arquitectura propuesta, enmarcados dentro de cada capa y sus agentes correspondientes. Existen diferentes clases de agentes encargados de diferentes tareas, un grupo de ellos están encargados de la adquisición de los datos del entorno y del posicionamiento del vehículo en su entorno, otros del comportamiento del mismo ante distintas situaciones, y por último, el grupo que aporta cohesión a los diferentes módulos, los agentes supervisores, cuya funcionalidad es cohesionar todos los grupos, planificando y controlando los diferentes bloques, los agentes verificadores, encargados de comprobar la fiabilidad de los bloques y los datos reduciendo los retrasos derivados de los diferentes lenguajes formales de las capas en las que se ha dividido el sistema.

Para el correcto funcionamiento del sistema se ha incluido un bloque de control de los agentes, el cual habilita/deshabilita los mismos dependiendo del comportamiento global del sistema. Esto es, modifica el comportamiento del bloque supervisor [6] con el fin de evitar comportamientos indeseados. Un claro ejemplo es la deshabilitación del bloque de navegación cuando el vehículo se encuentra dentro del bloque de delimitación de obstáculos.

Si descendemos un poco más en el desarrollo del sistema se encuentran los diferentes bloques, y sub-bloques en los cuáles se ha dividido el sistema. Como se ha comentado anteriormente, la arquitectura propuesta está dispuesta en capas, por tanto, se deben de ubicar estos módulos en su capa correspondiente.

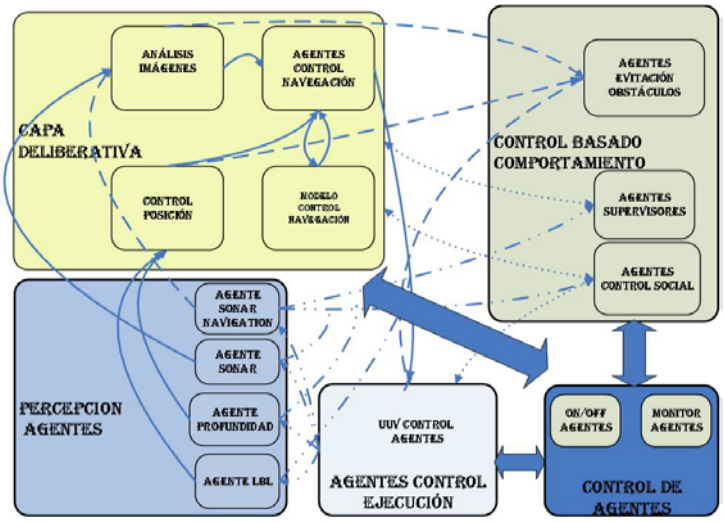


Figura 1. Arquitectura Multi-agente propuesta.

Dentro de la capa deliberativa se dispone de los módulos de navegación, de pérdida del cable, y dentro de la capa reactiva, encontraremos los módulos de delimitación (evitación) de obstáculos y de seguimiento de la trayectoria entre cada punto determinado por el módulo de navegación.

El Módulo de Adquisición y Procesamiento de las Imágenes sonar es común a ambas capas, ya que los datos obtenidos por el sonar de barrido lateral usadas por la capa deliberativa, mientras que el sistema de delimitación de obstáculos se nutre de los datos propios del sonar de navegación.

Se incorporan por tanto, sistemas de verificación formales que permiten el desarrollo de las diferentes actividades junto con sus restricciones temporales, y se establecen supervisores zonales para evitar la aparición de datos incorrectos, tales como datos obtenidos fuera de tiempo con lo que el sistema se ve abocado al colapso. Para evitar algunos de estos problemas se están desarrollando sistemas software redundantes con el fin de obtener siempre datos fiables aunque no sean los óptimos para cada uno de los algoritmos evitando así paradas inesperadas de los módulos debidos a la carencia de datos.

El sistema se compone de cinco módulos principales. Las restricciones temporales de los módulos son diferentes, mientras que unos trabajan en tiempo real como es el Módulo de ejecución, otros sistemas se encuentran latentes esperando su habilitación a partir de un evento determinado, caso de este último tipo son los Módulos de Delimitación de obstáculos y el Módulo de Pérdida del Cable.

A continuación se explica de forma somera cada uno de los módulos del sistema. Cada módulo a su vez se encuentra dividido en sub-módulos, mostrándose así el flujo de datos dentro de cada uno.

2.1 Módulo de Navegación

Es el encargado de generar una trayectoria fiable y segura para el vehículo. En el módulo de adquisición y procesado de las imágenes del sonar de barrido lateral se obtiene la posición del cable y se traslada su posición al eje de coordenadas mundo. El sistema genera una trayectoria a partir de los puntos obtenidos en las etapas anteriores, para ello, se aproximan los datos obtenidos a una función, dicha función es totalmente dependiente de la velocidad del vehículo. Cabe destacar, que el sistema de decisión no sigue la trayectoria definida cuando existe una variación grande de velocidad, ya que estas funciones son totalmente dependientes de la velocidad. A partir de la función se obtiene la zona de

detección de los objetos de forma segura, siendo esta zona los límites de la trayectoria suavizada del vehículo submarino (ecuación 1)

$$P(t)=\sum_{i=1}^{n} P_i N_{i,j}(t) \quad , \quad N_{i,j}=\left\{\begin{array}{c} 1 \text{ si } x_i \le t \le x_{i+1} \\ 0 \text{ en el resto de casos} \end{array}\right\} \quad , \quad N_{i,j}=\frac{(t-x_i)N_{i,j-1}(t)}{x_{i+j-1}}+\frac{(x_{i+j-t})N_{i+1,j-1}(t)}{x_{i+j}-x_{j+1}} \qquad (1)$$

Siendo Pi los vértices.

A partir de esta área, se puede obtener un volumen de funcionamiento del sistema seguro (figura 3), únicamente solapando las diferentes capas limitadas por la profundidad y una precisa caracterización de los objetos del lecho marino.

2.2 Módulo de Adquisición y Procesado imágenes sonar

Sirve de alimentadores de los bloques de navegación y de delimitación de obstáculos. Mediante el estudio de las imágenes propias del sonar de barrido lateral se determina la posición del cable en el lecho marino. Con el estudio de las imágenes provenientes del sonar de navegación se determina la posición de los objetos estáticos, tales como rocas, y se estudia la trayectoria de los objetos dinámicos, para ello, una vez detectados se estudia de forma pormenorizada una determinada zona de la imagen, aquella que es de interés para los diferentes módulos. Si un objeto dinámico es detectado, se estudia su trayectoria aproximando sus puntos a una determinada función, una vez obtenida dicha curva se evalúa buscando su posición en un horizonte conocido, con el fin de obtener un posible impacto, determinando el tiempo de evitación del mismo.

2.3 Módulo de Delimitación de obstáculos

Módulo de decisión basado en reglas ECA (*"event-condition-action"*) [1] donde se define una trayectoria fiable ante un potencial impacto del vehículo, determinado por la trayectoria proporcionada por el Módulo de Navegación y cualquier objeto que se encuentre en la zona frontal del vehículo. En el instante en el que se detecte la posición de un objeto, debido a que el método de detección es estático no se determina si el tipo de objeto es estático o dinámico, el sistema debe de determinar el tipo de objeto y por tanto, las acciones a determinar. Si el sistema es estático su localización quedará determina desde el primer instante, y únicamente se deberá determinar si existe colisión o no según la trayectoria del vehículo. En el caso que sea un objeto dinámico, las posiciones relativas entre imágenes han cambiado, se debe detectar su trayectoria y determinar un punto de corte con la del vehículo en un horizonte cercano. Una vez determinado se modifica la trayectoria del vehículo, enviando estas nuevas posiciones al Módulo de Ejecución.

2.4 Módulo de Pérdida Cable

Una vez se ha producido una pérdida del cable en un instante, el sistema carga de nuevo la última posición conocida estableciendo una trayectoria segura a este nuevo punto, una vez alcanzada la misma el algoritmo de búsqueda establece un conjunto de trayectoria de forma cónica, partiendo desde el punto último conocido hacia la zona teórica determinada por el módulo de navegación. Una vez determinado el cable de nuevo, el sistema borra el conjunto de puntos correspondientes a la anterior trayectoria y

comienza de nuevo el ciclo. En caso de no encontrar el cable el vehículo submarino asciende y trasmite la última posición conocida a la estación de control.

2.5 Módulo de Ejecución

Este módulo está compuesto por otros dos sub-módulos. Un sub-módulo encargado de toma de decisiones. Permite la modificación del comportamiento del equipo a partir de la detección de un evento. A partir del mismo se determina la acción a realizar en cada instante. Si se produce una identificación de un obstáculo por parte del Módulo de Delimitación de obstáculos, el comportamiento del equipo varia, se desestiman los puntos obtenidos desde el Módulo de Navegación y la trayectoria viene determinada por el conjunto de puntos obtenidos de dicho bloque hasta que se haya superado el objeto, en este instante, de nuevo toma el control el Módulo de Navegación. Todos los puntos que conforman las trayectorias, tanto los obtenidos desde el Módulo de Navegación, como, desde el Módulo de Delimitación de obstáculos, se transfieren al sub-módulo de seguimiento. El otro sub-módulo es el correspondiente al algoritmo de seguimiento de ruta, el LOS modificado [8], cuya función es la reducción del error trasversal de camino entre cada uno de los puntos obtenidos en los Módulos de Navegación y el Módulo de Delimitación de obstáculos.

3. Resultados de Simulación

Para la simulación correspondiente a este apartado del artículo se ha utilizado la plataforma de desarrollo de Matlab/Simulink, siendo necesarias diferentes toolbox para el desarrollo de las mismas. Mediante la toolbox Statecharts se ha construido la máquina de estados finita para la ejecución del módulo de navegación y su posterior simulación.

Para la simulación los Módulos de Navegación y de Ejecución se ha utilizado el modelo hidrodinámico [2] del vehículo C'Inspector desarrollado a partir del trabajo de Velasco [8].

En base al comportamiento discreto del Módulo de Adquisición y Procesado de la Imagen del Sonar de Barrido Lateral, se genera una función continua correspondiente a la trayectoria teórica del cable calculada a partir de los diferentes puntos obtenidos previamente. Esta imagen se utilizará para transferir al vehículo submarino como ruta a seguir.

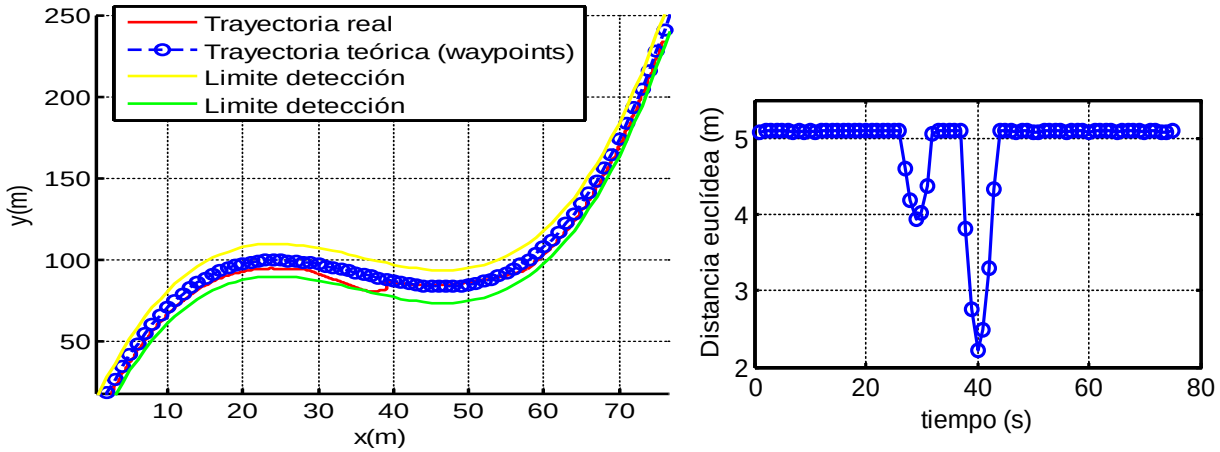
Uno de los requerimientos del sistema, es la aportación de los dos primeros puntos, en este instante, la trayectoria se ajusta a una recta (punto de mayor error), como se puede comprobar en la figura la dinámica del submarino provoca una salida temporal de la zona de detección, una potencial solución a este problema sería situar al vehículo con un primer rumbo predeterminado. Una vez obtenidos los primeros puntos, se puede determinar una trayectoria con un nivel de error más reducido como se puede apreciar en la figura 2.

A partir de la obtención de la trayectoria teórica, se pasa a construir el área de detección fiable, cuyo rango como se ha indicado en el anterior bloque, se determina a partir de la distancia entre el cable y el submarino. Cualquier posición del robot dentro del área permitirá al vehículo captar el cable.

En la figura 2 se observa, una vez establecida la trayectoria teórica desde el Módulo de Navegación (color azul), se establece el área de detección a ambos lados de la trayectoria teórica correspondiente a una determina profundidad (área comprendida entre las curvas amarilla y verde), mientras que el Módulo

de Navegación mantiene la trayectoria del vehículo siempre en dicha área, por lo tanto, bajo estas condiciones permanece en el área de detección.

Para cuantificar la desviación entre la trayectoria teórica y la trayectoria que sigue el vehículo realmente, en la figura 2, se muestra el cálculo correspondiente a la distancia euclídea, entre la trayectoria teórica y la trayectoria del vehículo. Para ello, se calcula la distancia euclídea entre la posición del vehículo (coordenadas x, y) y los way point's que forma parte de la trayectoria teórica (figura 2, círculos en azul), en el instante que el sistema de seguimiento (LOS modificado), previamente indicado, conmuta desde un waypoint al siguiente. Se observar que la distancia euclídea se mantiene reduciendo su valor en los cortes entre la trayectoria real del vehículo y la trayectoria teórica. También se observa que el vehículo se mueve dentro de los límites de detección (línea amarilla y verde) como se había establecido a priori.



(a) (b)

Figura 2. Área de Detección y trayectoria simulada (a), distancia euclídea entre cada uno de los waypoints de la trayectoria teórica y la trayectoria que sigue el vehículo C'Inspector (b).

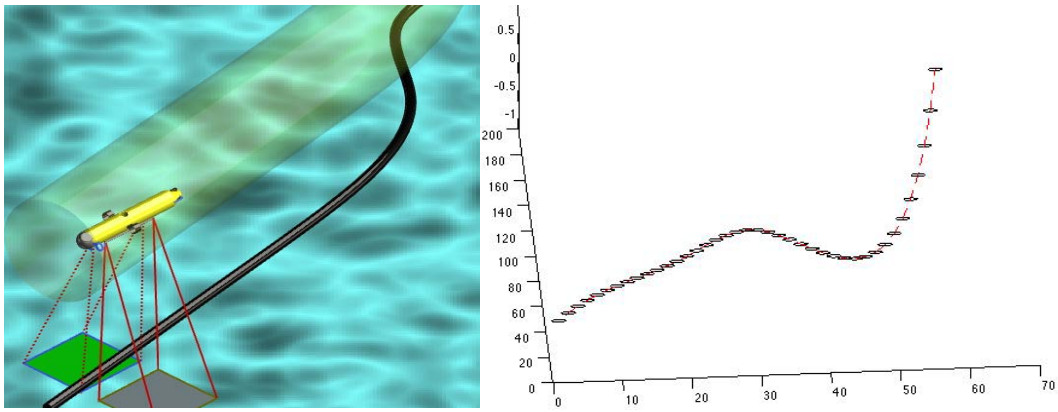


Figura 3. Volumen de detección y trayectoria

Una vez determinado el área de detección fiable, para una determina profundidad, se podrá definir el volumen de detección fiable si se superponen todas las posibles capas obtenidas desde la posición inferior, punto donde no se pueden perfilar correctamente los límites del objeto, y la posición superior, siendo ésta el lugar donde no se puede detectar el cable o el estudio de las sombras no es concluyente.

Por tanto, la trayectoria del vehículo se deberá de encontrar en el interior de este volumen para que la detección sea fiable. Como se puede comprobar en la figura 3, la trayectoria anteriormente indicada

se encuentra inmersa dentro de esta zona, de este modo se detecta el cable en todos los puntos de la misma.

4. Conclusiones

En el presente artículo se ha propuesto una arquitectura basada en un sistema multiagente. Esta arquitectura, permite dar respuesta a las restricciones actuales, afectando, tanto al tiempo, como al seguimiento en la inspección de cables submarinos mediante la utilización de sistemas autónomos no tripulados.

Mediante la arquitectura propuesta, sumándole la metodología basada en la generación de un espacio virtual tubular, perseguimos, la reducción del tiempo de identificación y del seguimiento del objeto, además de conferir una operativa más fiable y segura.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el MINECO (DPI2011-27990) con fondos FEDER y por el ministerio de defensa, programa COINCIDENTE-1003211003100.

Referencias

1. Almeida, E., Luntz J. & Tilbury, D. Modular finite state machines implemented as event-condition-action systems. Proceedings of the 16th IFAC World Congress, 2005, Volume 16, pp. 345-345.
2. Fossen, T.I. Marine control Systems: Guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles. Marine Cybernetics AS. Trodheim, Norway, 2002.
3. Fossen, T. I., Guidance and control of ocean vehicles. New York, USA: John Wiley and Sons Ltd, 1994.
4. Panait, Liviu; Luke, Sean, "Cooperative Multi-Agent Learning: The State of the Art", Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2005.
5. Russell, Stuart J. & Norvig, Peter, Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd ed.), Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2003.
6. Ramadge P.J. Wonham W.M., Supervisory Control of a Class of Discrete event processes, in Analysis and Optimization of Systems, ser. Lecture Notes in Control and Information Sciences, A. Bensoussan and J. Lions, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 1987, Volume 63, pp. 475–498.
7. Velasco F., Lastra F., Revestido E, Riola J. & Díaz J. Navegación de Vehículos Submarinos no Tripulados en Entornos no Estructurados. DESEi+D, 2013
8. Velasco Francisco J. , Elías Revestido Herrero, Francisco J. Lastra Santos, José María Riola Rodríguez, Juan Jesús Díaz Hernández and Luis M. Vega Antolín, Measurements of Hydrodynamic Parameters and control of an underwater, IFAC Workshop onNavigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles, 2015, Volume 48, pp. 167–172.
9. Wooldridge, M., An Introduction to MultiAgent Systems, John Wiley & Sons, 2002.

Sistema de guiado, navegación y control para aterrizaje asistido en buque de RPA de ala rotatoria sin GPS

García Rivero, Manuel [1,*], Alarcón Romero, Francisco [1], Viguria Jiménez, Antidio [1], Ollero Baturone, Aníbal [2]

[1] Fundación Andaluza para el Desarrollo Aeroespacial – Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales. La Rinconada (Sevilla, España). Emails: {mgarcia@catec.aero (MGR), falarcon@catec.aero (FAR), aviguria@catec.aero (AVJ)}

[2] Universidad de Sevilla – Grupo de Robótica, Visión y Control (Sevilla, España). Email: aollero@us.es (AOB)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: mgarcia@catec.aero (MGR);

Abstract: El objetivo de este artículo es mostrar los resultados obtenidos tras el desarrollo de un sistema de guiado, navegación y control para aterrizaje en buque de un RPA de ala rotatoria en escenarios sin cobertura GPS. El sistema se basa en un cable que une el helicóptero con el buque para guiar a la aeronave en la última fase del aterrizaje. Se han implementado algoritmos de navegación absoluta y relativa que hacen uso de la información de los sensores embarcados IMU (Inertial Measurement Unit), magnetómetro, y altímetro junto con la información relativa a la tensión y los ángulos del cable para calcular la posición y velocidad relativa del RPA respecto al buque y también su actitud. Se mostrarán los resultados de los experimentos realizados para validar la técnica con un entorno de trabajo diseñado por FADA-CATEC.

Keywords: RPA, denegación GPS, posicionamiento relativo, aterrizaje autónomo, fusión sensorial, sistema de control, helicóptero no tripulado, buque.

---

1 Introducción

El uso de aeronaves de ala rotatoria pilotadas de forma remota (de aquí en adelante RPA) ha crecido durante los últimos años para un gran número de aplicaciones. En comparación con las aeronaves de ala fija, las aeronaves de ala rotatoria tienen la ventaja de volar a punto fijo, más comúnmente conocido como condición de "hovering", lo cual es muy útil para monitorizar regiones de interés; y además presentan una mayor maniobrabilidad al tener capacidad de despegue y aterrizaje vertical

(VTOL). Estas aeronaves autónomas, que son fáciles de transportar y de desplegar, permiten integrar cámaras u otros equipos de vigilancia y reconocimiento, o incluso transportar y desplegar cargas [1].

El aterrizaje autónomo es la fase del vuelo más exigente desde el punto de vista operativo ya que se debe realizar en una región limitada de espacio y tiempo, estando muy cerca del suelo, y se requiere una alta precisión para evitar colisiones. Muchos trabajos se han publicado en los últimos años acerca de aterrizaje autónomo de UAV [2], principalmente usando sensores visuales fusionados con otros sensores [3] [4]. Sin embargo, el aterrizaje y despegue autónomo desde una plataforma móvil y bajo condiciones meteorológicas adversas supone a día de hoy un problema abierto que carece de solución técnica fiable. Otro problema importante que también está abierto es la dependencia del GPS para la navegación de no solo RPA, sino también de todo tipo de UAVs.

Este artículo presenta un sistema de aterrizaje asistido para helicópteros no tripulados mediante la unión del RPA al buque con un cable y un hardware y software desarrollado a tal efecto. El sistema ha sido diseñado para aterrizar un RPA en una plataforma en movimiento, y particularmente para una cubierta de un barco. Este sistema está inspirado en el RAST (Recovery Assisst, Secure and Transverse), sistema usado por helicópteros tripulados para mejorar la estabilidad de la aeronave durante el aterrizaje mediante la aplicación de tensión al cable [5]. Un sistema similar fue presentado en [6], aunque solo fue probado en simulación.

En el sistema propuesto, el RPA despliega un cable para asistir en el aterrizaje, mientras realiza un "hovering" sobre el punto de aterrizaje. Este cable se ancla a un dispositivo a bordo de la plataforma que permite enrollarlo para recogerlo. La aplicación de tensión al cable durante la operación es esencial. La principal ventaja de esta aproximación es que la tensión en el cable aporta robustez ante perturbaciones externas como el viento, ya que la proyección del vector tensión en el plano horizontal siempre estará opuesto a la resultante de la fuerza de perturbación [7].

Además, este artículo presenta una técnica de navegación para estimación precisa de posición y velocidad relativa del RPA respecto del punto de anclaje del cable en la plataforma móvil. Esta medida depende solo de la orientación del cable, la altura relativa del RPA a la plataforma y las aceleraciones y velocidades angulares del RPA medidas en la IMU (Inertial Measurement Unit) a bordo de la aeronave. Este posicionamiento relativo del RPA respecto de la plataforma en movimiento es completamente independiente del GPS, y representa un sistema de posicionamiento alternativo, barato y fiable para RPAs asistidos con cables.

Este artículo se organiza tal y como sigue: en primer lugar una sección donde se explican los métodos implementados de guiado, navegación y control, así como una descripción de los equipos integrados en el RPA. A continuación se mostrarán los resultados experimentales obtenidos, mediante dos estrategias de control diferentes. Finalmente se mostrarán unas conclusiones en base a los resultados obtenidos.

2 Materiales y métodos: sección experimental

2.1 Sistema de guiado, navegación y control

La aproximación clásica de GNC se basa en fusión de datos GPS/INS. Esta aproximación es normalmente usada en misiones que no requieren alta precisión como por ejemplo una ruta de waypoints; en cambio, para el aterrizaje con condiciones meteorológicas adversas en una plataforma

móvil se requiere una alta precisión. El objetivo es validar la navegación relativa entre el RPA y la plataforma mediante el uso del cable, y caracterizar su nivel de precisión.

El sistema GNC puede organizarse mediante bloques funcionales. Un bloque de navegación implementa la estimación tanto absoluta como relativa de los estados del RPA mediante un algoritmo de fusión sensorial. Un bloque de guiado que integra la máquina de estado con la lógica de referencias dependiendo de la fase de vuelo y que implementa el cambio entre navegación absoluta y relativa. Por último, un bloque de control donde se implementan las leyes de control y se generan las señales para los actuadores. La Figura 1 muestra un esquema general de esta arquitectura GNC.

Los algoritmos GNC han sido desarrollados usando una herramienta de Diseño Basado en Modelos (MBD) con una generación automática de código C, lista para ser ejecutada en el PC embarcado [8]. Esta herramienta permite ejecutar el código generado en tiempo real y conectarse a él para hacer ciertas modificaciones sin tener que generar código de nuevo.

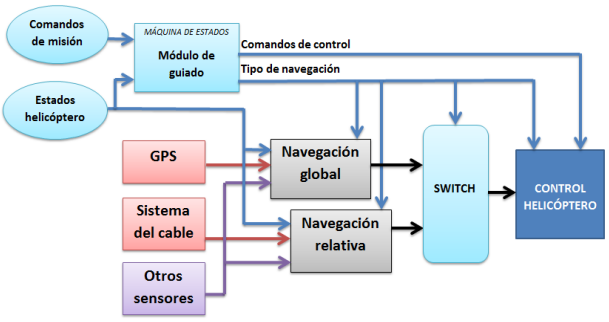


Figura 1: Arquitectura GNC

2.2 Descripción del sistema

Segmento aéreo: RPA

Los experimentos presentados aquí se han realizado con un helicóptero RC LOGO800, que ha sido convertido en un RPA. Su peso máximo al despegue es de 15 kg, con un diámetro del rotor principal de 1.9 m y con unas rpm nominales de 1400. La aeronave ha sido equipada con un autopiloto diseñado y fabricado en FADA-CATEC, con sensores GPS, IMU y magnetómetro. Además, para la configuración específica de estos experimentos, se han añadido:

- Altímetro láser ROKE MRII: sensor para proporcionar la altura relativa entre el RRPA y el suelo / plataforma.
- Una junta de Cardan: mostrada en la Figura 2, compuesta por dos juntas acopladas en dos ejes y dispuestas con encoders magnéticos en cada eje. Este dispositivo estima los ángulos entre el cable y el helicóptero, y además dispone de un sensor de carga para conocer la tensión aplicada en el cable. Se ha instalado también un sistema de seguridad de suelta del cable en caso de emergencia.
- Sistema GPS-RTK de precisión centimétrica. Estas medidas serán usadas como referencias de comparación con la posición relativa estimada mediante el cable. No serán usadas para el control de la aeronave.

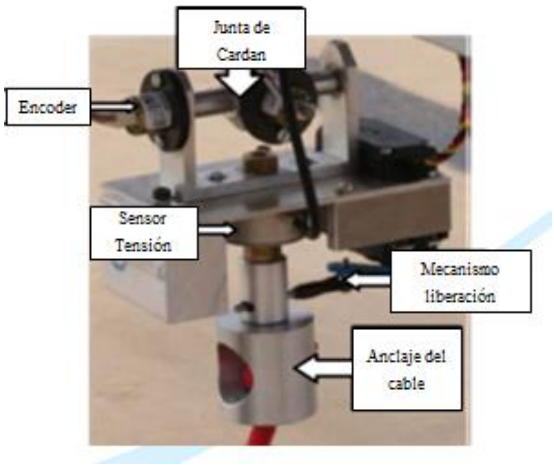


Figura 2: Junta de Cardan instalada

Segmento terrestre: Plataforma móvil

Para simular el comportamiento de la cubierta del buque, se ha diseñado y construido una plataforma elevadora que se puede controlar de forma remota, que contiene un dispositivo de recogida de cable. Esta plataforma contiene una estructura modular de barras, con unas planchas en su parte superior y una caja central que contiene todo los equipos relacionados con el control de recogida del cable (Figura 3). La plataforma superior está formada por tres planchas desmontables y reforzadas con barras de aluminio, con unas dimensiones de 3x3 m. La caja central localizada en la estructura base contiene el motor eléctrico que controla el rollo de cable y las guías para enrollar y desenrollar el cable. Un sistema de control PLC controla este motor, y el motor que se encarga de mover el husillo que provoca el movimiento horizontal de la plataforma elevadora. Esta controladora podía ser controlada desde la estación de control en tierra de forma remota, para recoger/soltar cable.

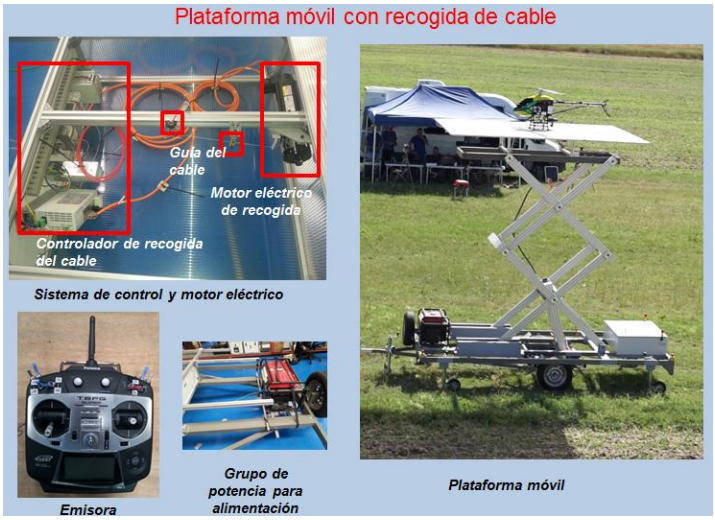


Figura 3: Esquema de la plataforma móvil

2.3 Arquitectura de posicionamiento relativo

El estimador de posicionamiento relativo entre el RPA y la plataforma móvil se basa en el sistema del cable (ángulos α, β y tensión T), la altura relativa del altímetro (h_{alt}), y las aceleraciones y velocidades angulares del INS (a^b, ω) y el campo magnético del magnetómetro (m^b). La Figura 4 muestra la arquitectura del algoritmo de estimación con tres bloques fundamentales:

- *AHRS*: del inglés Attitude and Heading Reference System, módulo que calcula la actitud del RRPA en base a las medidas de los giróscopos y acelerómetros, mediante un filtro de Kalman extendido (EKF).
- *Conversión*: módulo que calcula la posición relativa del helicóptero respecto al punto de sujeción del cable en base a los datos de la junta de cardan y del altímetro.
- *Fusión sensorial*: bloque que combina las medidas de actitud del AHRS, de la posición relativa procedente del módulo de *conversión* y las aceleraciones. El algoritmo consiste en un filtro de Kalman a 100 Hz, que implementa ecuaciones cinemáticas relativas. Sus salidas son las que alimentan al controlador ya que producen una solución muy precisa de la actitud y posición y velocidad relativa a la misma frecuencia con la que funciona el controlador.

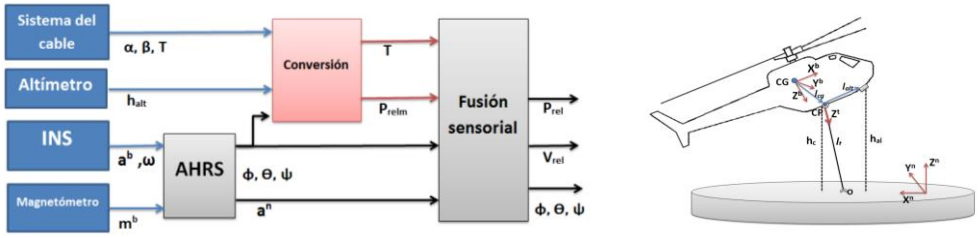
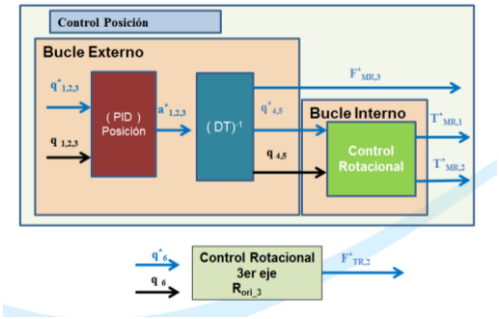


Figura 4: Posicionamiento relativo basado en el cable

2.4 Controlador

El controlador del RPA está basado en modelos cinemáticos y dinámicos inversos combinados con controladores PID [9]. Las constantes del controlador se ajustan mediante la técnica de asignación de polos. El controlador en posición está estructurado en dos bucles anidados: el interno y el externo.

El bucle externo calcula el error entre la posición deseada y la posición actual, el cual pasa por los PID de posición, uno para cada eje. Las salidas de estos controladores son las aceleraciones deseadas (a^*_{123}), que son transformadas en orientaciones deseadas del rotor principal (q^*_{45}) y fuerza de tracción requerida (F^*_{MR3}). Estas transformaciones se basan en la Segunda Ley de Newton [10]:



$$f_{MR,3} = m_H\sqrt{(a_x^*)^2 + \left(a_y^*\right)^2 + (a_z^* + g)^2} \quad (1)$$

$$\theta^* = arcsin\left(\frac{m_H a_x^*}{f_{MR,3}}\right) \quad (2)$$

$$\phi^* = arcsin\left(-\frac{m_H a_y^*}{f_{MR,3}cos(\phi^*)}\right) \quad (3)$$

Figura 5: Esquema del controlador de RRPA y ecuaciones utilizadas en el módulo DT^{-1}

El bucle interno acepta las salidas del bucle externo y calcula el error entre las orientaciones deseadas y la actitud actual. La orientación respecto al eje de guiñada del helicóptero se computa en un bucle separado, y calcula la fuerza necesaria a ejecutar en el rotor de cola. Los bucles internos calculan los momentos en el rotor principal a partir de las ecuaciones de cinemática y dinámica inversa. Además, se ha diseñado un conmutador entre controlador en coordenadas absolutas o GPS y coordenadas relativas o del cable, para hacer una transición suave cuando se cambie de navegación absoluta a relativa.

3 Resultados y Discusión

3.1 Estrategia de aterrizaje

Se han probado varios escenarios para realizar el aterrizaje, mostrándose aquí los resultados más representativos. La clave de la operación en todos los casos es mantener el cable tenso cuando se navega en coordenadas relativas, para que el cable represente fielmente la línea recta que une el helicóptero (cardan) con el origen de la plataforma móvil desde donde se recoge el cable. Si el cable no

estuviera tenso y estuviera curvado, los ángulos de la junta de cardan no representarían el vector director de la recta que une helicóptero y plataforma.

En la aproximación de control establecido el descenso se produce con el altímetro. En este caso, se aplica un valor de tensión en el cable suficiente para que esté tenso durante toda la operación y posteriormente se manda el descenso a velocidad vertical relativa controlada dando referencias en altura relativa respecto a la plataforma con el altímetro.

3.2 Resultados experimentales

Se llevaron a cabo varios experimentos con varios escenarios con la finalidad de probar la robustez del sistema. Se han realizado más de 25 aterrizajes sin GPS empleando únicamente el cable con distintas configuraciones: descendiendo mediante el aumento de tensión en el cable, bajando hacia la plataforma con el altímetro, a altas velocidades (hasta 40 km/h), aproximaciones, etc. Todos estos resultados confirman la fiabilidad del sistema. A continuación se muestran los resultados más significativos de los experimentos llevados a cabo.

La Figura 6 muestra los resultados de un aterrizaje del RPA hacia la plataforma móvil, descendiendo en dos fases mediante referencias de altura relativa. Se aprecia como desde el principio de la maniobra hasta que empieza el descenso, el RPA mantiene la altura relativa (gráfica izquierda) y realiza la misma trayectoria en altura que la plataforma móvil (gráfica derecha). Posteriormente, el descenso se produce en dos fases, del *t=2560s* al *t=2580s*, y desde *t=2580s* hasta *t=2600*, ambos realizados a una velocidad de descenso relativa controlada de 0.5 m/s.

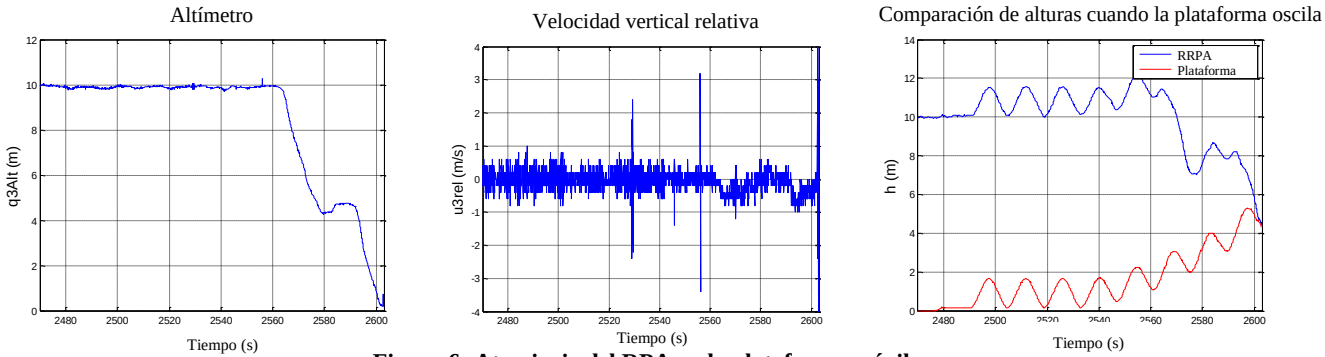


Figura 6: Aterrizaje del RPA en la plataforma móvil.

A continuación se muestra el seguimiento del RPA a la plataforma móvil usando la posición relativa proporcionada por el cable. Se aprecia como el RPA está siempre en menos de 1 m respecto al origen (punto de anclaje del cable). En *t=2540s* se produce una separación en q1, es decir que el RPA se retrasa respecto a la plataforma en la dirección de la pista, debido al arranque del movimiento del carro. Esta separación se compensa posteriormente por el controlador. En la figura derecha se representa la trayectoria seguida por la plataforma (rojo) y el RPA (azul), apreciándose como el RPA sigue de forma precisa el movimiento de la plataforma que hace una trayectoria curvilínea.

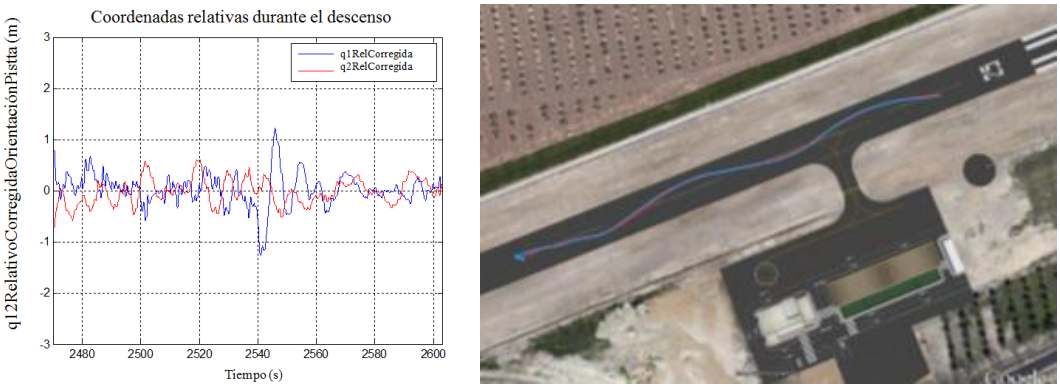


Figura 7: Seguimiento del RPA a la plataforma móvil usando coordenadas relativas estimadas mediante el cable.

Finalmente, se realizaron operaciones de despegue usando coordenadas relativas. A continuación se muestran los resultados de una operación completa de un aterrizaje, seguido de un despegue para posteriormente aterrizar de nuevo.

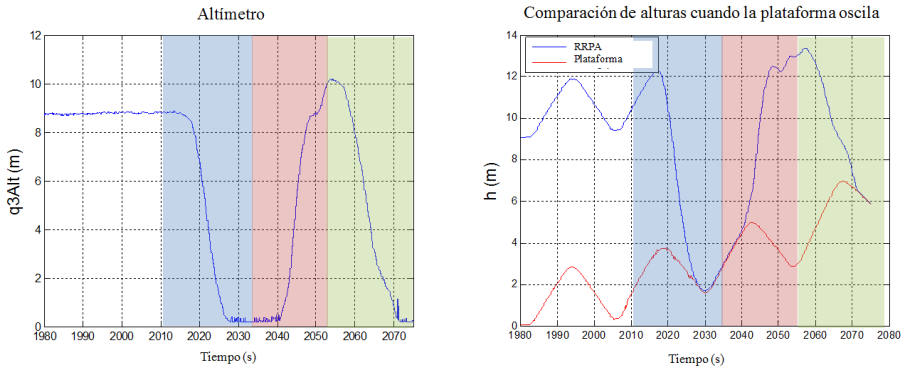


Figura 8: Operación completa de aterrizaje, despegue y aterrizaje de nuevo. Líneas azules representan trayectoria del helicóptero y líneas rojas de la plataforma.

3.3 Comparación de posición relativa basada en el cable con el RTK

En relación a la posición relativa del RPA respecto al punto de anclaje del cable, es decir, respecto a la plataforma; la cual se estima según apartado 2.3, se puede argumentar en base a las siguientes gráficas que la solución proporcionada tiene una alta precisión. La comparación de estos resultados con la posición relativa calculada con el GPS-RTK, cuyo sistema tiene una precisión centimétrica, muestra la validación experimental de este sistema para posicionamiento relativo.

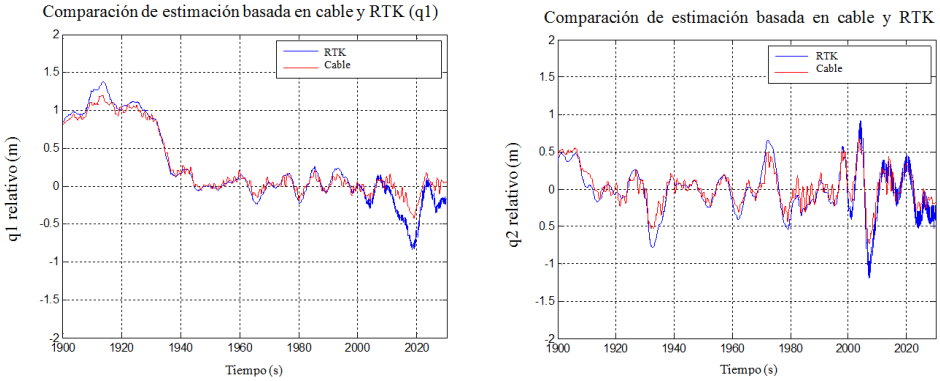


Figura 9: Comparación entre posicionamiento relativo basado en el cable y el obtenido por el GPS-RTK.

4 Conclusiones

Los resultados experimentales obtenidos validan las estrategias de guiado, navegación y control para la misión de aterrizar un RPA en una plataforma móvil. El uso de un cable para asistir el aterrizaje ha sido demostrado como un recurso preciso y fiable para este tipo de operación tan compleja. Los resultados de posicionamiento relativo basados en el cable se ajustan muy bien a los obtenidos con un sistema de precisión centimétrica como es el GPS-RTK, por lo que se valida además el cable como sistema de navegación y guiado para evitar la dependencia del GPS. Además, se ha comprobado que la técnica utilizada es también válida para la fase de despegue.

Agradecimientos

Desde estas líneas se agradece la colaboración y disposición del equipo técnico de CATEC para la integración del sistema completo: Juan Jesús García, Víctor Martín Mora, Antonio Jiménez y José Carlos Márquez, y del personal de ATLAS para los experimentos. También agradecer a Daniel Santamaría por su trabajo desarrollado en el proyecto y gran artífice de los resultados obtenidos.

Referencias

[1] M. Bernard, K. Kondak and A. Ollero, "Transportation and Deployment with Aerial Robots for Search and Rescue Missions"," *Journal of Field Robotics, Vol 28, Issue 6,* pp. 914-931, 2011.

[2] A. Gautam, P. B. Sujit and S. Saripalli, "A survey of Autonomous Landing Techniques for UAVs," in *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Orlando, 2014.

[3] S. Saripalli, J. Montgomery and G. Sukhatme, "Vision-based Autonomous Landing," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Washington DC, 2002.

[4] W. Kong, D. Zhou, D. Zhang and J. Zhang, "Vision-based Autonomous Landing System for Unmanned Aerial vehicle," in *IEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, Beijing, China, 2014.

[5] B. Theodore, "Method and apparatus for automated launch, retrieval, and servicing of a hovering aircraft". US Patent US 20140054415 A1, 2013.

[6] S. R. Oh, K. Pathak, S. Agrawal, H. Pot and M. Garrat, "Approaches for a Theter-Guided Landing of an Autonomous Helicopter," *IEE Transactions on Robotics*, vol. 22, no. 3, 2006.

[7] L. Sandino, D. Santamaría, M. Béjar, A. Viguria, K. Kondak and A. Ollero, "Tether-guided landing of unmanned helicopters without using GPS sensor," in *ICRA*, Hong Kong, 2014.

[8] D. Santamaría, F. Alarcón, A. Jiménez, A. Ollero and M. Béjar, *Model-based design, development and validation for UAS critical software*, ICUAS (International Coference on Unmanned Aircraft Systems), 2011.

[9] K. K. Tan, W. Qing-Guo and H. C. Chieh, Advances in PID Control, London: Springer-Verlag, 1999.

[10] L. Sandino, M. Béjar, K. Kondak and A. Ollero, "Improving hovering performance of tethered unmanned helicopters with nonlinear control strategies," in *ICUAS*, Atlanta, 2013.

SimEx: SIMulador de EXplosiones mediante sistemas SDOF

Sánchez Monreal, Juan * y Vera Coello, Marcos

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid, 28911, Leganés; jsmonrea@ing.uc3m.es (JSM); marcos.vera@uc3m.es (MVC).

* Autor responsable del trabajo; E-mail: jsmonrea@ing.uc3m.es

---

Abstract: La respuesta dinámica de una estructura sometida a cargas explosivas es un problema de gran interés en el ámbito de la Defensa y Seguridad. En este trabajo se presenta una plataforma computacional para el estudio de los efectos de una onda expansiva sobre elementos estructurales simples. Para ello se utilizan correlaciones semiempíricas para las explosiones de referencia (1 kg TNT esférica y hemiesférica) junto con las leyes de escala de las explosiones, y se reduce la respuesta estructural a la de un sistema de un grado de libertad. Estas simplificaciones ofrecen buenos resultados con un coste computacional bajo, lo que permite obtener diagramas de daño en función de la cantidad de explosivo y la distancia.

Keywords: Explosiones, SDOF, protección, onda expansiva

---

1. Introducción

La interacción de la onda expansiva generada por una explosión con los elementos estructurales circundantes es un fenómeno muy complejo cuyo estudio requiere el uso de sofisticados modelos fluidodinámicos para la propagación de la onda expansiva, acoplados con modelos estructurales para las deformaciones elasto-plásticas ocasionadas, cuya magnitud permite cuantificar el daño producido. El análisis basado en sistemas de un grado de libertad (*Single Degree Of Freedom*, SDOF) constituye un enfoque alternativo que permite estimar con más facilidad los efectos de la onda expansiva sobre elementos estructurales simples. Este método se basa en aproximar el elemento estructural bajo estudio por un sistema masa-muelle, que es el modelo matemático más sencillo que proporciona una respuesta estructural dependiente del tiempo. Esta aproximación requiere ciertas hipótesis, como simplificar el movimiento de la estructura, asumir una forma de aplicación de la carga y despreciar por completo la influencia del desplazamiento de la estructura sobre las cargas producidas por la onda de presión (*one-way coupling*).

El uso de este método está ampliamente desarrollado por el *United States Corps of Engineers* (USACE) en la norma UFC-3-340-02 [1]. Este documento recoge numerosas indicaciones para

el cálculo de las características de la onda expansiva, las propiedades equivalentes SDOF de diferentes elementos estructurales y varios métodos numéricos para la integración de los sistemas SDOF. Estos métodos se encuentran implementados en un programa basado en Microsoft Excel denominado Single-degree-of-freedom Blast Effects Design Spreadsheet (SBEDS) del *U.S. Army Corps on Engineers Protective Design Center* [2], desarrollado por *Baker Engineering and Risk Consultants, Inc*. (BakerRisk). Se trata de una herramienta muy útil para el diseño preliminar de estructuras resistentes a explosiones, así como para el análisis de estructuras ya existentes. Este programa es distribuido en abierto por el propio USACE bajo solicitud, pero resulta complicado conseguir una licencia desde fuera de los EE.UU. Debido a la restricción de uso de SBEDS, los autores han desarrollado un software alternativo, SimEx, basado en Matlab, para la resolución de sistemas SDOF. Este software se usa en la actualidad para tareas docentes y de investigación en el marco del Grado en Ingeniería de la Seguridad, impartido por la Universidad Carlos III de Madrid en el Centro Universitario de la Guardia Civil (CUGC) de Aranjuez, donde se forman los futuros oficiales de la Guardia Civil.

2. Sistemas de un Grado de Libertad

En muchas situaciones de interés práctico la respuesta de un elemento estructural se puede reducir a la de un sistema SDOF, basta para ello considerar el modo propio fundamental del sistema. Esta estrategia no siempre resulta sencilla, pues la obtención del modo fundamental puede entrañar ciertas dificultades, en cuyo caso la forma del mismo debe ser aproximada de algún modo [3]. Para determinar las propiedades equivalentes del sistema SDOF es necesario determinar el tipo de estructura (viga, pórtico, ...) y la forma de aplicación de la carga (típicamente carga uniforme). El comportamiento elástico del material se modeliza como elasto-plástico perfecto. Aunque se podrían usar modelos más complejos, no está justificado debido a las simplificaciones y la formulación del problema.

Las propiedades del sistema equivalente a determinar son la masa, la función de resistencia y la distribución de carga equivalentes. Para sistematizar los cálculos las propiedades equivalentes se obtienen a partir de factores que multiplican a las propiedades reales [3]. El factor de masa K_M se define como el ratio entre la masa equivalente M_e y la masa real M; el factor de carga K_L se define como el ratio entre la carga equivalente F_e y la carga real F; y el factor carga-masa K_{LM} se define como el ratio entre entre el factor de masa y el factor de carga:

$$K_M = \frac{M_e}{M}\ ; \quad K_L = \frac{F_e}{F}\ ; \quad K_{LM} = \frac{K_M}{K_L} = \frac{M_e}{M}\cdot\frac{F}{F_e} \tag{1}$$

La ecuación de la cantidad de movimiento del sistema equivalente adopta entonces la forma [3]

$$K_{LM}M\ddot{x} + Kx = F(t) \tag{2}$$

donde K es la rigidez aparente del sistema, obtenida a partir de la frecuencia natural de vibración del modo fundamental. Aunque todos estos factores son fáciles de obtener, en ocasiones incluso mediante expresiones analíticas, la mayoría de los casos se encuentran tabulados en la norma UFC-3-340-02 [1]. Para la integración de la ecuación (2) la norma UFC recomienda dos métodos: el método de la aceleración media (*average acceleration method*, AAM) y el método de la extrapolación aceleración-impulso (*acceleration-impulse extrapolation method*, AIEM), aunque también se puede usar cualquier otro.

2.1. Forma de la onda expansiva

Como término forzante $F(t)$ del sistema SDOF se utiliza la señal de presión de la onda expansiva multiplicada por el área efectiva del elemento estructural que sufre la carga dinámica. Para obtener las características de la onda expansiva (sobrepresión máxima, duración, impulso por unidad de área, etc.) de una manera rápida se pueden usar correlaciones semiempíricas [4,5]. Éstas se encuentran tabuladas en función de la distancia escalada, lo que permite su uso para distancia y cantidad de explosivo arbitrarias. Como explosivo de referencia se emplea comúnmente el TNT, aunque los resultados se pueden extrapolar a otros explosivos usando tablas de equivalencia (véase, por ejemplo, [6]). Para calcular la carga dinámica que ejerce la onda expansiva se debe tener en cuenta el ángulo de incidencia de la señal de presión, siendo normalmente el de incidencia normal el caso más desfavorable. La norma UFC-3-340-02 [1] contiene datos de magnitudes escaladas para explosiones esféricas y hemisféricas. Además provee de métodos para calcular las propiedades de la onda expansiva con diferente ángulo de incidencia. La forma temporal de la onda expansiva se aproxima con la ecuación de Friedlander [5,7] que captura también la fase de sobrepresión negativa. Para la interacción con sistemas SDOF también se puede usar la forma de pulso triangular equivalente sin cometer un error significativo [3].

3. SimEx

SimEx permite estudiar de un modo sencillo la respuesta a cargas explosivas de una variedad de elementos estructurales que se pueden reducir a un sistema SDOF. Todo ello bajo un entorno gráfico fácil e intuitivo para el usuario (véase Figura 1). SimEx se compone de tres módulos de cálculo, un módulo para el cálculo de las propiedades de la onda expansiva, un módulo para las propiedades mecánicas equivalentes y otro para la integración de sistemas SDOF sometidos a una onda expansiva. La

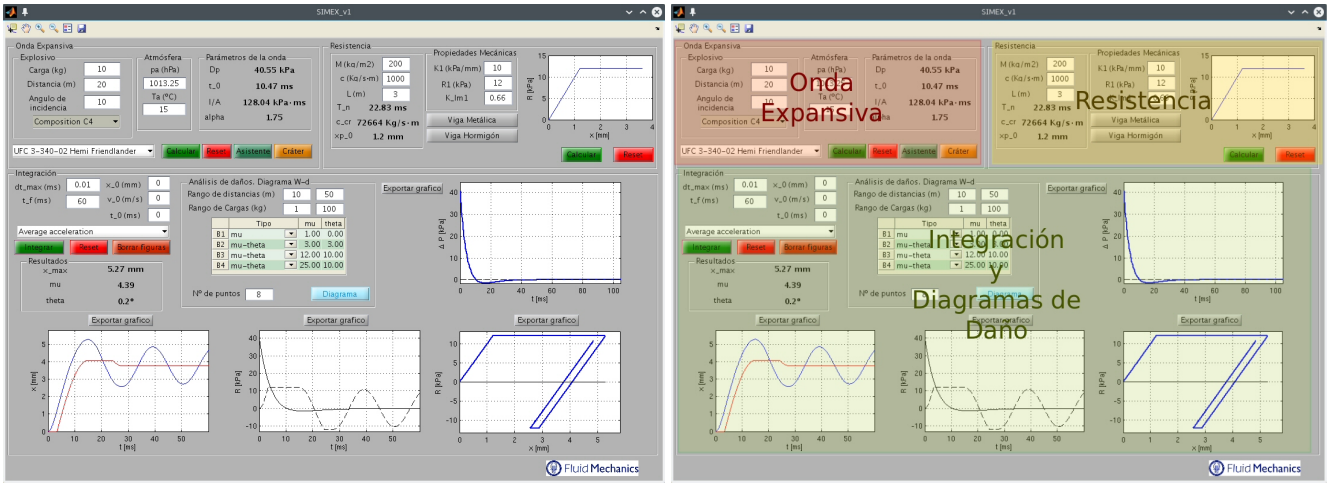


Figura 1. Apariencia de la interfaz principal de SimEx. La zona superior izquierda agrupa toda la información de la onda expansiva. La zona superior derecha concentra la información de los parámetros de resistencia equivalente de la estructura. La zona inferior muestra toda la información de la integración del sistema SDOF y del cálculo de diagramas de daño.

interfaz principal de SimEx se divide así en tres regiones correspondientes a cada uno de estos módulos, dispuestas manteniendo en el orden natural del flujo de trabajo en SimEx.

3.1. Onda Expansiva

El módulo de cálculo de ondas expansivas proporciona las características principales de la onda de presión en función de la cantidad y tipo de explosivo, la distancia a la carga y el ángulo de incidencia. Los cálculos se basan en la aplicación de las leyes de escala clásicas [5] a los datos de las explosiones de referencia de Kingery & Bulmash [4], también publicadas en la norma UFC-3-340-02 [1].

La apariencia del módulo se muestra en la Figura 2. Proporciona la sobrepresión máxima de la onda expansiva, el impulso por unidad de área, el tiempo de la fase de sobrepresión positiva y el parámetro de forma de onda [5,7]. Se puede escoger entre distintas correlaciones y entre explosiones esféricas y hemisféricas. El módulo también muestra un gráfico con la forma de onda en función del tiempo, que puede ser exportado o guardado en diversos formatos. El programa dispone de las formas de onda exponencial (Friedlander) y de la simplificación lineal. Se pueden introducir también las condiciones atmosféricas para obtener resultados más precisos. Una vez calculadas las magnitudes de la onda expansiva, estos datos quedan almacenados para ser usados por el módulo integrador como término forzante del oscilador SDOF equivalente.

Asistente para el estudio detallado de la onda expansiva SimEx dispone de un asistente específico para el estudio detallado de la onda expansiva. La apariencia de este asistente se muestra en la Figura 3. Este módulo proporciona toda la información de la onda expansiva que ofrece la norma UFC3-340-02 en función de la cantidad y tipo de explosivo, la distancia a la carga y el ángulo de incidencia deseados. Para el explosivo se debe indicar la cantidad (en kg) y el tipo. Las distancias necesarias son: la distancia en planta de la explosión al punto de cálculo, la elevación de la carga explosiva y la elevación del punto de cálculo (ambas medidas desde la misma cota de referencia). Se necesita también introducir el ángulo que forma la normal al elemento estructural en el punto de cálculo considerado con la proyección horizontal

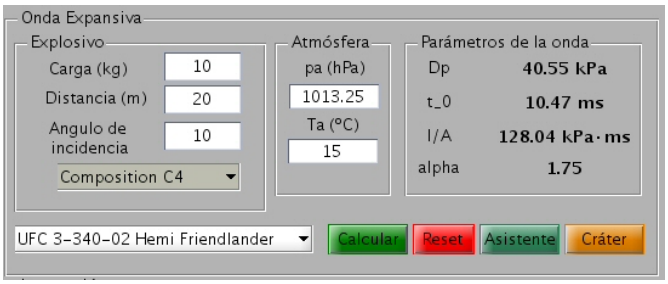


Figura 2. El módulo de cálculo de ondas expansivas permite evaluar las características más importantes de la onda expansiva a partir de la cantidad y tipo de explosivo, la distancia y el ángulo de incidencia. Como resultados muestra la sobrepresión máxima, la duración de la fase positiva, el impulso por unidad de área y el parámetro de forma de onda. En la parte inferior derecha se presentan los botones de acceso al asistente de ondas expansivas y el calculador de cráteres.

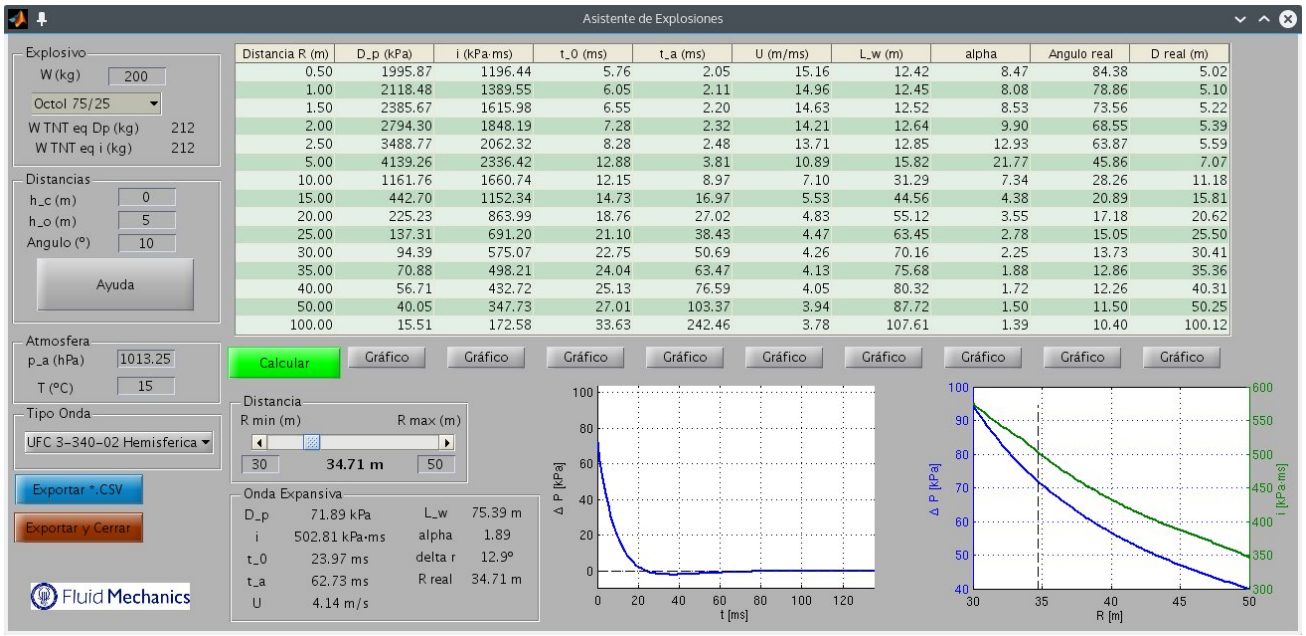


Figura 3. Apariencia de la interfaz del asistente de onda expansiva de SimEx. La parte izquierda presenta todos los datos de entrada organizados por: explosivo, distancias, atmósfera y tipo de onda. La zona derecha presenta los resultados. En la zona superior una tabla con las magnitudes calculadas para diferentes distancias y en la parte baja un detalle para una distancia especifica que se puede seleccionar con un control deslizante. Tanto la tabla como los gráficos son exportables.

de la línea que une el centro de la explosión con dicho punto. Se utilizan estas distancias y ángulos debido a que son más fáciles de obtener en medidas de campo. Con estos datos, SimEx calcula la distancia real y el ángulo de incidencia real.

El asistente proporciona: sobrepresión máxima, impulso por unidad de área, tiempo de fase positiva, tiempo de llegada del frente, velocidad del frente, longitud de fase positiva y parámetro de forma de onda. Los resultados se presentan en una tabla para varias distancias horizontales. Además también se reportan los datos de distancia y ángulo de incidencia reales. Las distancias de cálculo de esta tabla son modificables por el usuario. Los resultados son exportables como archivo `csv`. También se ha incluido un botón que presenta gráficamente la evolución de cualquiera de estas propiedades en función de la distancia horizontal.

Para una información más cualitativa se presentan dos gráficos exportables en la parte inferior. A la derecha se muestra la sobrepresión máxima y el impulso por unidad de área en función de la distancia horizontal. El rango de distancias es ajustable por el usuario. El gráfico de la izquierda representa el histórico de sobrepresión a una distancia horizontal dada. El usuario puede cambiar esta distancia de forma sencilla con un control deslizante. Para esta distancia se muestran también todas las características de la onda expansiva. Con el botón de *Exportar y Cerrar* se cierra el módulo y se exportan al módulo principal de SimEx la cantidad y tipo de explosivo, la distancia a la carga y el ángulo de incidencia reales para ser usados en la integración del sistema SDOF.

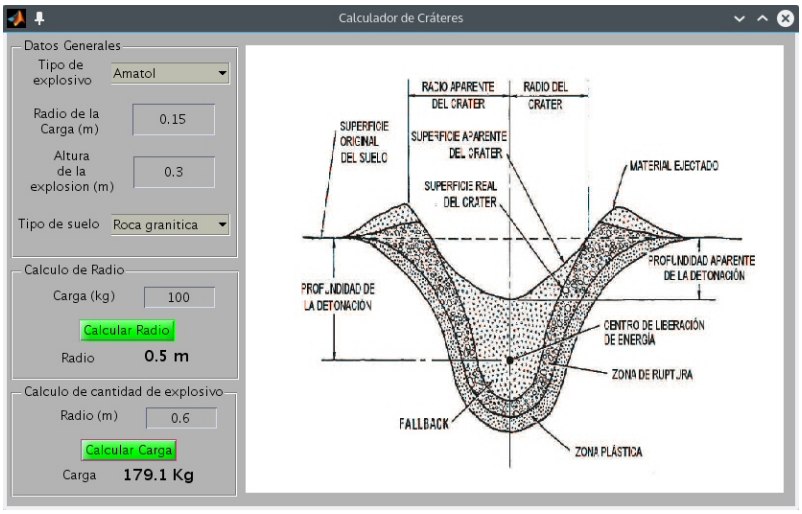


Figura 4. Apariencia de la interfaz del asistente de cráteres de SimEx. El módulo presenta dos modos de cálculo: tamaño de cráter a partir del explosivo y cantidad de explosivo a partir del tamaño de cráter medido. Se pueden indicar también los parámetros de radio de la carga y altura de la explosión para un resultado más detallado.

Asistente de cráteres SimEx dispone también de un menú para el cálculo directo e inverso de cráteres. Para ello se ha implementado el modelo matemático de Cooper [8]. Con este modelo se puede calcular el cráter generado por la detonación de una cierta cantidad de explosivo a una cierta altura sobre el suelo; también se puede calcular la cantidad de explosivo necesaria para producir un cráter de cierto tamaño. La apariencia de este menú se muestra en la Figura 4. Se puede seleccionar la cantidad y el tipo de explosivo. También es posible escoger el tipo de suelo.

3.2. Resistencia

En este módulo se deben introducir las propiedades mecánicas del sistema SDOF equivalente. Fundamentalmente se debe indicar la masa, la rigidez, la resistencia y el factor K_{LM}. Adicionalmente se incluye un coeficiente de amortiguamiento. También se indica la longitud fundamental del sistema, que se utilizará para determinar el ángulo de rotación máxima en los contornos. Como resultados se muestran los valores del periodo natural, el amortiguamiento crítico y la deflexión a la que empieza a aparecer deformación plástica en el sistema. Se incluye el acceso a asistentes de cálculo de las propiedades equivalentes para varios tipos de sistemas. Actualmente se incluyen vigas metálicas y vigas de hormigón armado. La apariencia del módulo de resistencia se muestra en la Figura 5.

3.3. Integrador

Una vez seleccionadas todas las características del sistema SDOF equivalente la resolución se reduce a la integración de la ecuación diferencial ordinaria (2). La apariencia del módulo de integración se muestra en la Figura 6. En este módulo se han implementado los dos métodos numéricos que recomienda la norma UFC-3-340-02 (AAM y AIEM) que se pueden seleccionar con un menú desplegable. También se incluyen cuadros de texto para fijar las condiciones iniciales (desplazamiento y velocidad inicial) y

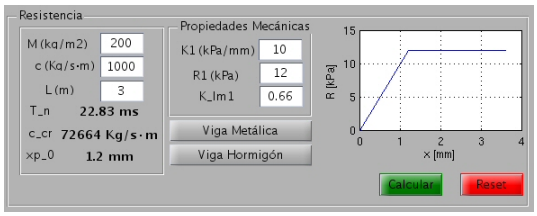


Figura 5. Apariencia del módulo de resistencia de SimEx. Se pueden fijar manualmente los parámetros de masa, rigidez y resistencia, o hacer uso de asistentes de cálculo para elementos estructurales predefinidos: vigas metálicas y vigas de hormigón.

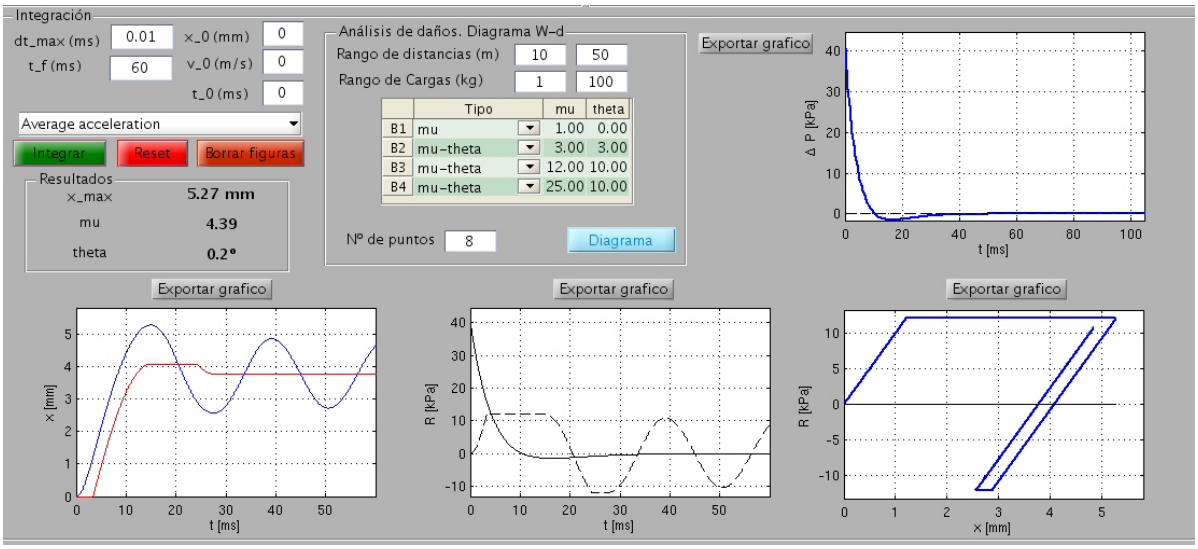


Figura 6. Apariencia del módulo de integración de SimEx. La parte superior izquierda agrupa los parámetros de la integración: paso temporal, tiempo final, condiciones iniciales y método. En la parte inferior se presentan tres gráficos de resultados: desplazamiento y desplazamiento permanente frente al tiempo (izquierda), fuerza de resistencia y sobrepresión frente al tiempo (centro) y resistencia frente a desplazamiento (derecha). El gráfico superior muestra un detalle de la onda expansiva. El cuadro central presenta los datos de los diagramas de daños: rangos de distancia y cargas, número de puntos y niveles de daño.

para el tiempo final de la integración. Dado que los métodos son de paso fijo, se debe indicar un paso temporal suficientemente corto para asegurar la correcta convergencia de la integración.

Tras realizar la integración aparecen tres gráficos de resultados en la parte inferior y un cuadro resumen de resultados. El gráfico de la izquierda muestra el desplazamiento instantáneo (azul) y el desplazamiento o deformación permanente (rojo). El gráfico central muestra la variación temporal de la señal de presión junto con la fuerza de resistencia del sistema SDOF (segundo término de la ecuación 2). A la derecha se muestra un gráfico resistencia-desplazamiento en el que se puede observar más claramente si aparecen desplazamientos permanentes (comportamiento histerético). Por último, el cuadro de resultados muestra el máximo desplazamiento obtenido y dos evaluadores de daño: μ es la relación entre el desplazamiento máximo y el desplazamiento a partir del cual comienzan los daños

permanentes, y θ representa el ángulo de rotación máxima en los apoyos cuyo su cálculo depende del tipo de estructura seleccionada. A partir de estos dos evaluadores cuantitativos se puede calificar cualitativamente el daño en la estructura de estudio [9].

3.4. Diagrama de daños

Evaluando diferentes pares de carga explosiva y distancia para un mismo elemento estructural se pueden representar diagramas de daño. SimEx dispone de una función para ello, situada en la parte central del módulo integrador. Se puede seleccionar el rango de cargas y distancias, el número de casos y los tipos de daño con los evaluadores μ y θ.

4. Conclusiones

La interacción entre una onda expansiva y una estructura es un problema complejo. Los sistemas SDOF y las correlaciones semiempíricas de explosiones de referencia son simplificaciones que ofrecen buenos resultados con un coste computacional bajo. Tanto los métodos de cálculo como los datos empleados se encuentran dispersos en la literatura, lo que dificulta su uso rápido. SimEx es un programa con interfaz gráfica de usuario que facilita estos cálculos. El programa se usa en la actualidad como material docente de la asignatura «Dinámica de explosiones» del grado de Ingeniería de la Seguridad del CUGC, así como para la realización de Trabajos Fin de Grado dentro de dicha titulación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al SEDEX su cortesía, disponibilidad, interés y sugerencias.

Referencias

1. Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-02, *Structures to resist the effects of accidental explosions*. U.S. Department of Defense, Washington D.C., USA, 2008.
2. Protective Design Center Technical Report PDC-TR, 05-01, *Single-degree-of-freedom blast effects design spreadsheets (SBEDS)*. U.S. Army Corps of Engineers, 2005.
3. Biggs, J. M. *Introduction to Structural Dynamics*. McGraw-Hill, USA, 1964.
4. Kingery, C. N.; Bulmash, G. *Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst*. U.S. Technical Report ARBRL-TR-02555, Ballistics Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, USA. April 1984.
5. Kinney, G.F.; Graham, K.J. *Explosive Shocks in Air, 2nd Ed.*. Springer-Verlag, New York, USA, 1985.
6. International Ammunition Technical Gudeline (IATG) 01.08 *Formulae for ammunition management*. UN Office for Disarmament Affairs 2013.
7. Baker, W. E. *Explosions in air*. University of Texas Press, 1973.
8. Cooper, P. W. *Explosives Enginering*. Wiley-VCH, USA 1996.
9. Protective Design Center Technical Report PDC-TR, 06-08, *Single degree of freedom structural response limits for antiterrorism design*. U.S. Army Corps of Engineers, 2008.

Del biomorfismo a las células Peltier: experiencias en la investigación arquitectónica extrapolables al ámbito de la Defensa

Martín-Gómez, César [1,*], ***Bermejo-Busto, Javier*** [1] **y** ***Zuazua-Ros, Amaia*** [1]

[1] *Sección de Instalaciones y Energía, Escuela de Arquitectura. Universidad de Navarra*. instetsaun@unav.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo; instetsaun@unav.es

---

Abstract: La historia demuestra que desde el ámbito naval, aeronáutico, militar… se producen técnicas y tecnologías que después son transformadas para su aplicación en la sociedad civil, incluyendo la arquitectura, pero ¿qué ideas y proyectos podrían tener un recorrido inverso desde la investigación arquitectónica? La comunicación expone algunos de los trabajos realizados durante 15 años en la Sección de Instalaciones y Energía de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Navarra, y que pueden tener aplicación en el ámbito de la Defensa y la Seguridad. Estos trabajos docentes y de investigación cubren desde la aplicación del biomorfismo para crear sistemas de control sin un ordenador central, a la aplicación de las células Peltier para la climatización de espacios en condiciones altamente exigentes, pasando por el movimiento de masas en caso de emergencia, el uso de ciclodextrinas para la elaboración de materiales fosforescentes, o colaboraciones docentes con el SEPRONA de la Guardia Civil y el Grupo de Subsuelo del Cuerpo Nacional de Policía. Para cada una de estas aportaciones, serán los distintos actores del ámbito del i+d en Defensa y Seguridad quienes decidan como aprovechar los resultados presentados en sus respectivas áreas de trabajo.

Keywords: Arquitectura, urbanismo, integración, energía, seguridad, docencia

---

1. Introducción

La protección contra incendios, las instalaciones y los servicios energéticos representan una materia prima excelente para generar investigación, docencia de calidad y por ende avances en la arquitectura

y el urbanismo. No obstante, no existe en las Escuelas de Arquitectura universitarias españolas una tradición para investigar sobre estas cuestiones dejándose, en la mayor parte de los casos, en manos de arquitectos notables en el ejercicio de su profesión, más que en el de profesores e investigadores en sus responsabilidades académicas [1].

El equipo de investigadores viene trabajando desde el año 2000 en investigación aplicada, incluyendo el parámetro de seguridad bajo los conceptos anglosajones de *safety* y *security*, de acuerdo a los siguientes códigos UNESCO: regulación de la temperatura humana (241109), tecnología de la construcción (330500), grandes edificios y rascacielos (330503) , ingeniería civil (330506), edificios industriales y comerciales (330517), planificación urbana (330537), ingeniería y tecnología del medio ambiente (330800), tecnología energética (3322), planificación urbana (332900), historia de la arquitectura (550601), historia de la tecnología (550624), teoría y métodos educativos (580100).

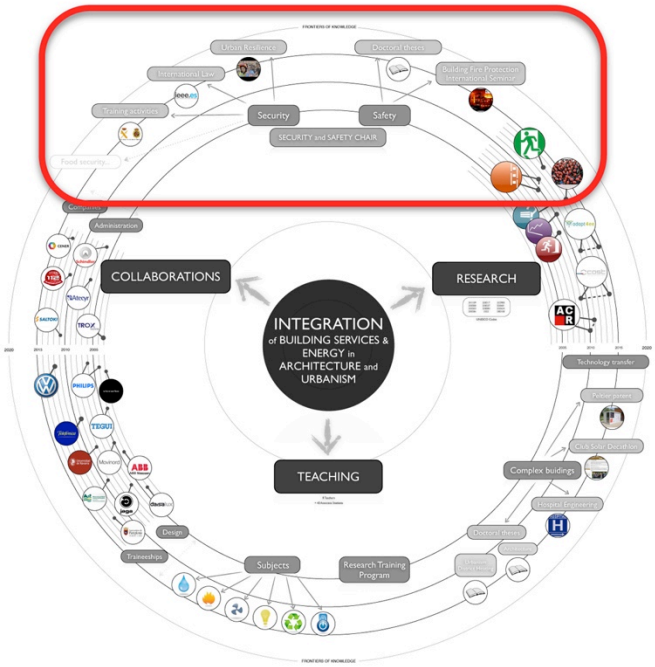


Figura 1. Resumen gráfico de las actividades realizadas por los autores desde el año 2000 bajo la denominación de "Integración de instalaciones y energía", señalando las actividades relacionadas con seguridad.

La exposición que se realiza a continuación es básicamente un recorrido cronológico, separado en docencia e investigación, de las actividades realizadas en estos años, entendiendo esta secuencia como una muestra del abanico de posibilidades abiertas a otros docentes, investigadores y profesionales.

2. Docencia

Procede explicar en primer lugar cuál es la docencia que reciben los alumnos de Arquitectura de la Universidad de Navarra:

- Instalaciones I - Fontanería y saneamiento (primer cuatrimestre, tercer curso).
- Instalaciones II - Protección contra incendios (segundo cuatrimestre, tercer curso) [2].

- Instalaciones III - Acondicionamiento higrotérmico (primer cuatrimestre, cuarto curso).
- Instalaciones IV - Electricidad y redes de control (segundo cuatrimestre, cuarto curso).
- Diseño de Instalaciones, durante todo el quinto curso.
- En el Proyecto Fin de Grado, los alumnos están obligados a plantear el conjunto de instalaciones que requiere un proyecto de ejecución.

Las anteriores materias son todas obligatorias para los alumnos de Arquitectura y, además, aquellos que quieren finalizar sus estudios con las Especialidades de 'Planeamiento y Desarrollo Urbanístico' y 'Paisaje y Medio Ambiente', han de cursar la asignatura de Ingeniería Ambiental Aplicada a la Ciudad. En esta última asignatura se muestra como las infraestructuras urbanas, al fin y al cabo, las instalaciones de la ciudad, influyen en la configuración de los núcleos urbanos y el territorio, así como su influencia en la resilencia de la sociedad.

2.1. Colaboración con organismos

Para incentivar el interés en estas materias de los alumnos de grado y de los estudiantes de doctorado, se han realizado diversas actividades de formación (siempre en grupos reducidos) con la Agencia Navarra de Emergencias, el Cuerpo Nacional de Policía y la Guardia Civil. Las siguientes imágenes (Fig. 2-6) constituyen el mejor resumen gráfico.



Figura 2. Estudio del comportamiento del humo en una escalera de evacuación con el Servicio de Bomberos de la Agencia Navarra de Emergencias y alumnos del *Research Training Program* de la Escuela de Arquitectura.





Figuras 3 y 4. Visita a galerías de servicios con la Sección Operativa de la Central de Subsuelo y Protección Ambiental del Cuerpo Nacional de Policía.





Figura 5 y 6. Estudio de campo en un cauce fluvial con el SEPRONA de la Guardia Civil y alumnos de la asignatura de Ingeniería Ambiental Aplicada a la Ciudad.

2.2. Laboratorio

El Laboratorio de la Escuela, con casi 50 años al servicio de los profesionales de la edificación, inició hace varios cursos su ampliación docente, con la creación de nuevas pruebas que completen las lecciones teóricas que abarcan desde experimentos para comprender la generación de llama en una atmósfera explosiva, construcción ex novo de armarios de prácticas o utilización de humo blanco para visualizar cómo se mueve el aire en una instalación de aire acondicionado. Hay que llamar la atención sobre esta última prueba, pues tiene una aceptación extraordinaria entre los alumnos y requiere de unos medios materiales tan sencillos para su ejecución como una bomba manual de aire y una tubería con accesorios de plástico, esto es, la implementación de este tipo de pruebas no tiene porque requerir de grandes desembolsos económicos.







Figuras 7, 8 y 9. Ejemplos de las pruebas realizadas en el Laboratorio: atmósfera explosiva (Fot: Castells, M); armario de prácticas de instalaciones de protección contra incendios (Fot: Castells, M.); prueba de humo blanco (Fot: Martín-Gómez, C.).

2.3. Proyectos de Innovación Docente

La actividad anterior ha desembocado en la presentación y aprobación de diversos Proyectos de Innovación Docente, los cuales son también valorados en el sistema de acreditación del profesorado en España. Los principalmente relacionados con el ámbito de la seguridad son los titulados: "Armario de

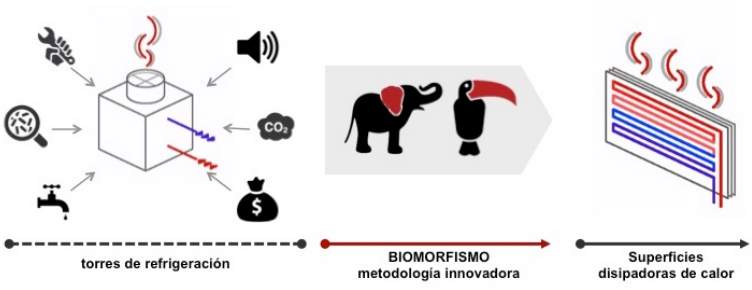
prácticas de protección contra incendios" (curso 2012/2013) y "Armario de prácticas de iluminación de emergencia" (curso 2014/2015). El lector puede encontrar detalles adicionales con la descripción exacta de cada proyecto en [http://www.unav.edu/web/innovacion-educativa/memorias-pdi] y [3].

3. Investigación

Se reserva este apartado para describir someramente los proyectos de investigación en los que se ha trabajado y, sobre todo, para transmitir con quien se ha trabajado, ya que en estos años -como arquitectos- hemos tenido la oportunidad de colaborar con ingenieros mecánicos, ingenieros eléctricos, médicos, periodistas, químicos, matemáticos, informáticos, biólogos… con un trasvase de conocimiento que alienta futuros resultados.

3.1. Biomorfismo

A partir de un proyecto concedido por el Ministerio de Economía y Competitividad, se ha elaborado un prototipo basado en las orejas del elefante y el pico del toco tucán, que permitiría desarrollar sistemas de disipación de calor complementario, o incluso sustitutivo en ciertos casos, de las torres de refrigeración. También se está trabajando, a partir del concepto anglosajón de *stigmergy*, en sistemas de control de las instalaciones de acondicionamiento higrotérmico sin unidades centrales de control. Ambas ideas ejemplifican la posibilidad de alcanzar instalaciones altamente resilentes, autónomas y flexibles para su uso independiente en condiciones extremas.





Figuras 10 y 11. Resumen gráfico del planteamiento y construcción de un prototipo de disipación de calor, con una capacidad de de 500 W/m2 en unas condiciones de entrada de agua a 45ºC y una temperatura ambiente de 30ºC.

3.2. Sistemas de climatización con células Peltier

Los sistemas completamente autónomos de climatización apenas existen en el mercado, siendo los más similares los sistemas de fachada que requieren de tuberías de agua caliente y enfriada desde una unidad central. El sistema planteado por células Peltier, y que tiene su origen en el ámbito aeroespacial, está diseñado para trabajar con corriente continua y puede, por tanto, asociarse a la acumulación eléctrica con paneles fotovoltaicos. Se trata de un prototipo con un rendimiento térmico todavía bajo, pero muy robusto y, lo que es más importante, que puede ser completamente autónomo de las redes eléctrica y térmica.



Figura 16. Prototipo de la Patente de Publicación Internacional WO 2013/057353 A1 referida a un módulo de climatización con células Peltier (Fot: Martín-Gómez, C.).

3.3. Sobre los flujos de personas

Dos acciones principales se han desarrollado en este sentido: participación en un proyecto europeo en el que se analiza la influencia de los flujos de personas en el consumo energético de los edificios, y la extrapolación a la evacuación de edificios de la teoría del comportamiento de los medios granulares.

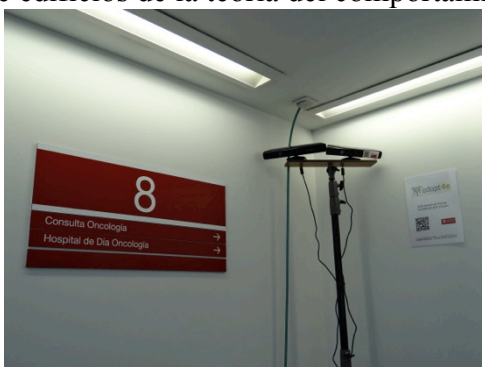
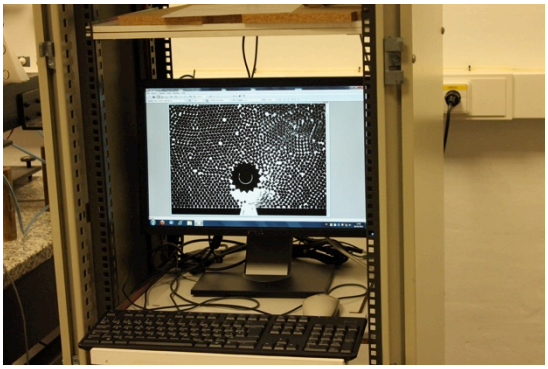


Figura 12. Ejemplo de la monitorización de flujos de personas en el contexto del proyecto europeo *Adapt4EE*, en el que se ha desarrollado una metodología para el registro del movimiento de personas sin interferencias con los derechos de privacidad.





Figuras 13 y 14. Monitorización del comportamiento de medios granulares y alumnos realizando un ensayo de evacuación. La vestimenta utilizada tiene como objeto facilitar la lectura de las trayectorias de las personas (Fot: Martín-Gómez, C.).

3.4. Tesis doctorales, otros proyectos de investigación y posibilidades de colaboración

Las tesis doctorales constituyen la punta de lanza de la investigación. Para lograr su desarrollo, además de la búsqueda casi obsesiva de fondos económicos, es necesario crear un caldo de cultivo intelectual entre los alumnos de últimos curso para alentar su interés en dedicar varios años de su vida a preparar una tesis. La experiencia acumulada en estos años, anima a pensar que es posible realizar investigaciones en formato de tesis doctoral, que pudieran ser de interés para la Arquitectura, la Defensa y Seguridad.

También pueden explicarse en este punto otros proyectos más modestos, pero que han abierto interesantes caminos de colaboración con diferentes profesionales:

- Iluminación con pinturas fosforescentes basadas en complejos con ciclodextrinas, alcanzando resultados preliminares de un 60% menos de sólido empleado, cumpliendo la norma UNE 23035-1:2003.
- Criterios para el diseño de instalaciones prefabricadas para viviendas de tamaño variable.
- Desarrollo de una *app* para dispositivos *Apple* que permite definir los principales parámetros de protección contra incendios en un edificio residencial [4].

4. Posibilidades de futuro y conclusiones

Tomando como referencia las ponencias planteadas en el II Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad, la tabla 1 plantea las posibles colaboraciones inmediatas que podrían producirse entre responsables del ámbito de la Defensa y Seguridad con investigadores del ámbito de la arquitectura y el urbanismo:

Comunicaciones al II Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad	Trabajos realizados en la Escuela de Arquitectura
Protección avanzada de infraestructuras críticas mediante un sistema global preventivo	Urbanismo
Ensayo de soluciones constructivas para mejorar la seguridad de muros de fábrica frente a explosiones	Sistemas constructivos
Avances en materiales termoeléctricos basados en óxidos de Co	Células Peltier en edificación
Consideraciones sobre el uso de una pila de combustible como sistema personal de suministro de energía para tropas de infantería	Autonomía energética
Generación energética modular e integrada en bases y campamentos	Autonomía energética
Hacia la independencia energética en bases y campamentos, mediante generación renovable y otras técnicas	Certificación energética
Sistema de prevención contra incendios por dispersión de CO2 desplegable a distancia	Protección contra incendios
Nuevas técnicas para el análisis de la vulnerabilidad de infraestructuras energéticas ante ataques deliberados	Instalaciones urbanas
El acceso al agua de calidad, factor clave para la seguridad y estabilidad	Instalaciones urbanas

Tabla 1. Posibilidades de colaboración Defensa y Seguridad – Arquitectura.

El texto ha expuesto el trabajo de profesores, investigadores y alumnos colaboradores en el área de las instalaciones y la energía desde el año 2000, con una explicación de patrones pedagógicos extrapolables a la instrucción e investigación militar. De estos resultados pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La transferencia de conocimientos entre áreas del saber, evitando innecesarias repeticiones en la investigación fundamental, se revela como una pieza imprescindible para el desarrollo de la investigación [5].
- Las Escuelas de Arquitectura han de propiciar importantes saltos cualitativos en la formación que reciben los futuros arquitectos incorporando la investigación aplicada multidisciplinar en los estudios de grado, esto es, poniendo en manos de los futuros profesionales las herramientas y soluciones de lo que podrá existir en los próximos años.
- La experiencia de estos años confirma la importancia de la gestión en la comunicación del conocimiento generado, de modo que llegue en tiempo y forma a los profesionales interesados, en este caso del ámbito de la Defensa y Seguridad, adaptándolo obviamente a las particularidades de cada caso.

Agradecimientos

Agencia Navarra de Emergencias. / Caracterización, construcción y análisis de un módulo de fachada activo con células Peltier. Proyecto financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad BIA2013-46463-R / Construcción y monitorización de un prototipo de sistema de acondicionamiento por termoelectricidad. Proyecto financiado en la convocatoria PIUNA de la Universidad de Navarra / Cuerpo Nacional de Policía. / Fundación Mutua Montañesa. / Guardia Civil. / 'Occupant Aware, Intelligent and Adaptative Enterprises', Adapt4EE, cofinanciado por la Comisión Europea dentro del 7º Programa Marco (FP7/2007-2013) nº 288150. / Rediseño de la integración de energía en edificios a partir de metabolismos animales. Proyecto financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad BIA2013-49838-EXP. / Saltoki.

Referencias

1. Martín-Gómez, C.; Mambrilla, N.; Lacilla, E.; Eguaras, M. Importación de tecnologías avanzadas a la arquitectura / Advanced Technologies Importation to Architecture. *European Conference on Energy Efficiency and Sustainability in Architecture and Planning* **2010**.
2. Mambrilla, N.; Martín-Gómez, C. *El dónde y el cómo de la investigación en protección contra incendios*; *IV Jornadas Internacionales sobre Investigación en Arquitectura y Urbanismo* **2011**.
3. Martín-Gómez, C.; Zapata, O.; Zuazua, A.; Villanueva, S.; Olaizola, P. Building services cabinets as teaching material in a degree in architecture. *European Journal of Engineering Education* **2013**, *38, 5*, 468–482.
4. Martín-Gómez, C.; Mambrilla, N. Residential Building Fire Safety Application for iPhone / iPad Devices. *Fire Computer Modeling International Congress* **2012**, *3*, 154–196.
5. Fuller, B. *El capitán etéreo y otros escritos*; Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia; Spain, 2003.

Sesión IV-C

Guiado, Energía y Materiales

Pirólisis de materia orgánica residual para la obtención de combustibles líquidos

Fonts Amador, Isabel [1,*], Ábrego Garrués, Javier [2], Atienza-Martínez, María [2], Azuara Medel, Manuel [2], Gea Galindo, Gloria [2] y Gil-Lalaguna, Noemí [2]

[1] Centro Universitario de la Defensa, Academia General Militar, Ctra. Huesca s/n, 50090 Zaragoza. Email: (isabelfo@unizar.es)

[2] Grupo de Procesos Termoquímicos, Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, Universidad de Zaragoza, C/ Mariano Esquillor s/n, 50018 Zaragoza; Emails: abrego@unizar.es (JA), atienza@unizar.es (MA), mazuara@unizar.es (MA), glogea@unizar.es (GG), noemigil@unizar.es (NG).

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: isabelfo@unizar.es (IF);

Abstract: En este trabajo se va a presentar un estudio sobre diferentes estrategias para mejorar las propiedades del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis de lodo de Estaciones Depuradoras de Agua Residuales (EDAR). Por sus características, una plausible aplicación para él sería como combustible en motores de buques. Sin embargo, algunas de sus propiedades como la homogeneidad, el contenido en agua o el contenido en heteroátomos deberían ser mejoradas. Se han estudiado cuatro modificaciones al proceso: la condensación selectiva de los vapores y la torrefacción previa a la pirólisis para reducir el contenido en agua del líquido y la pirólisis catalítica y la extracción con heptano y lavado con ácido del producto líquido para modificar su composición. Los mejores resultados en cuanto a propiedades del líquido han sido obtenidos con aquellos tratamientos encaminados a modificar su composición. La pirólisis catalítica consigue reducir enormemente el contenido en oxígeno y permite obtener una única fase orgánica, manteniendo un alto rendimiento. Mientras que la extracción con heptano y ácido, permite obtener un líquido que apenas contiene nitrógeno, aunque a costa de una importante pérdida de rendimiento a esta fracción aprovechable como combustible.

Keywords: pyrolysis; liquid bio-fuel; ship fuel.

---

1. Introducción

La futura escasez de petróleo hace necesaria la búsqueda de combustibles líquidos que se obtengan de otras fuentes. En las Fuerzas Armadas se dispone de numerosos vehículos, carros blindados, buques y aviones para los que se necesitan grandes cantidades de combustibles, por lo que disponer de una fuente renovable de combustibles líquidos permitiría reducir la dependencia del mercado internacional del petróleo, lo que en el caso de España es de sumo interés, ya que no se dispone de recursos propios.

Mediante la pirólisis de biomasa se puede obtener un producto líquido con potenciales propiedades como combustible. La pirólisis consiste en la descomposición térmica a alta temperatura de un material en ausencia de oxígeno. En esta reacción se obtienen tres productos: un gas que puede utilizarse para autoabastecer el proceso de energía, un residuo sólido con diversas aplicaciones y un líquido que puede ser utilizado como combustible. Para maximizar el rendimiento al producto líquido se debe llevar a cabo una pirólisis denominada "rápida", la cual tiene como premisas que el calentamiento de la biomasa sea rápido, que el tiempo de residencia de los vapores sea corto (< 2 s) y que se lleve a cabo en torno a 500 ºC [1]. Las características de este líquido hacen que se esté utilizando actualmente a escala industrial en aplicaciones estáticas [2], aunque también podría ser utilizado en motores diésel de media y baja velocidad como los que se utilizan en los buques. De hecho, la empresa fabricante de motores Wärtsila ya realizó pruebas en motores de barco en los años 90 con líquidos de pirólisis de biomasa lignocelulósica. En la actualidad, existen algunos países como Noruega que están estudiando la mejora de algunas de las propiedades de los líquidos de cara a su utilización en dichos motores [3]. Además, también se han llevado a cabo experimentos de combustión en un motor a reacción de mezclas de queroseno y de la fracción del líquido de pirólisis extraída con disolventes orgánicos [4].

Sin embargo, algunas de las propiedades de los líquidos de pirólisis dificultan su aplicación directa como combustibles. Sin someterse a ningún tratamiento de mejora o "upgrading", los líquidos provenientes de la pirólisis de biomasa lignocelulósica tienen un alto contenido en compuestos oxigenados, lo que provoca que tengan una solubilidad muy limitada con combustibles derivados del petróleo, una alta corrosividad debido a su acidez y una baja estabilidad térmica y al almacenamiento [1]. Además, en función de su composición o después de periodos largos de almacenamiento, el líquido puede presentar separación de fases [5]. Además, en el caso de los líquidos de pirólisis provenientes de materia orgánica residual como los lodos de EDAR o los purines de animales, su alto contenido en nitrógeno es un importante inconveniente para su aplicación como combustible debido a los problemas medioambientales derivados de la emisión de óxidos de nitrógeno [6, 7].

Para mejorar las propiedades de los líquidos de pirólisis se pueden seguir diferentes procedimientos, que se pueden clasificar, según se apliquen antes, durante o después del proceso de pirólisis. Entre los tratamientos que se aplican antes de la pirólisis se puede citar la torrefacción de biomasa. La torrefacción es un tratamiento termoquímico realizado a temperaturas moderadas (200-300 °C) en atmósfera inerte, en el que, además de obtener el material torrefactado, se desprende CO_2, a causa de reacciones de descarboxilación, y agua debido al secado de la biomasa pero también a reacciones de deshidratación [8]. Como resultado de estas reacciones, el producto sólido obtenido tiene menores ratios molares H/C y O/C, lo que puede ser beneficioso para las propiedades del producto líquido que se obtenga de la posterior pirólisis de este sólido torrefactado [9]. Otra opción, que se aplica durante el propio proceso de pirólisis, es la pirólisis catalítica con zeolitas, que permite eliminar el oxígeno de los compuestos

orgánicos convirtiéndolos en hidrocarburos [10]. Cuando la biomasa presenta un alto contenido en ácidos grasos, la pirólisis con alúmina como catalizador permite reducir muy significativamente el contenido en oxígeno del líquido, mejorando así sus propiedades [11-13]. Otra opción que ha sido estudiada es la condensación selectiva de los vapores que se obtienen durante la reacción de pirólisis, con el objetivo principal de reducir el contenido en agua, lo cual es uno de los requerimientos que necesitaría un líquido de pirólisis para su aplicación como combustible o para poder ser co-alimentado en una refinería de petróleo [14-16]. Una opción diferente de la que existen pocos estudios pero que ha conseguido interesantes resultados en cuanto a la reducción del contenido en oxígeno de los líquidos de pirólisis es llevar a cabo la pirólisis utilizando como atmósfera de reacción el propio gas de pirólisis producido que se recircula al proceso [18, 19]. Una vez que el líquido ya ha condensado, el tratamiento de hidrodesoxigenación de los líquidos de pirólisis puede reducir enormemente su contenido en oxígeno, pero tiene un consumo de hidrógeno muy elevado [17]. Otras opciones interesantes para mejorar su aplicabilidad como combustible podrían ser la mezcla o emulsión del líquido de pirólisis o de alguna de sus fraccio con otros combustibles [4, 20-22].

Las especificaciones técnicas de todos los combustibles derivados del petróleo y de los biocombustibles que se utilizan actualmente a escala comercial en aplicaciones de transporte están reguladas mediante diferente normativa: combustibles líquidos derivados del petróleo (RD 1088/2010) [23], biodiésel (UNE-EN-14214) [24] y bioetanol (UNE-EN-15376) [25]. Para los líquidos de pirólisis, tan solo existe una norma ASTM (ASTM D7544) en la que se definen dos tipos de líquidos de pirólisis de acuerdo a su calidad, pero orientando su utilización a aplicaciones estáticas [26]. Debido a la necesidad de estándares europeos, el Comité Europeo de Normalización (CEN) recibió el mandato (M525) de la Comisión Europea de desarrollar cinco estándares de calidad diferentes para los líquidos de pirólisis en función de las diferentes aplicaciones que pueden tener [2]. Además, en el caso de los buques existe una normativa internacional que regula las emisiones atmosféricos (Anexo VI del Convenio MARPOL 73/78) [27], que también se debería cumplir si los líquidos de pirólisis de lodo se aplicasen en sus motores.

En este trabajo se van a presentar resultados experimentales de diferentes tratamientos de mejora de las propiedades combustibles del líquido de pirólisis de lodos de EDAR. Concretamente, los tratamientos que se han evaluado son la condensación selectiva de los vapores y la torrefacción previa a la pirólisis para reducir el contenido en agua del líquido, y la pirólisis catalítica y la extracción con heptano y lavado con ácido del producto líquido para modificar su composición. Además, teniendo en cuenta que una de las aplicaciones de transporte más factible para los líquidos de pirólisis sería la sustitución de los combustibles para buques, se compararán los resultados obtenidos con las especificaciones del gasóleo B utilizado en sus motores. A su vez, se revisará si los gases de su combustión cumplirían su normativa específica de emisiones de NOx [27].

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. Materiales

En este trabajo se han utilizado lodos provenientes de un tratamiento de digestión anaerobia de dos Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales Urbanas diferentes cuyos valores de análisis elemental,

inmediato y poder calorífico se pueden consultar en otras publicaciones [14, 28]. De estos análisis cabe destacar el alto contenido en nitrógeno que presenta este material en comparación con la biomasa lignocelulósica.

2.2. Experimental

Tanto los experimentos de pirólisis como los de torrefacción se han llevado a cabo en una planta de lecho fluidizado a escala de laboratorio (capacidad de alimentación de sólido < 1 kg/h). El sólido se alimenta en continuo al reactor desde una tolva y mediante un tornillo sinfín. Para fluidizar el lecho se ha utilizado una corriente de nitrógeno que proporciona una velocidad de fluidización 8 mayor que la de mínima fluidización en pirólisis y 4-5 veces en torrefacción. La mayoría del producto sólido abandona el reactor mediante rebose y cae a un depósito. El sólido torrefactado recogido en este depósito es el que se ha utilizado como alimentación para la pirólisis en aquellos experimentos en los que se combina torrefacción y pirólisis. El reactor se encuentra dentro de un horno con tres resistencias eléctricas que permiten controlar independientemente la temperatura del lecho (530 °C), del "freeboard" (450 °C) y del ciclón (450 °C). En torrefacción se han estudiado dos temperaturas de lecho diferentes (220 y 320 °C). Tras el ciclón, se encuentra un filtro en caliente para retener partículas sólidas que hayan escapado al ciclón. Posteriormente, en los experimentos realizados con catalizador se ha dispuesto un reactor secundario de lecho fijo con γ-Al_2O_3; la velocidad espacial horaria en peso utilizada fue de 1,6 h^{-1}. Una vez que los vapores abandonan la zona de alta temperatura de la instalación son condensados en el sistema de condensación.

Se han utilizado dos sistemas de condensación diferentes; en el denominado convencional se han utilizado dos condensadores refrigerados con agua y hielo, seguidos de un precipitador electrostático, y en el sistema de condensación con el que se pretende condensar selectivamente el para reducir su contenido en el líquido se han sustituido los dos condensadores por un lavador de gases. Como agente lavador se utilizó trietilenglicol (TEG) a 80 ºC. El TEG es higroscópico y se utiliza habitualmente en el secado del gas natural [29]. Tras el lavado, el agente lavador junto con el producto líquido condensado es devuelto a una ampolla que está termostatizada a la temperatura deseada, recirculándolo en continuo mediante una bomba. En el lavador de gases, los vapores condensan en forma de neblina o aerosol, y los compuestos más afines al líquido lavador son solubilizados en él. A continuación se encuentra el precipitador electrostático, donde se recoge el producto líquido de la pirólisis. Los gases no condensables generados en la reacción son analizados en continuo a la salida del sistema de condensación mediante un microcromatógrafo de gases de la marca Agilent modelo 3000A, que permite determinar el rendimiento a gas y comprobar que los balances de materia de los experimentos realizados cierran en todos los casos por encima del 95%.

Una vez finalizado el experimento, se determina la cantidad de líquido generado mediante diferencia de pesada entre los equipos donde se recoge dicho producto. El producto líquido se centrifuga y se determina el número de fases que presenta y su proporción volumétrica. Posteriormente y con ayuda de una pipeta, se separan cuidadosamente cada una de las fases para su posterior análisis. De cada una de estas fases se determina el rendimiento másico, el contenido en agua mediante valoración Karl-Fisher, el poder calorífico en una bomba calorimétrica IKA C 2000 Basic Calorimeter, el análisis elemental utilizando un analizador Leco modelo TruSpec Micro y la viscosidad a 40 ºC. Por último, en los

experimentos de mejora del líquido de pirólisis mediante extracción con disolventes se realizó una extracción doble de las muestras con heptano y ácido clorhídrico.

3. Resultados y Discusión

3.1. Pirólisis no catalítica de lodo y condensación no selectiva de los vapores

El producto líquido obtenido en los experimentos de pirólisis de lodo es heterogéneo y se separa en tres fases, dos orgánicas y una acuosa, con propiedades muy diferentes (ver Tabla 1). La fase acuosa tiene un contenido en agua tan elevado que imposibilita su aplicación como combustible. Esto mismo ocurre en el resto de estudios expuestos en este trabajo, por lo que de aquí en adelante no se van a mostrar sus propiedades.

La primera dificultad para la aplicación del líquido de pirólisis de lodo es su heterogeneidad, que se refleja en la presencia de dos fases orgánicas diferenciadas: una denominada fase orgánica ligera (FOL) y otra fase orgánica pesada (FOP). Si se comparan las características de las fases orgánicas del líquido de pirólisis con las del gasóleo de uso marítimo (ver Tabla 1), se puede ver que la FOL presenta una mayor similitud que la FOP, destacando el elevado valor del poder calorífico, el cual es del mismo orden que el del gasóleo B. El contenido en agua de la FOL también se encontraría dentro de los límites que se dan para el gasóleo B. Sin embargo, la viscosidad estaría por debajo y la densidad, el contenido en sólidos y el contenido en azufre excederían el máximo marcado. En cuanto a la FOP, su contenido en agua, poder calorífico y contenido en azufre son especialmente diferentes.

Característica	FOL	FOP	Característica	Gasóleo B [23]
Contenido en agua (%)	0,0	12,4	Contenido en agua, max (%)	0,02
Contenido en cenizas (%)	0,03		Contenido en cenizas, max (%)	0,01
PCS (MJ/kg)	43,3	30,6	PCS (MJ/kg)	43,1
PCI (MJ/kg)	41,0	28,7	PCI (MJ/kg)	35,86
Viscosidad dinámica (cPs) a 40 ºC	9,20	81		
Viscosidad cinemática (mm^2/s) a 40 ºC	0,098	0,65	Viscosidad cinemática a 40 °C, min/max (mm^2/s)	2,0/4,5
Densidad (kg/m^3) a 20 ºC	940	1230	Densidad a 15 °C, min/max (kg/m^3)	820/880
C (%)	75,6	62,2		
H (%)	10,5	8,4		
N (%)	2,4	8,8		
S (%)	0,2	1,0	Azufre, máx (%)	0,1
O (%) por diferencia	11,3	19,6		

Tabla 1. Comparación de las propiedades de las fases orgánicas del líquido de pirólisis no catalítica de lodo con condensación no selectiva y del gasóleo B.

El alto contenido en nitrógeno de ambas fases también dificultaría su aplicación, y tiene como origen el nitrógeno presente en los lodos. En el gasóleo B no existen restricciones para el contenido en nitrógeno, ya que este elemento no está presente en grandes cantidades en los combustibles derivados del petróleo. Sin embargo, existen valores de emisión máximos de NOx para los gases de combustión obtenidos en motores de barcos, los cuales varían entre 9,8 y 17,0 g/kWh dependiendo de la potencia del motor [27]. Debido a las bajas concentraciones de nitrógeno en el gasóleo, el NOx presente en sus gases de combustión será principalmente de origen térmico. En el caso de las fases orgánicas del líquido

de pirólisis de lodo, las emisiones de NOx debidas exclusivamente al nitrógeno del combustible serían de 6,9 g/kWh para la FOL y de 36,13 g/kWh para la FOP (calculadas como NO_2). Además, a estas habría que sumarles el NOx térmico generado, por lo que sería recomendable disminuir el contenido en nitrógeno de la FOL y sería obligatorio en el caso de la FOP.

3.2. Estrategias para la reducción del contenido en agua del líquido de pirólisis de lodo

Para tratar de reducir el contenido en agua del líquido, y de este modo incidir positivamente en algunas de sus propiedades como la separación de fases y el poder calorífico, se han seguido dos estrategias diferentes: la utilización de un sistema de condensación selectivo de los vapores de pirólisis y la torrefacción del lodo previa a su pirólisis.

La Tabla 2 muestra una comparativa de las propiedades de las fases orgánicas de pirólisis de lodo obtenidas al modificar el sistema de condensación y al utilizar lodo torrefactado como alimentación a la pirólisis. En la Tabla 2 aparecen la temperatura y el tiempo de residencia del sólido que se utilizaron en los experimentos de torrefacción.

	Sistema de condensación selectivo		Pirólisis lodo torrefactado			
			220 ºC/3,6 min		320 ºC/10,2 min	
Característica	FOL	FOP	FOL	FOP	FOL	FOP
Contenido en agua (%)	0,0	12,4	1,3	9,4	1,6	6,9
PCS (MJ/kg)	43,3	29,8	41,7	31,3	42,2	33,0
PCI (MJ/kg)	40,6	27,9	nd	nd	nd	nd
Viscosidad dinámica (cPs) a 40 ºC	nd	111	nd	180	nd	115
Viscosidad cinemática (mm^2/s) a 40 ºC	nd	0,104	nd	0,173	nd	0,111
Densidad (kg/m^3) a 20 ºC	940	1070	998	1048	968	1047
C (%)	85,9	65,3				
H (%)	11,8	8,6				
N (%)	1,8	9,5				
S (%)	0,18	0,49				
O (%) por diferencia	0,32	16,1				

nd: no determinado.

Tabla 2. Propiedades de las fases orgánicas provenientes de pirólisis no catalítica de lodo con condensación selectiva y de pirólisis no catalítica de lodo torrefactado con condensación no selectiva.

Cuando los condensadores son sustituidos por la columna lavadora con TEG, el contenido total de agua en el líquido se reduce desde un 48 % hasta niveles del 13-14 %. Sin embargo, la homogeneidad del líquido no se ve afectada ya que éste sigue separándose en tres fases, dos de ellas orgánicas. Además, las propiedades de la FOP no mejoran sino que toman valores más alejados de los del gasóleo. Por el contrario, la mayoría de las propiedades de la FOL no se ven afectadas por la modificación en el sistema de condensación. Tan sólo se aprecia una moderada disminución en el contenido en nitrógeno, lo cual puede ser beneficioso para el aprovechamiento como combustible de esta fase, ya que las emisiones de NO_2 debidas al nitrógeno del combustible bajarían hasta 5,2 g/kWh. Por último, la producción de esta fase se ve favorecida al utilizar TEG a 80 ºC como agente lavador (40 % mayor), lo cual es un resultado interesante debido a las buenas propiedades de esta fase.

El líquido de pirólisis de lodo torrefactado también es heterogéneo y se separa en tres fases distintas (dos orgánicas y una acuosa), a pesar de que el contenido total de agua en el líquido también se ve reducido de forma notable. Cuando el lodo ha sido torrefactado bajo las condiciones más severas (320 °C/10,2 min), el rendimiento a FOL es menor que cuando se piroliza lodo de EDAR, mientras que el rendimiento a la FOP no se ve afectado de forma significativa. Propiedades como el contenido en agua o el poder calorífico superior de las fases orgánicas apenas se ven afectadas por el pretratamiento del lodo mediante torrefacción. El contenido en nitrógeno de la FOP tampoco se ve reducido cuando se piroliza lodo torrefactado. Por lo tanto, el pretratamiento del lodo de EDAR mediante torrefacción no mejora las propiedades como combustible de las fases líquidas orgánicas obtenidas en la pirólisis.

Las importantes reducciones en el contenido en agua conseguidas con ambos tratamientos no consiguen homogeneizar el líquido para obtener una única fase orgánica. Esto demuestra la presencia de una amplia variedad de compuestos con un carácter marcadamente apolar como los hidrocarburos y otros con un carácter más polar como todos aquellos que contengan heteroátomos en su composición. Esto es debido a que tanto al utilizar el sistema de condensación selectivo, como al pirolizar lodo torrefactado apenas se consigue modificar la composición química de las fases orgánicas y éstas siguen teniendo unos contenidos en oxígeno y en nitrógeno elevados para su aplicación como combustible. Por lo tanto, para mejorar lo homogeneidad del líquido y otras propiedades como su poder calorífico, su viscosidad, su estabilidad y las emisiones derivadas de su combustión, se decidió estudiar otros procesos como la pirólisis catalítica y la extracción con disolventes, que permitieran modificar dicha composición; los resultados de los mismos se muestran a continuación.

3.3. Estrategias para modificar la composición química del líquido

La pirólisis catalítica de lodo permite obtener una única fase orgánica (FO) en lugar de dos, lo que facilita enormemente su aplicación final. Esta mejora en la homogeneidad del líquido se debe a la reducción en el contenido en oxígeno, lo que a su vez se traduce en una mayor presencia de compuestos apolares. La disminución de compuestos oxigenados y, en concreto, de ácidos grasos provoca que la viscosidad de la FO tome valores menores que los de la FOP y casi similares a los de la FOL.

Característica	FO
Contenido en agua (%)	2,0
PCS (MJ/kg)	40,3
PCI (MJ/kg)	38,1
Viscosidad dinámica (cPs) a 40 ºC	24,7
Viscosidad cinemática (mm^2/s) a 40 ºC	0,26
Densidad (kg/m^3) a 20 ºC	940
C (%)	79,5
H (%)	9,8
N (%)	8,4
S (%)	0,8
O (%) por diferencia	1,5

Tabla 3. Propiedades de la FO proveniente de pirólisis catalítica de lodo.

El poder calorífico es algo inferior al de la FOL, pero superior al que resultaría de la media ponderada del de la FOL y de la FOP. Además, sigue teniendo un valor suficientemente alto y comparable o incluso superior al de otros biocombustibles, como el biodiésel (37,5-40 MJ/kg) y el bioetanol (27 MJ/kg). Al

reducirse la presencia de compuestos oxigenados, los cuales son muy reactivos, se mejora la estabilidad al almacenamiento, como se ha podido comprobar al determinar la variación del poder calorífico con el tiempo. Sin embargo, el contenido en nitrógeno sigue siendo muy elevado por lo que se planteó estudiar su reducción utilizando la extracción con un disolvente ácido que permitiera extraer los compuestos nitrogenados básicos y con heptano, que además separaría los compuestos más hidrogenocarbonados. El análisis elemental de la fracción extraída mediante este procedimiento es: C (80,67%), H (11,66%), N (1,93%) y su poder calorífico calculado según la ecuación propuesta por Channiwala y Parikh [30] es de 41,3 MJ/kg. El reducido contenido en nitrógeno de esta fracción provocaría unas emisiones de NOx debido al nitrógeno de 5,9 g/kWh.

4. Conclusiones

Los tratamientos estudiados para reducir el contenido en agua del líquido de pirólisis de lodo de EDAR, condensación selectiva y torrefacción como etapa previa a la pirólisis, consiguen reducir significativamente la presencia de agua, aunque la homogeneidad y las propiedades combustibles de las fases orgánicas no se ven mejoradas con estos tratamientos.

La pirólisis catalítica de lodos de EDAR consigue mejorar la homogeneidad del líquido de pirólisis, obteniéndose una única fase orgánica, y además reducir el contenido en oxígeno, lo que incide positivamente en propiedades como la viscosidad y la estabilidad al almacenamiento, sin un perjuicio elevado en el rendimiento a dichas fases ni en su poder calorífico. Por otro lado, la extracción con disolventes de las fases del líquido de pirólisis permite obtener un combustible con una composición adecuada para su aplicación, incluyendo un bajo contenido en nitrógeno, pero a costa de reducir el rendimiento másico a dicha fracción.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Gobierno de Aragón (Fondo Social Europeo) el soporte económico al Grupo de Procesos Termoquímicos y al Ministerio de Economía y Competitividad (Fondos FEDER) por el soporte económico mediante la concesión del proyecto CTQ 2013-47260-R.

Referencias

1. Mohan, D.; C. U. Pittman, Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels* **2006**, *20(3)*, 848-889.
2. Oasmaa, A.; B. Van De Beld, Norms, standards, and legislation for fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass. Energy and Fuels **2015**, *29(4)*, 2471-2484.
3. *Wood waste biofuel could cut greenhouse gas emissions*. Last accessed: 17/07/2015. Available from: http://www.aston.ac.uk/about/news/releases/2014/may/new-wood-waste-biofuel-could-reduce-greenhouse-gas-emissions/.
4. Gutiérrez Bravo, J.; González González, J. F. *Extracción y análisis de bioaceite pirolítico a partir de biomasa: una fuente de energía alternativa para motores a reacción*, in *II Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad*. **2014**. Zaragoza.
5. Oasmaa, A.; Kuoppala, E. Fast pyrolysis of forestry residue. 3. Storage stability of liquid fuel. *Energy & Fuels* **2003**, *17(4)*, 1075-1084.
6. Fonts, I.; Gea, G. Sewage sludge pyrolysis for liquid production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2012**, *16(5)*, 2781-2805.

7. Fonts, I.; Kuoppala, E. Physicochemical Properties of Product Liquid from Pyrolysis of Sewage Sludge. *Energy & Fuels* **2009**, *23(8)*, 4121-4128.
8. Chang, S.; Zhao, Z. Characterization of products from torrefaction of sprucewood and bagasse in an auger reactor. *Energy and Fuels* **2012**, *26(11)*, 7009-7017.
9. Boateng, A. A.; Mullen, C. A. Fast pyrolysis of biomass thermally pretreated by torrefaction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **2013**, *100*, 95-102.
10. Mortensen, P. M.; Grunwaldt, J. D. A review of catalytic upgrading of bio-oil to engine fuels. *Applied Catalysis A: General* **2011**, *407(1-2)*, 1-19.
11. Azuara, M.; Fonts, I. Catalytic post-treatment of the vapors from sewage sludge pyrolysis by means of γ-Al_2O_3: Effect on the liquid product properties. *Fuel Processing Technology* **2015**, *130(0)*, 252-262.
12. Boocock, D. G. B.; Konar, S. K. Fuels and Chemicals from Sewage-Sludge .2. the Production of Alkanes and Alkenes by the Pyrolysis of Triglycerides over Activated Alumina. *Fuel* **1992**, *71(11)*, 1291-1297.
13. Maher, K. D.; Bressler, D. C. Pyrolysis of triglyceride materials for the production of renewable fuels and chemicals. *Bioresource Technology* **2007**, *98(12)*, 2351-2368.
14. Gil-Lalaguna, N.; Fonts, I. Reduction of Water Content in Sewage Sludge Pyrolysis Liquid by Selective Online Condensation of the Vapors. *Energy & Fuels* **2010**, *24*, 6555-6564.
15. Sui, H. Q.; Yang, H. P. Fractional Condensation of Multicomponent Vapors from Pyrolysis of Cotton Stalk. *Energy & Fuels* **2014**, *28(8)*, 5095-5102.
16. Westerhof, R. J. M.; Kuipers, N. J. M. Controlling the water content of biomass fast pyrolysis oil. *Industrial & Engineering Chemistry Research* **2007**, *46(26)*, 9238-9247.
17. Talmadge, M. S.; Robert M. Baldwin, A perspective on oxygenated species in the refinery integration of pyrolysis oil. *Green Chemistry* **2014**, *16(2)*, 407-453.
18. Mullen, C. A.; Boateng, A. A. Production of deoxygenated biomass fast pyrolysis oils via product gas recycling. *Energy and Fuels* **2013**, *27(7)*, 3867-3874.
19. Mullen, C. A.; Boateng, A. A. Hydrotreating of fast pyrolysis oils from protein-rich pennycress seed presscake. *Fuel* **2013**, *111*, 797-804.
20. Chiaramonti, D.; Bonini, A. Development of emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel and their use in engines - Part 1: emulsion production. *Biomass & Bioenergy* **2003**, *25(1)*, 85-99.
21. García-Pérez, M.; Adams, T. T. Production and fuel properties of pine chip Bio-oil/Biodiesel blends. *Energy & Fuels* **2007**, *21(4)*, 2363-2372.
22. Ikura, M.; Stanciulescu, M. Emulsification of pyrolysis derived bio-oil in diesel fuel. *Biomass & Bioenergy* **2003**, *24(3)*, 221-232.
23. Real Decreto 1088/2010, de 3 de septiembre, por el que se modifica el Real Decreto 61/2006, de 31 de enero, en lo relativo a las especificaciones técnicas de gasolinas, gasóleos, utilización de biocarburantes y contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo.
24. UNE-EN-14214:2013. Productos petrolíferos líquidos. Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) para motores diesel y equipos de calefacción. Requisitos y métodos de ensayo.
25. UNE-EN-15376:2011. Combustibles para automoción. Etanol como componente de mezclas para gasolina. Requisitos y métodos de ensayo.
26. ASTM D7544-12, Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012,
27. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (MARPOL 73/78)
28. Azuara, M.; Fonts, I. Study of catalytic post-treatment of the vapours from sewage sludge pyrolysis by means of γ-Al2O3. *Fuel* **2013**, *107*, 113-121.
29. Darwish, N. A.; Hilal, N. Sensitivity analysis and faults diagnosis using artificial neural networks in natural gas TEG-dehydration plants. *Chemical Engineering Journal* **2008**, *137(2)*, 189-197.
30 Channiwala, S. A.; Parikh, P. P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel* **2002**, *81*, 1051-1063.

Ensayo de solución a la problemática del Conjunto de Adaptación y Afuste de la plataforma Vehicular Mistral.

Pacheco Ordóñez, Fernando[1]*, Briales Rute, Eduardo[2], Blázquez Hernández, José Enrique[3], Romero Bernal, Pablo[4] y Campoy Fernández, Jesús[5]

1 Teniente Ingeniero de PCMASACOM
2 Ingeniero Project Manager mercado de Defensa. (EBR) Email:ebriales@lineasycables.com
3 Ingeniero Responsable de I+D. (JEBH)
Email: jeblazquez@lineasycables.com
4 Ingeniero Mecánico de I+D. (PBR)
Email: promero@lineasycables.com
5 Capitán Ingeniero de PCMASACOM

*Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: fpacord@et.mde.es

---

Abstract:

El objeto del presente trabajo es describir el estudio de ingeniería realizado sobre material de guerra del Ejército de Tierra, para eliminar las causas de avería reiterada en algunos de sus elementos. Concretamente, se hablará de las incidencias presentadas durante el desempeño por el Conjunto de Adaptación y Afuste, y la Plataforma Vehicular. Ambos constituyen la unión mecánica y electrónica entre los misiles, el puesto de tiro, y el vehículo, por lo que se abarca ambas disciplinas.

Keywords: Sistema antiaéreo; Sistema Terrestre; Afuste;

---

1. Introducción

El Conjunto de Adaptación y Afuste para la plataforma vehicular de nuestros vehículos presenta actualmente una serie de incidencias frecuentes que provocan una merma en la operatividad del sistema. Estas dificultades se pueden clasificar de la siguiente forma: Avería del encoder, degradación de los silentblocks, y oxidación y deterioro de elementos varios.

La finalidad de este estudio es doble, por un lado persigue la solución de las incidencias y por otro lado pretende optimizar los procesos de mantenimiento y reparación de estas u otras incidencias consiguiendo que estas tareas puedan ser llevadas a cabo in situ y con herramienta básica. Consiguiendo con ello una mejora de la operatividad y una optimización de los costes.

Este estudio ha sido llevado a cabo con la colaboración directa entre PCMASACOM y la empresa Líneas y Cables.

2. Descripción técnica de la situación actual

A continuación se presentan las incidencias de mantenimiento del Conjunto Adaptación Afuste 1440-33-204-3065 del Sistema de Armas MISTRAL. Estas averías o faltas de rendimiento óptimo se pueden clasificar según afecten a la parte mecánica, eléctrica o de operatividad.

2.1Incidencias mecánicas

a) Oxidación y corrosión de los elementos interiores del Conjunto de Adaptación y Afuste.

Causa: Acumulación de agua y grasa en el interior del Conjunto de Adaptación y Afuste.



b) Los cables del encoder rozan con los mecanismos de desbloqueo del asiento.

Causa: Los cables del encoder no están fijados a cuerpo alguno.



c) Silentblock disuelto. El líquido resultante alcanza el encoder y lo daña.

Causa: Agua y grasa en contacto con el elastómero del silentblock.



d) Dificultad en el movimiento de giro del afuste.

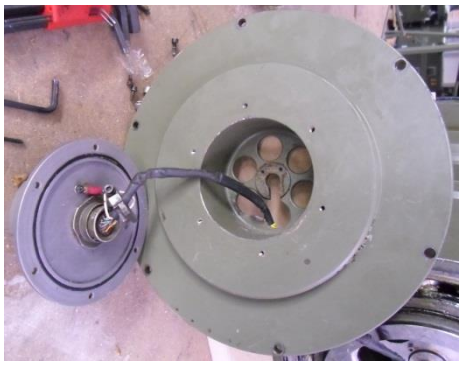
Causa: Bloqueo de las bolas del rodamiento por la grasa reseca en el interior del rodamiento.



2.2 Incidencias de operatividad

e) Para acceder al interior del Conjunto de Adaptación y Afuste por la parte inferior es necesario cortar los cables del conector inferior del encoder.

Causa: Los cables inferiores del encoder están soldados al conector fijado a la tapa inferior y el conector no pasa a través de los orificios existentes en la pieza inferior del afuste.



f) Para desmontar los brazos del encoder es necesario cortar los cables de los conectores.

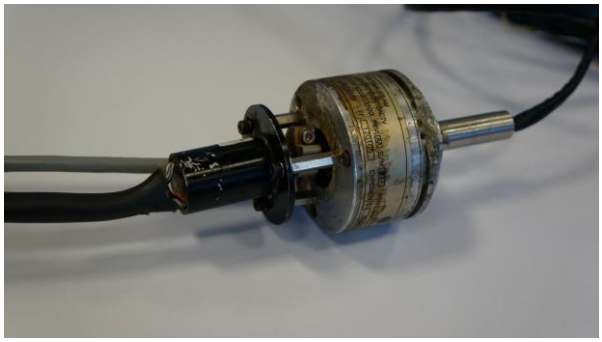
Causa: Los cables superiores del encoder están soldados a los conectores fijados al cuerpo y a uno de los brazos del Conjunto de Adaptación y Afuste, y estos conectores no pasan a través de los orificios por los cuales pasan los cables.



2.3 Incidencias eléctricas

g) Frecuentes averías en el funcionamiento del encoder.

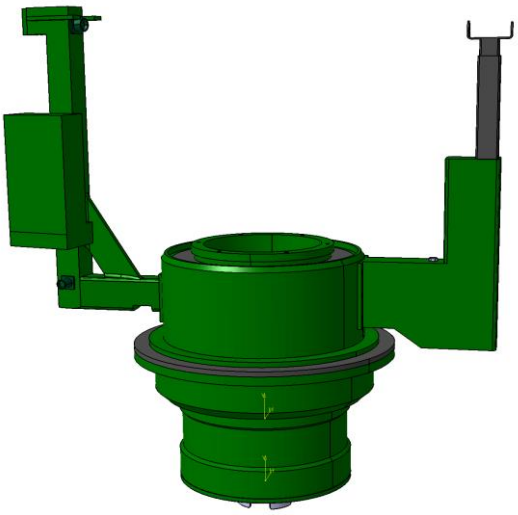
Causa: Presencia de agua y de exceso de grasa en el interior del afuste.



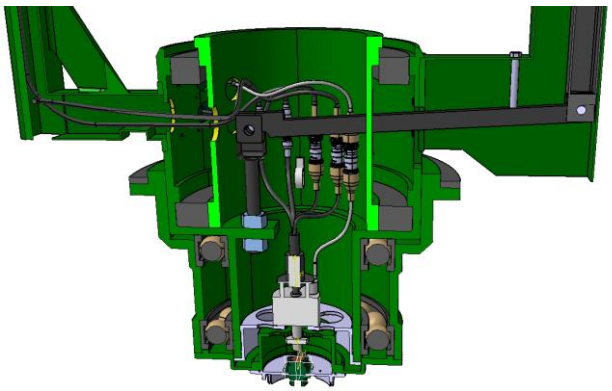
3. Materiales y Métodos.

Líneas y Cables S.A. ha realizado el estudio de las soluciones a través de un modelo virtual 3D del Conjunto de Adaptación y Afuste obtenido mediante un ejercicio de ingeniería inversa con el software CAD (Diseño Asistido por Ordenador) Catia v5.

Esta tecnología ha permitido diseñar y valorar diferentes soluciones con un alto grado de definición y en un espacio corto de tiempo. Gracias a esto, y en colaboración con el PCMASACOM se ha podido decidir de entre varias posibilidades la solución que mejor se adapta a los requisitos.



Vista Conjunto Adaptación y Afuste

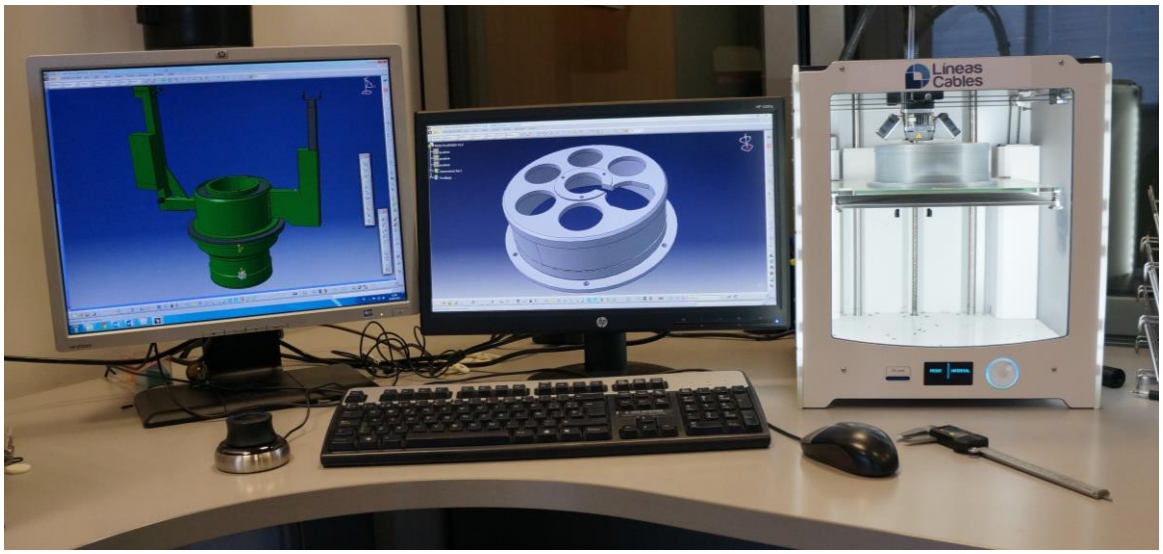


Vista de sección

Durante el diseño, gracias al uso de herramientas CAD, se han construido prototipos de las piezas modificadas mediante fabricación aditiva (impresión 3D). Éstas, junto con muestras originales de los componentes eléctricos, han sido montadas en un Conjunto de Adaptación y Afuste real. De esta forma se comprueba tanto la funcionalidad de la solución como su facilidad de instalación.

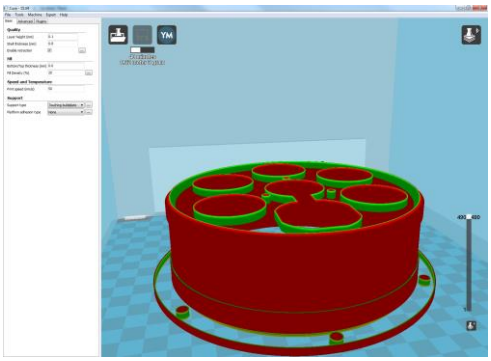
La tecnología de impresión 3D utilizada (FDM) permite la fabricación de cualquier tipo de pieza gracias a la creación mediante capas de una pieza sólida. Esta tecnología es la que permite crear prototipos a un menor coste y en menor tiempo. La máquina de fabricación aditiva es alimentada por

un filamento de material plástico (ABS), que es extruido a alta temperatura, creando capas de 0.02mm, que en su conjunto forman la pieza.





Pieza original



Generación del modelo mediante superposición de capas



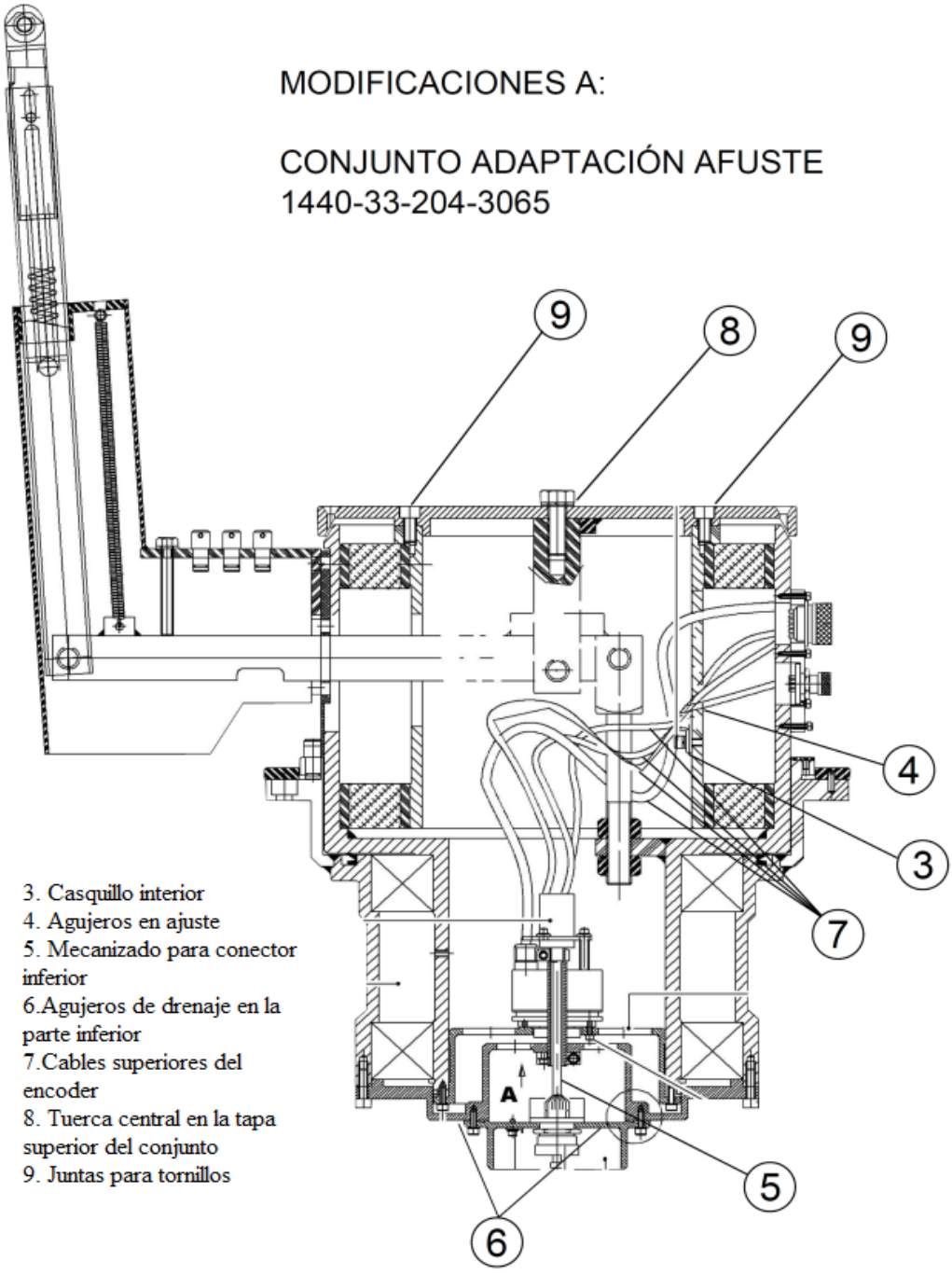
Prototipo de pieza mecanizada fabricada por impresión 3D.

Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración directa con el PCMASACOM, que ha posibilitado el acceso al sistema para la toma de medidas y referencias, y posterior comprobación de la solución.

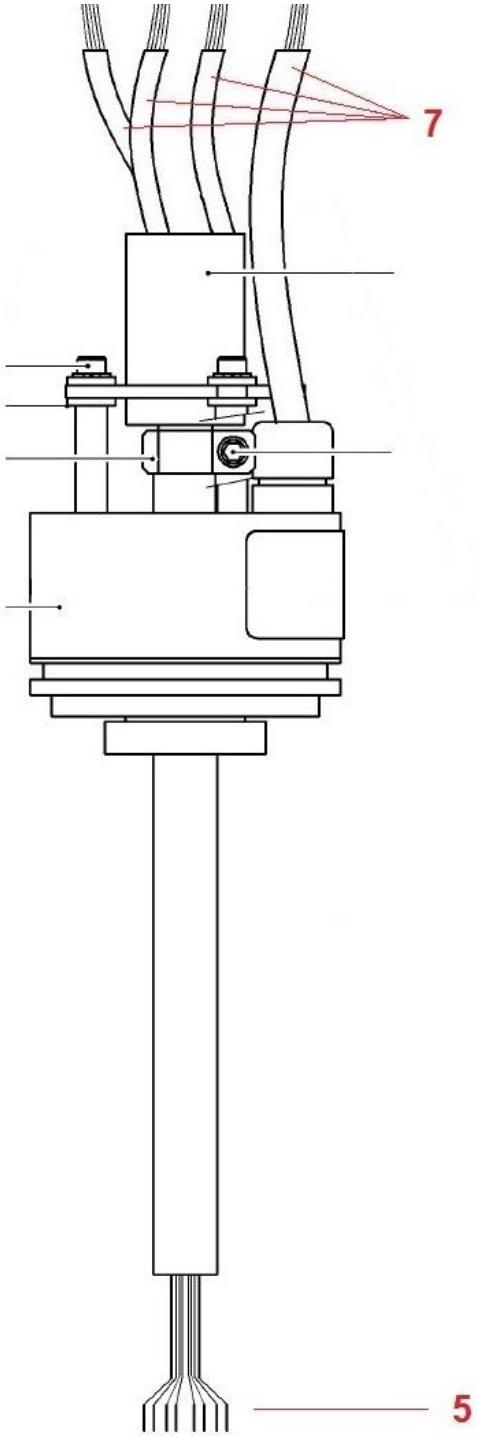
4. Resultados y Discusión

Realizado el estudio de las causas que dan lugar a las incidencias antes indicadas se proponen las siguientes soluciones según la clasificación del apartado anterior. Las actuaciones a realizar están orientadas a conseguir una solución global de las diferentes incidencias. Cabe destacar la modificación del cableado interior que permite la sustitución del encoder en cualquier lugar y con herramienta básica, haciendo también posible el desmontaje integral de todos los elementos y el acceso a cualquier

elemento del afuste sin que ello conlleve una reconexión del encoder que obligaría a trasladar el afuste al PCMASACOM.



Plano 1. Corte del conjunto de Adaptación y Afuste



MODIFICACIONES A:
CONJUNTO ADAPTACIÓN AFUSTE
1440-33-204-3065

DETALLE DEL ENCONDER O
SUBCONJUNTO CABLEADO SACTV
5990-33-204-4519

5. Mecanizado para conector inferior
7. Cables superiores del encoder

Plano 2. Encoder

a) Solución para oxidación y corrosión:

- Hacer dos agujeros de drenaje en las tapas inferiores. (Plano 1: punto 6)
- Colocar una junta para la tuerca central de la tapa superior del Conjunto de Adaptación y Afuste. (Plano 1: punto 8)
- Colocar juntas para los tornillos de cabeza allen de la tapa superior del Conjunto de Adaptación y Afuste. (Plano 1: punto 9)

b) Solución para el roce del cableado con piezas móviles:

- Sujetar mediante una abrazadera los cables del encoder al casquillo interior de la parte superior. (Plano 1: punto 3)

c) Solución para evitar la degradación de los silentblocks:

- Las medidas a adoptar para solventar la oxidación y corrosión evitarán el contacto de los silentblocks con el exceso de grasa y humedad.

d) Solución para evitar bloqueos en los rodamientos:

- Mantener una correcta lubricación de los elementos que están presentes en el movimiento de giro del afuste.

e) Solución para facilitar el acceso al interior del afuste:

- Mecanizar la pieza de tal forma que permita pasar a través de ella el conector ubicado en la parte inferior del afuste.

f) Solución para facilitar el acceso al brazo del afuste:

- Intercalar un conjunto macho-hembra en cada cable superior del encoder. (Plano 2: punto 7).
- Mecanizar los agujeros del afuste para que permitan el paso de los conectores aéreos nuevos a instalar, permitiendo así un completo desmontaje del conjunto sin cortar el cableado. (Plano 1: punto 4).

g) Solución para aumentar la vida útil del encoder

- Las soluciones propuestas en los apartados anteriores evitan el exceso de grasa y humedad alargando la vida útil del encoder.
- A su vez, se intercalan conectores aéreos macho-hembra estancos de última tecnología de la gama Ultimate de la marca Fischer, en el interior del afuste de tal modo que el encoder en caso de avería pueda ser reemplazado por uno nuevo sin necesidad de cortar cable y soldar los conectores.

5. Conclusiones

La principal conclusión del trabajo es el intercalado de conectores en la parte superior del encoder y el mecanizado de las piezas inferiores que hará que el proceso de montaje y desmontaje del mismo sea una operación menor, esta operación podrá ser llevada a cabo in situ y con herramienta básica.

La aplicación de este estudio proporciona un considerable ahorro para Defensa. Cabe destacar la aplicación de I+D en el desarrollo y obtención de un prototipo, y posteriormente de un dispositivo capaz de solventar los problemas actuales de Ejército.

6. Agradecimientos

El desarrollo del presente trabajo ha sido posible gracias a la colaboración de la empresa Líneas y Cables S.A.

Planes de Gestión Energética en Campamentos Militares - PGEMi

Martínez Jiménez, Amador[1], González Atance, Luis Carlos[2], García-Guiu López, Carlos María[3] y Ruiz Padillo, Diego Pablo[4,*]

[1] Instituto Tecnológico de Certificación Energética, Granada. Email: amador@itcea.es.

[2] Escuela Politécnica Superior del Ejército de Tierra, Madrid. Email: lgonata@oc.mde.es

[3] Dirección de Investigación, Doctrina, Orgánica y Materiales. MADOC. Granada. Centro Mixto UGR-MADOC. Email: cgarlop1@ et.mde.es

[4] Dpto. Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. Email: druiz@ugr.es.

***** Responsable del trabajo a efectos de comunicaciones; E-mail: druiz@ugr.es

---

Abstract: El presente artículo pretende hacer un resumen del proyecto de investigación llevado a cabo por el CEMIX, Centro Mixto Universidad de Granada - Mando de Adiestramiento y Doctrina, cuyo actividad consiste en el estudio y diseño de una metodología que permita saber cómo, cuándo, cuanto, quién y donde se usa la energía en campamentos militares y en qué manera puede afectar en su eficiencia y dependencia energética.

El objetivo fundamental de esta investigación es el diseño de un plan de gestión energética adaptado para la actividad de los Campamentos Militares. Los PGEMi (Planes de Gestión Energética para Campamentos Militares) pretenden definir una metodología que sirva para establecer una estructura y metodología de gestión y organización de los recursos energéticos, para que de forma armonizada, se pueda realizar un uso de la energía en función de la actividad militar del campamento.

Keywords: energía, eficiencia energética, gestión energética, combustibles fósiles, campamentos militares, operaciones militares

---

1. Introducción

La energía se ha convertido en una variable estratégica que ha de tenerse en cuenta para cada actuación a realizar, y toma un mayor peso en aquellas misiones en las que existe una mayor dificultad para el suministro de energía primaria.

Un ejemplo de ello son los campamentos militares, en los que en la gran mayoría de los casos no se podrá disponer de electricidad como energía primaria y tendremos que recurrir fuentes de procedencia fósil y renovable.

1.1. Fundamento

El Ministerio de Defensa a través de diferentes programas, dentro de su área de medio ambiente y de I+D, fomenta el ahorro energético y las medidas a llevar a cabo con el fin de mejorar el rendimiento energético de sus instalaciones. Estas medidas están fundamentalmente vinculadas a la realización de inversiones en activos para modernizar y mejorar los sistemas de generación energética.

El proyecto de investigación llevado a cabo por CEMIX, Centro Mixto Universidad de Granada - Mando de Adiestramiento y Doctrina, basa su trabajo en el estudio y diseño de una metodología que permita saber cómo, cuándo, cuanto, quién y donde se usa la energía en campamentos militares. De nada servirá realizar inversiones en instalaciones más eficientes, si después de ella no lográramos gestionar de forma adecuada la energía en función de su aplicación y necesidades.

1.2. Descripción

El objetivo fundamental de esta investigación es el diseño de un plan de gestión energética a nivel internacional, adaptado para la actividad de los Campamentos Militares. Los PGEMi (Planes de Gestión Energética para Campamentos Militares) pretenden definir una metodología que sirva para establecer una estructura y metodología de gestión y organización de los recursos energéticos, para que de forma armonizada se pueda realizar un uso de la energía en función de la actividad militar del campamento.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. Desarrollo

Los PGEMi son por tanto un conjunto de acciones técnicas y organizativas encaminadas a implementar una política energética y establecer objetivos, metas, y planes de acción que tengan en cuenta los requisitos operativos y la información relacionada con el uso significativo de la energía. Estas acciones pretenden determinar y definir:

1. La estructura energética del campamento militar.
2. La eficiencia energética de sus instalaciones durante su vida útil.
3. El consumo energético y su vinculación directa con la energía primaria utilizada.
4. El uso de sus instalaciones y su adecuación energética.
5. Seguimiento e incidencias en mantenimiento de instalaciones.

6. Las posibilidades de ahorro energético y mejora de la operatividad.
7. El plan de acción para las mejoras en gestión.
8. El plan de seguimiento de la actividad energético-militar.
9. Indicadores relativos y absolutos de seguimiento para la operatividad militar.

La gestión se plantea por tanto como una herramienta preventiva y predictiva para el mantenimiento global de las instalaciones y la actividad militar, que redundará en una mayor eficiencia de la energía, organización y competitividad, la cual tendrá en cuenta la compatibilidad con otros sistemas de gestión internacional como son: ISO 9001 , ISO 50001 o ISO 14001.

2.2. Metodología

La metodología propuesta para la implantación de un PGEMi se estructura en las siguientes fases:

2.2.1. Análisis energético de campamentos

Consiste en una auditoría inicial a través de la cual se ha analizado la estructura de campamentos militares con la finalidad de conocer cuál es la demanda real de este tipo de construcciones y cómo se distribuye la energía, en función de la actividad realizada y sus objetivos militares.

En este apartado es necesario contar con la implicación y participación de todos los mandos necesarios para la puesta en marcha y futuro mantenimiento del Plan.

2.2.2. Figura del Coordinador Energético Militar (CEMi)

Esta figura tiene como misión la tarea de organizar todo aquello que pueda tener una implicación con el consumo de energía primaria en los campamentos, así como de detectar necesidades y llevar la supervisión del correcto mantenimiento que deban tener las instalaciones implicadas. Servirá de enlace para la comunicación de objetivos y demandas por parte de la estructura militar.

2.2.3. Formación energética militar

La formación en materia energética se hace fundamental para que los mandos encargados de la gestión y los militares de campo, tengan un mayor conocimiento sobre el tipo de instalaciones y su vinculación directa en la eficiencia energética, además de tener una mayor concienciación en la organización y uso de las mismas.

2.2.4. Diseño del Plan de Gestión PGEMi propiamente dicho.

Esta es la fase en la que se plasma todo el trabajo en un plan que sea lo más flexible y operativo posible. Su estructura contempla las siguientes partes:

1. *Política de gestión energética del campamento*.- Constituye el punto de partida del plan y en él se define el compromiso por la dirección, los objetivos y los recursos necesarios para llevarlos a cabo.

2. *Análisis de Situación en Campamentos.*- Esta es la parte en la que se caracterizan todos los sistemas y usos energéticos del campamento.

3. *Plan de Acción Energética en Campamentos*- Una vez definida la situación inicial y los objetivos a cumplir, se diseña un plan de acción en el que se debe cuantificar el tiempo, recursos humanos, inversión, mantenimiento y plazos de ejecución de cada una de las medidas propuestas, así como su viabilidad y prioridad de ejecución.

4. *Implementación, Operación y Contabilización.*- Contando con las herramientas adecuadas, se deberá de llevar al día la monitorización energética y el estado de mantenimiento de instalaciones. En este apartado se debe de supervisar todo lo relacionado con los hitos establecidos en el apartado anterior.

5. *Plan de Seguimiento Energético del campamento*.- Se definen unos indicadores relativos y absolutos sobre la energía y la actividad militar en el campamento. Estos deben de ser realistas con la situación y actividad realizada.

6. Revisión de Objetivos.- Se hace en periodos anuales y debe ser realizada por el CEMi y sus mandos superiores con capacidad y responsabilidad activa en la dirección de la Política Energética Militar. En esta fase se revisa el estado energético actual, comparación de indicadores y estado de consecución de objetivos. Es el momento en el que se plantearán nuevas acciones para el ciclo siguiente y se corregirán las deficiencias detectadas.

Para el diseño y mantenimiento del PGEMi, se ha diseñado una herramienta informática que permite definir las instalaciones de actividad, zonas de uso, demanda y generación energética. De esta forma podemos llevar y gestionar de forma ágil y dinámica todas las acciones a llevar a cabo en cuanto a mantenimiento y seguimiento, así como la revisión de indicadores establecidos. Llevar una actualización diaria permitirá por ejemplo:

1. Definir las características de las zonas de uso.

2. Definir la demanda energética: electricidad, calefacción, o climatización.

3. Definir técnicamente los sistemas de generación energética. Analizar el grado de implantación de energías alternativas.

4. Determinación del consumo energético.

5. Determinar la energía primaria (gasoil por ejemplo) que se necesitaría para dar servicios a la demanda establecida y llevar una previsión del gasto en un espacio temporal dado.

6. Posibilitar la toma de decisiones en cuanto a generación energética centralizada o distribuida.

7. Evaluar la viabilidad de las medidas propuestas.

8. Realizar el seguimiento de indicadores relacionados con el PGEMi.

La estructura general del plan energético propuesto se esquematiza en la siguiente figura:

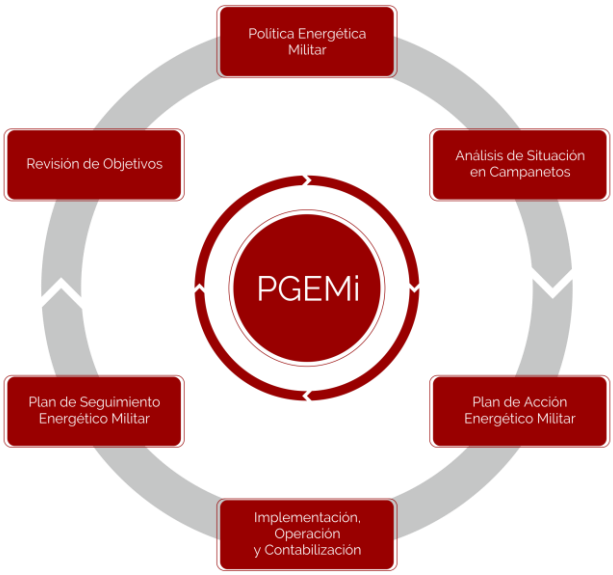


Figura1. Estructura de un Plan de Gestión Militar (PGEMi)

3. Resultados y Discusión

La implantación de este plan en campamentos militares permite obtener una serie de ventajas que podemos resumir en tres grandes ejes:

3.1. Energía primaria

Se pueden caracterizar los sistemas de generación eléctrica centralizada y distribuida de los que se disponen en un campamento militar tipo. Esto permitirá una adecuada gestión de la energía en función de la demanda y el stock de combustible disponible con el fin de mejorar la eficiencia del campamento.

3.2. Tipología de la actividad

Se pueden identificar las zonas de trabajo habituales y por lo tanto la necesidad energética de cada una de ellas. Esto permitirá llevar una correcta gestión entre oferta y demanda energética sin menoscabar la operatividad de la actividad militar.

3.3. Beneficios

Se pueden resumir en los siguientes:

1. Disminución de los costes energéticos.
2. Optimización de los espacios en función del uso.
3. La eficiencia energética en la gestión mejorará la competitividad de la actividad militar.

4. En un hipotético conflicto militar, será una ventaja pues se dispondría de unos recursos limitados durante mayor tiempo.
5. El coste en inversiones es prácticamente nulo.
6. Invertir en gestión permite puede llegar a alcanzar ahorros de hasta el 20-30% del total de energía térmica y eléctrica demanda, con "pay-back" inferiores a 5 años y TIR superiores al 5% para intervalos de 5 años.

4. Conclusiones

El objetivo fundamental del proyecto responde a la cuestión siguiente: ¿Cómo se podría mejorar la eficiencia energética en campamentos? Se enfatiza el hecho de que se trata de elementos no permanentes, a los que no son aplicables estrictamente los planes y protocolos conocidos para edificios o edificaciones de carácter permanente. Se parte de una premisa básica: Siempre se tendrá en cuenta que la operatividad de las unidades nunca se puede ver mermada.

Para cumplimentar ese objetivo, el proyecto busca generar un plan de gestión energética para campamentos. Este plan de gestión energética se fundamenta en una serie de conclusiones que se soportan sobre tres ejes:

- Diseño/gestión energética de campamentos
- Estudio de materiales para un uso eficiente de la energía
- Formación/concienciación del uso de la energía

A partir de este triple eje y de los datos obtenidos se busca plasmar en un documento de pautas sobre la eficiencia energética. La metodología de recogida de información se basa en un estudio in situ del uso de la energía en campamentos militares en dos fases: Fase A: a partir de la documentación seleccionada y Fase B: a partir de visita a una unidad especialista en montaje de campamentos.

La investigación desarrollada ha permitido efectuar una aproximación al problema de la mejora en la eficiencia en la gestión energética en campamentos militares así como realizar un avance en la mejora de las prácticas y herramienta operativa para alcanzar una ventaja relativa en la economía de medios, libertad de acción de las unidades, reducción de la huella logística y en general, aumentar la sostenibilidad en las operaciones.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado a través del proyecto PIN 46 Plan de gestión energética en campamentos militares (PGEMi) del CENTRO MIXTO UGR-MADOC (CEMIX: Centro Mixto Universidad de Granada - Mando de Adiestramiento y Doctrina). Los autores también desean expresar su agradecimiento al Banco de Santander y a la Unidad de castrametación REI 11, Acuartelamiento General Arroquia de Salamanca por su disponibilidad y ayuda en la obtención de datos.

Estudio de la instalación de una bomba de calor hidrotérmica en el cuartel Francisco Moreno (ENM)

Lareo, Guillermo [1]*, Díaz, Eduardo [2], Rey, Guillermo [1] y Álvarez, Miguel A. [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa - ENM. glareo@cud.uvigo.es (G. L.C.); guillermo.rey@cud.uvigo.es (G.R.G.); alvarezfeijoo@cud.uvigo.es (M.A.A.F);
[2] Armada Española - ENM. edudiazdelrio@gmail.com (E.D.D.R.O)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; glareo@cud.uvigo.es (G.L.C.)

Abstract: Nos referiremos en este trabajo al estudio de una alternativa de climatización del Cuartel Francisco Moreno, ubicado en la Escuela Naval Militar (ENM) de Marín (Pontevedra), con una capacidad para 352 personas, destinado a residencia de alumnos. Actualmente, sus instalaciones térmicas se basan en una instalación convencional basada en calderas de gas de baja temperatura, destinada a satisfacer tanto la demanda de agua caliente sanitaria (ACS) como de calefacción. La zona climática en la que se ubica la ENM (Marín, Pontevedra) unido a que en periodo estival la residencia se encuentra vacía, no hacen necesario plantear necesidades de refrigeración. Se pretende mostrar y justificar, una vez analizadas las particularidades del edificio objeto de estudio, la mejora en la eficiencia energética de la instalación mediante tecnología basada en la utilización de bombas de calor hidrotérmicas, que emplean el agua del mar como foco de intercambio en lugar del aire circundante (que es el habitualmente utilizado como foco), dada la cercanía de dicho recurso y las ventajas que este hecho aporta.

Keywords: energía; hidrotermia; geotermia; bomba de calor; eficiencia; cuartel

1 Introducción

La obtención de unas condiciones ambientales de confort y la satisfacción de la demanda de agua caliente sanitaria (ACS) constituyen las necesidades energéticas básicas que se deben satisfacer en edificios de uso residencial.

Este planteamiento básico se resuelve de forma mayoritaria mediante sistemas clásicos, siendo los más habituales aquellos basados en combustibles fósiles (calderas de gas o gasóleo, con almacenamiento de agua para ACS y calefacción con radiadores para las necesidades de calefacción) y/o sistemas de acondicionamiento basados en bombas de calor aire/agua para el acondicionamiento de estancias.

En cualquiera de estos casos, el impacto económico del consumo energético correspondiente a estos equipos se ha ido incrementando de manera importante durante los últimos años, paralelamente al incremento del precio tanto de los combustibles fósiles como de la electricidad.

Frecuentemente, la antigüedad y el estado de conservación de elementos como la envolvente térmica en general y de puertas y ventanas, en particular, o de las instalaciones térmicas, tanto de generación como de distribución, llevan asociadas pérdidas que no hacen sino repercutir negativamente en la problemática planteada.

Las actuaciones encaminadas a reducir la demanda y el consiguiente gasto energético se pueden plantear en diversas direcciones, priorizando aquellas que proporcionan un retorno de la inversión más ventajoso dentro del abanico de posibilidades que cada instalación permite plantear.

Por otro lado, las últimas décadas han traído consigo la aparición de mejoras de todo tipo en sistemas de acondicionamiento. Por citar alguno de ellos, en el caso de los sistemas convencionales, el incremento de rendimiento derivado del empleo de calderas de baja temperatura o condensación, o la irrupción e implantación de sistemas de generación térmica basados en energías renovables, como la biomasa (pellet, briquetas) o la energía solar con usos térmicos, cuya instalación ya es obligatoria en los últimos años en edificios de nueva construcción.

1.1 Cuartel Francisco Moreno

El cuartel de alumnos Almirante Francisco Moreno, inaugurado en 1977, se ubica en la cara noroeste de la Escuela Naval Militar de Marín Se trata de un cuartel de alumnos de tres plantas [3], [4]. (una planta baja y dos superiores en donde se sitúan los dormitorios, los estudios y los baños) con capacidad para 352 personas. Consta además de una biblioteca y una sala de judo, que dan servicio a todos los alumnos del recinto militar. El edificio está orientado al noreste.

Consta de dos módulos simétricos (zonas 1 y 2) de 2000 m^2, separados por dos patios centrales descubiertos y un módulo central “hall” de 200 m^2, destinado a zonas comunes y acceso principal.

La planta baja consta de tres zonas principales: cuerpo central, vestíbulo-recepción, hall y escalera principal. En la cara sur se ubica la biblioteca, la sala de calderas y cuarto de mantenimiento en la cara oeste, un gimnasio/tatami y un patio cubierto en la cara norte. Asimismo en la planta baja figuran 2 zonas ajardinadas una abierta de acceso y otra en el patio interior con bancos y zona de estar. El acceso principal al edificio se encuentra en su cara este, a través de uno de sus patios abiertos.

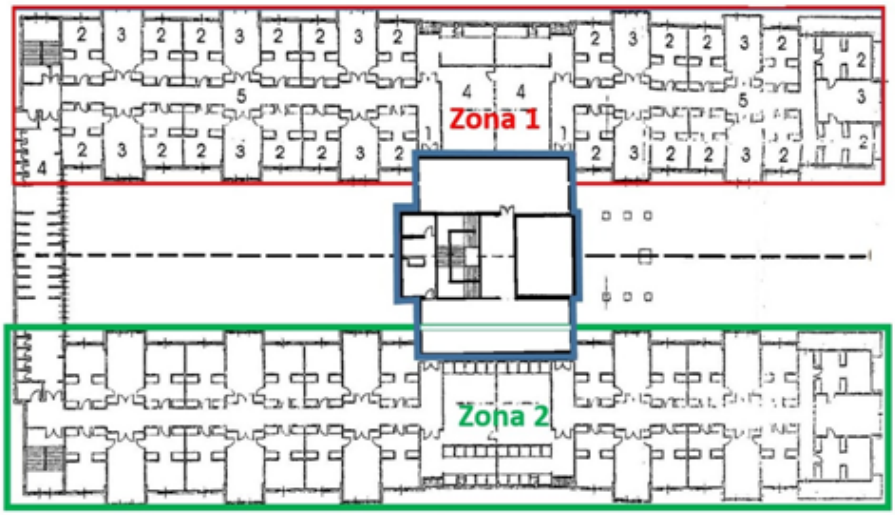


Figura 1. Zonificación Cuartel Francisco Moreno. Escuela Naval Militar (Marín)

Cada una de las plantas está compuesta por 22 módulos para 8 alumnos.

En cuanto a las características constructivas, los muros son de ladrillo hueco doble a panderete asentada con mortero de cemento y arena de rio, en el interior separados por una cámara de aire de 5cm de un tabicón de ladrillo hueco doble sentado con mortero de cemento y arena de rio. El exterior está recubierto con mortero de cemento. En las cámaras de aire existe un aislamiento con planchas rígidas de espuma de poliestireno extruido de 40mm de grosor.

Las ventanas de las habitaciones y los estudios son ventanas simples, con marco de aluminio sobre dos hojas correderas.

Por último, la cubierta está formada por teja cerámica curva sobe paneles de fibrocemento y tabique palomero.

2 Bombas de calor y bombas de calor geotérmicas

Una bomba de calor es una máquina capaz de transferir calor desde un foco frío a otro caliente utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña pudiendo generar una producción térmica que puede cuadruplicar el gasto eléctrico.

El aire (aerotermia), el subsuelo (geotermia) o el agua (hidrotermia) son distintos tipos de focos que las bombas de calor utilizan para extraer energía calorífica, incluso cuando estos se encuentran a una temperatura inferior a la necesaria.

La peculiaridad de estos sistemas es que son capaces de extraer el calor de un medio a una determinada temperatura para cederlo a otro con una temperatura superior, funcionando de un modo “contrario” al natural. De este modo “enfriaremos” soltando al exterior el calor de una estancia en verano o calentaremos extrayendo calor del exterior en invierno para cederlo al local a calefactar, por ejemplo.

La aplicación en climatización es la siguiente:

- En calefacción (invierno): El foco frío es el exterior, y el foco caliente es el interior del edificio o casa a calentar (se extrae calor del exterior y se introduce en el interior)
- En refrigeración (verano): El foco frío es el interior, y el foco caliente es el exterior (se extrae calor del interior y se expulsa al exterior para bajar la temperatura del local).

La gran mayoría de las bombas de calor basan su funcionamiento en el ciclo termodinámico frigorífico de compresión expansión, siendo sus componentes básicos el compresor, el condensador, la válvula de expansión y el evaporador.

Las bombas de calor geotérmicas o GHPs (Geotermal Heat Pumps) por sus siglas en inglés llevan en uso comercial desde la década de 1940. Esta técnica aprovecha la temperatura estable de la tierra o del agua en vez de utilizar el intercambio con el aire. Esto permite alcanzar eficiencias altas (300% hasta 600%) en las noches más frías de invierno o calurosas de verano en donde el suelo sigue manteniendo su temperatura.

Nos referiremos en todo momento en este trabajo al aprovechamiento denominado de baja temperatura, en el rango de 30 a 90℃, dado que está enfocado a sistemas de acondicionamiento de aire y agua caliente sanitaria.

2.1 Bomba de calor hidrotérmica

En el caso de los sistemas hidrotérmicos, se utiliza como foco el agua, en este caso agua del mar, dada su disponibilidad en las cercanías de la instalación objeto de estudio, y que ofrece una gran estabilidad térmica a lo largo del año, además de un calor específico más elevado que otros fluidos utilizados habitualmente como el aire, por lo que su capacidad para el intercambio de calor se ve incrementada [3].

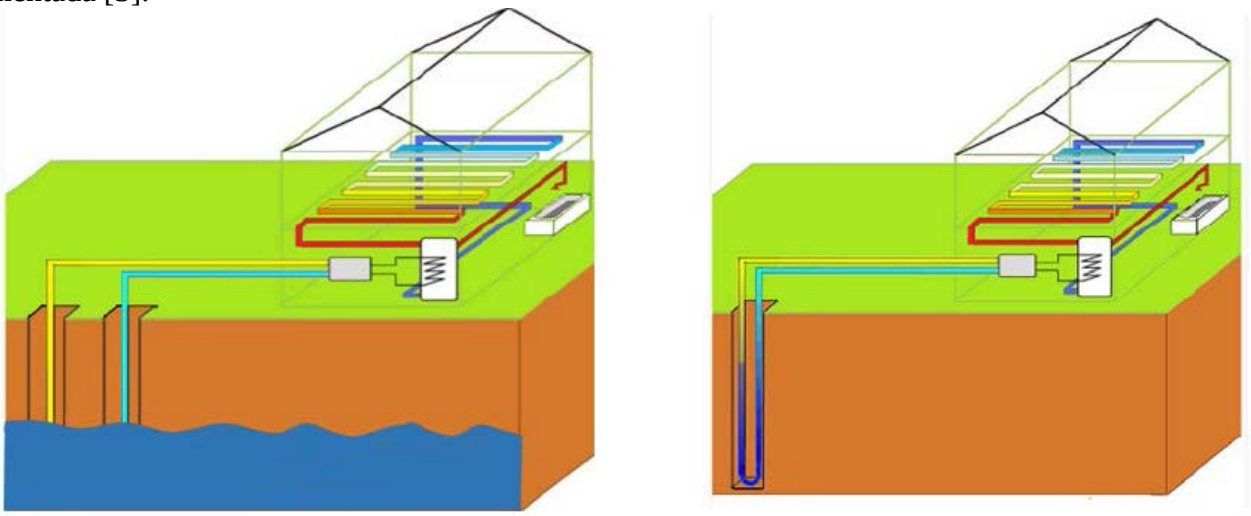


Figura 2. Esquema básico instalación hidrotérmica (izq.) y geotérmica (der.).[3]

Sus principales ventajas son las elevadas eficiencias en comparación con sistemas de climatización convencionales basados en combustibles fósiles o las bombas de calor con mayor grado de implantación, como son las bombas de calor aerotérmicas (Figura 3).

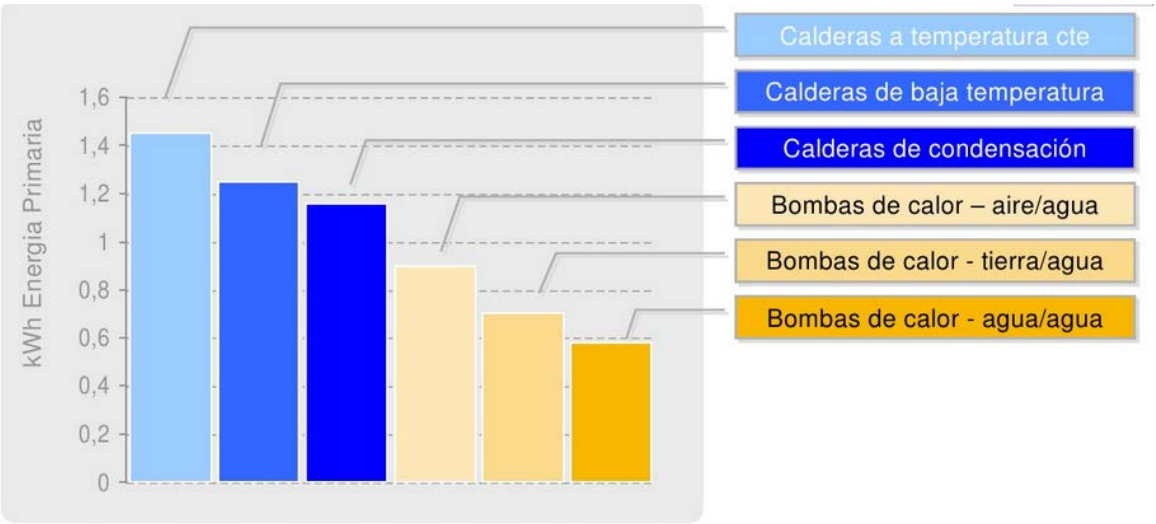


Figura 3. Consumo para generación de 1 kWh. Fuente: BDH (Bundesindustrieverband Deutschland Haus)

Aunque requieren unas mayores inversiones iniciales, proporcionan períodos de amortización muy razonables, y es por ello que las últimas décadas han visto como su implantación ha ido aumentando [1] [4].

El caso de las bombas de calor hidrotérmicas es especialmente significativo, pues la disponibilidad del recurso en muchos casos no es posible, lo que repercute en la existencia de muy pocas instalaciones en España.

3 Metodología

3.1 Estudio de las necesidades energéticas de la instalación

A partir de la información disponible, utilizando el programa CE3X, se han estimado las necesidades energéticas de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria, que de forma esquemática se puede observar en la Figura 4.

Se entienden como condiciones exteriores e interiores las siguientes para la ubicación de la instalación en Pontevedra:

- Exteriores:
  - Altitud
  - Latitud
  - Viento dominante
  - Valores climatológicos normales
  - Radiación solar
- Interiores:
  - Tª interior para refrigeración mínima 26ºC
  - Tª interior máxima para calefacción de 21ºC
  - Carga debida a iluminación
- Régimen de ocupación

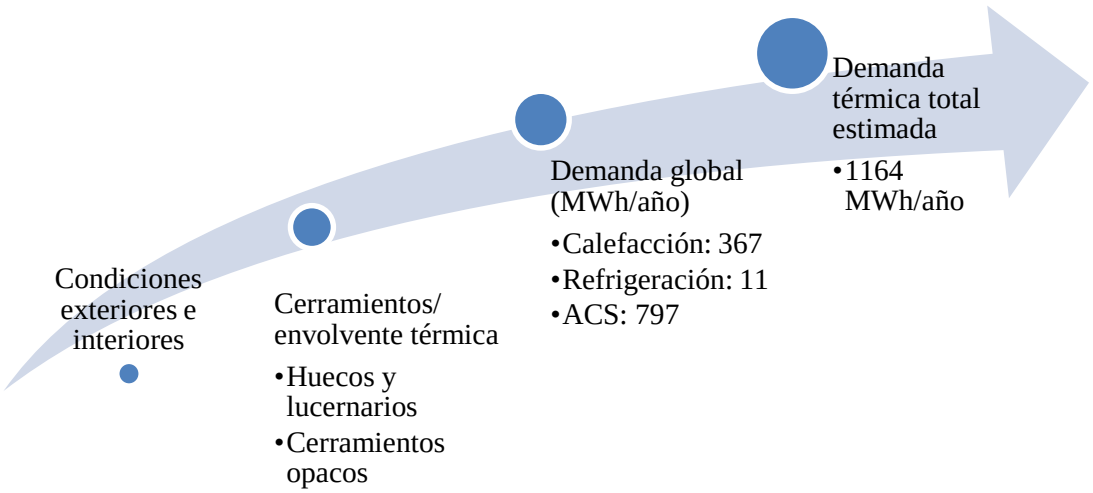


Figura 4. Parámetros para estimación demanda energética

3.2 Fases de un estudio de bomba de calor hidrotérmica

La Figura 5 muestra de una forma sintética el proceso llevado a cabo para el dimensionado básico de una instalación por bomba de calor.

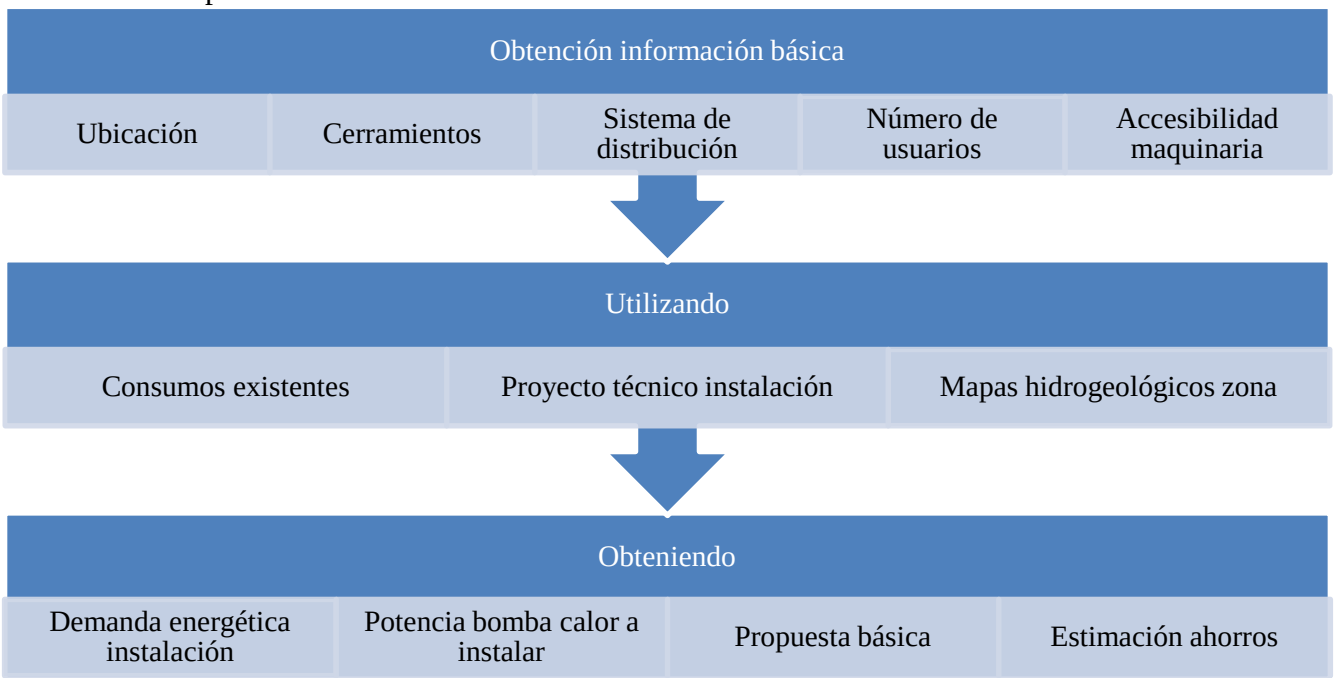


Figura 5. Esquema básico para el dimensionado de una bomba de calor

4 Resultados y Discusión

El análisis de los sistemas de climatización actuales con mayor eficiencia y la disponibilidad del agua (en este caso del mar) en las cercanías han llevado a la evaluación y posterior selección de una instalación basada en el aprovechamiento mediante bomba de calor hidrotérmica. En concreto, y dado que los sistemas de intercambio directos o abiertos generan un mayor impacto en el medio, así como mayores

trabas administrativas y/o de ejecución del proyecto, se ha optado por un sistema indirecto de intercambio o cerrado, situando un intercambiador en el mar. El resultado es un sistema sencillo a la vez de gran fiabilidad (Figura 6).

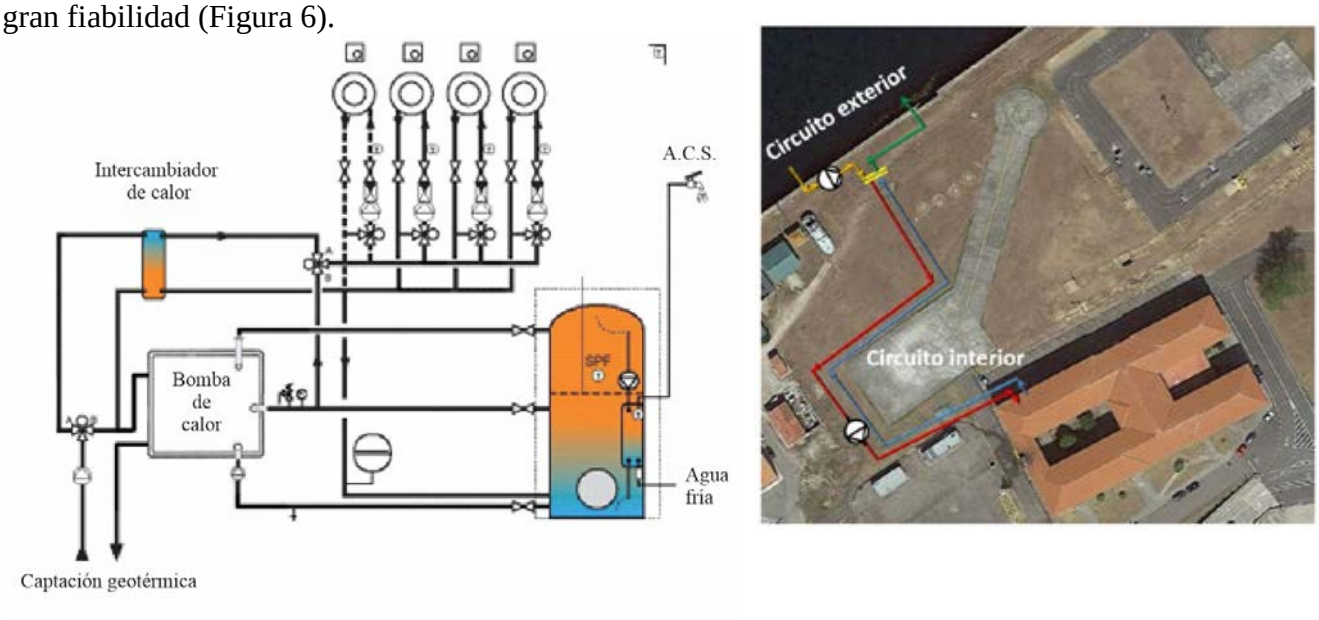


Figura 6. Propuesta de instalación.

4.1 Selección de la bomba de calor hidrotérmica

Aunque la singularidad de cada instalación requiere un tratamiento independiente, se puede establecer una metodología para la selección de la bomba de calor, de acuerdo a lo expresado en la Figura 7.

Calefacción

- Superficie total a calefactar ; elementos disipadores: radiadores; Cargas térmicas del edificio;Zona climática: C1; Severidad climática en invierno: C
- Horas de calefacción estimadas: 1260 h

Base de cálculo: 90 W/m^2

Dimensionamiento de la captación (NORMA VDI 4640)

- Datos de partida
  - Necesidades térmicas y COP de la bomba de calor
  - Caudal volumétrico de la bomba de calor

Propuesta: 4 Bombas de calor geotérmicas TERRA MAX 90 HGL

- Potencia entregada (según EN 14511): 324 kW (4 Uds de 81,1kW)
- COP (según EN 14511): 3,8

Figura 7. Dimensionamiento básico de la instalación propuesta

4.2 Dimensionamiento básico de la captación

Tal y como establece la directriz 4640 de la norma VDI alemana, para el dimensionado de la captación se determina la potencia del evaporador del siguiente modo:

$$Potencia\ Evaporador = \frac{Potencia\ calefacción\ \cdot (COP - 1)}{COP} = \frac{324{,}4kW \cdot (3{,}8 - 1)}{3{,}8} = 239\ kW$$

Teniendo en cuenta el número de horas de utilización anuales y las características del agua de mar en la zona de intercambio, se obtiene el dimensionado básico del intercambiador necesario.

4.3 Estudio económico básico

El análisis siguiente se realiza referido al consumo del compresor de la bomba de calor hidrotérmica junto al de la bomba de circulación del fluido caloportador del sistema hidrotérmico.

Indicador	**Ud.**	**Promedio anual**
COP estacional		3,65
Consumo eléctrico	kWh	85200
Coste eléctrico	€	9370
Emisiones CO_2	Kg CO_2	23005

Tabla 1. Indicadores estacionales del sistema de bomba de calor hidrotérmica

	Bomba de calor hidrotérmica	**Ahorros frente a sistema anterior**
Energía consumida	85200	242640
Coste económico	9370	19215
Inversión	120000	
Amortización simple	6,24 años	

Tabla 2. Datos globales y período de amortización simple

5 Conclusiones

- Se trata de aplicar de un modo innovador una tecnología existente como las bombas de calor, no de no se trata de una tecnología innovadora.
- Proporciona un rendimiento superior a las bombas de calor aerotérmicas, sin la limitación por temperatura del foco exterior.
- Elevada inversión inicial.
- Nivel de temperatura óptimo para sistemas de disipación de baja temperatura (suelo radiante, fan-coils), no para radiadores.
- Problemas de temperatura durante los ciclos de limpieza anti-legionella según RD865/2003 (no domésticos).
- Se pretende que pueda servir de base para un planteamiento de una calefacción de distrito o District Heating en la ENM de Marín.

Referencias

1. European Commision. *Heat Pumps Barometer*. *EurObserv'ER,* 2009 y 2013**.**
2. Diario Oficial de la Unión Europea. *Directiva Europea 2009/28/CE relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables*. Definiciones (art.2). L 140/27
3. Díaz del Río Oleaga, Eduardo. *Estudio de alternativas de climatización en el cuartel Francisco Moreno*. ENM, Trabajo Fin de Grado. 2015.
4. Piñeiro Paredes, J.J., *Certificación Energética del Cuartel "Almirante Francisco Moreno*. ENM, Trabajo Fin de Grado. 2015.
5. European Committee for standardization. *Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling*. 2007.
6. European Heat Pump Association. *European Heat Pump Market and Statistics Report*. 2014.

Utilización de sistemas de trigeneración en BUI

Rey, Guillermo [1]*, Ulloa, Carlos [2], Cacabelos, Antón[3] y González, Arturo [4]

[1] Centro Universitario de la Defensa - ENM. guillermo.rey@cud.uvigo.es (G. Rey)
[2] Centro Universitario de la Defensa - ENM. carlos.ulloa@cud.uvigo.es (C. Ulloa)
[3] Centro Universitario de la Defensa - ENM. acacabelos@cud.uvigo.es (A. Cacabelos)
[4] Centro Universitario de la Defensa - ENM. arturogg@cud.uvigo.es (A. Gonzalez)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: guillermo.rey@cud.uvigo.es (G. Rey);

Abstract: La creciente preocupación por la mejora de la eficiencia térmica de los Buques Unidades e Instalaciones (BUI) de la Armada supone, entre otros, el análisis, parametrización y simulación de alternativas energéticas, entre las que destacan, los sistemas de cogeneración/trigeneración. La gran ventaja de la cogeneración (producción combinada de calor y electricidad) y la trigeneración (electricidad, calor y frío), frente a otros procedimientos, es su mayor eficiencia energética, puesto que se aprovecha, tanto el calor, como la energía mecánica o eléctrica, en un único proceso. En concreto, el Ministerio de Defensa ha venido implementando iniciativas y proyectos con plantas de cogeneración y trigeneración, como es el caso del Hospital Central de la Defensa (Madrid). El estudio de viabilidad, previo a la instalación de una planta de cogeneración/trigeneración, es central para el posterior desarrollo del proyecto. En este sentido, los programas de simulación de sistemas energéticos complejos (e.g. TRNSYS) constituyen una herramienta idónea para el análisis de los sistemas antes de su implantación. En este trabajo se estudia la posibilidad de utilizar sistemas de microtrigeneración para cubrir las necesidades energéticas en un destacamento de Infantería de Marina. Para ello, se han analizado las últimas misiones desarrolladas en función de la ubicación y periodo temporal de las mismas, así como del tipo de despliegue (i.e. número de efectivos y equipamiento), lo que ha permitido conocer las posibilidades que este tipo de tecnologías pueden aportar a las capacidades operativas de la Armada.

Keywords: trigeneración; trnsys

---

1. Introducción

1.1. Necesidades energéticas en los BUI

En este trabajo se estudia la posibilidad de utilizar sistemas de trigeneración para cubrir las necesidades energéticas en un destacamento de Infantería de Marina. Las misiones realizadas por dicho cuerpo de la Armada Española utilizan, de manera habitual, equipos generadores con los que cubrir sus necesidades de electricidad. Sin embargo, dichos equipos no realizan aprovechamiento alguno de la energía térmica que, de manera inevitable, se genera durante el proceso. Las misiones de la infantería de marina son realizadas en condiciones climáticas diversas debido a su propia naturaleza (son realizadas, de manera general, fuera del territorio nacional). Sirvan de ejemplo dos de las últimas misiones desarrolladas por la infantería de marina en el exterior, en concreto, la denominada Fuerza Provisional de Naciones Unidas en el Líbano ((FPNUL), en la cual el primer contingente estuvo formado por la Fuerza Expedicionaria de Infantería de Marina que desembarcó en las playas lavanderas el 15 de septiembre de 2006 y permaneció casi 2 meses y EUFOR ALTHEA en Bosnia-Herzegovina desde 2007 hasta 2010 participaron contingentes de Infantería de Marina de unos 150 efectivos con base en Sarajevo al mando de un Batallón multinacional.

El estudio de viabilidad, previo a la instalación de una planta de cogeneración/trigeneración, es central para el posterior desarrollo del proyecto. En este sentido, los programas de simulación de sistemas energéticos complejos (e.g. TRNSYS) constituyen una herramienta idónea para el análisis de los sistemas antes de su implantación.

1.2. Sistemas de Trigeneración

Con los avances técnicos la cogeneración o CHP (Combining Heating and Power) puede ofrecer una alternativa económica y flexible a los sistemas de generación tradicionales de energía. Estudios anteriores [1-3] han demostrado que la cogeneración reduce el consumo de energía y las emisiones (principalmente nitrógeno y óxidos de azufre). La limitación de estas tecnologías proviene de las variaciones en la demanda térmica y eléctrica.

Angrisani et al han analizado un sistema micro-CHP de gas en diferentes construcciones, comparando los resultados en diferentes localizaciones dentro de Italia [4] y resaltando los beneficios potenciales de esta tecnología. Mancarella and Chicco mostraron ejemplos específicos sobre la efectividad de los sistemas de trigeneración en la reducción de emisiones contaminantes.

Christopher Horvath et al estudian la importancia del acondicionamiento del aire en operaciones militares donde las temperaturas, en algunos casos superiores a los 45ºC, convierten en imprescindible la utilización de sistemas de refrigeración. Además, muestran como la solución actual, basada en sistemas de compresión de vapor en combinación con generadores diésel representan una solución altamente ineficiente además de necesitar de un suministro constante de gas, suministro que no siempre puede ser asegurado a través de territorio hostil [5]. El coste asociado a la climatización por parte de los ejércitos se cifra en más de 20.000 millones de dólares al año lo que indica la importancia del estudio de sistemas alternativos, dentro de los que destacan los sistemas de cogeneración/trigeneración como los propuestos.

El sistema de trigeneración utilizado en este estudio ha sido diseñado para producir electricidad, agua caliente sanitaria (ACS), calor y frío para una misión de la infantería de marina en la que se establezca una base temporal en un edificio tipo cedido por el país de destino.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. Planta de trigeneración tipo

La planta de trigeneración está compuesta, principalmente, por: un motor de combustión interna (ICE), un alternador, un inversor, un tanque de almacenamiento de agua con dos intercambiadores de calor y una bomba de calor con función inverter.

El equipamiento propuesto adopta una configuración compacta que permite su rápido traslado e instalación, resultando idónea para su utilización en las unidades de infantería de marina.

En la siguiente figura (figura 1) se puede observar el aspecto del prototipo propuesto. Dicho prototipo puede ser escalado a diferentes capacidades y potencias disponibles.



Figura 1. Prototipo propuesto.

El sistema permite, mediante las variaciones de régimen de giro del motor, su adaptación a las demandas cambiantes, tanto térmicas como eléctricas. Esto es especialmente útil cuando la bomba de calor está asumiendo las demandas de frío o calor.

La bomba de calor incluye un intercambiador de placas, dos fancoils, dos válvulas de expansión y un compresor. En la figura 2 se representa un esquema de la planta y de las principales conexiones entre los elementos que la componen.

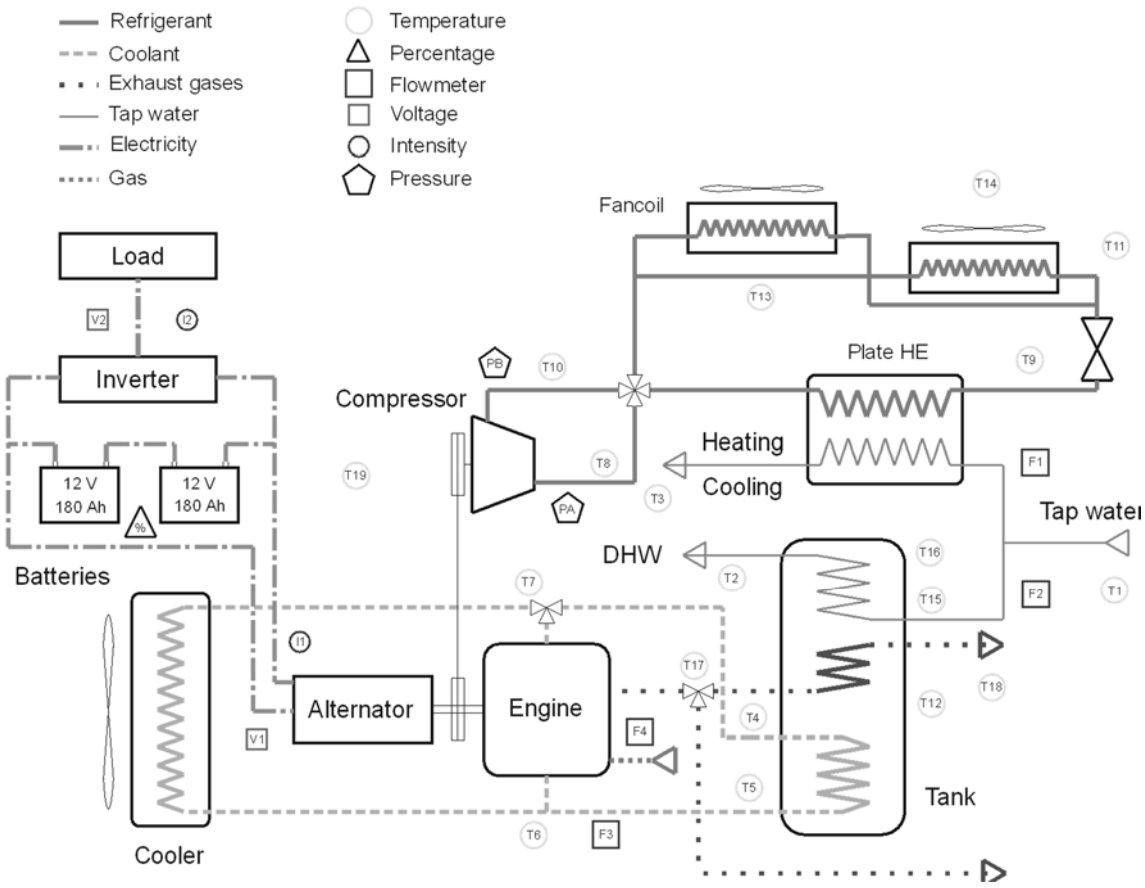


Figura 2. Esquema de la planta de trigeneración.

En la siguiente figura (figura 3), se muestra el esquema lógico de funcionamiento. La planta arrancará o parará en función de las demandas de ACS, electricidad o de calor y/o frío.

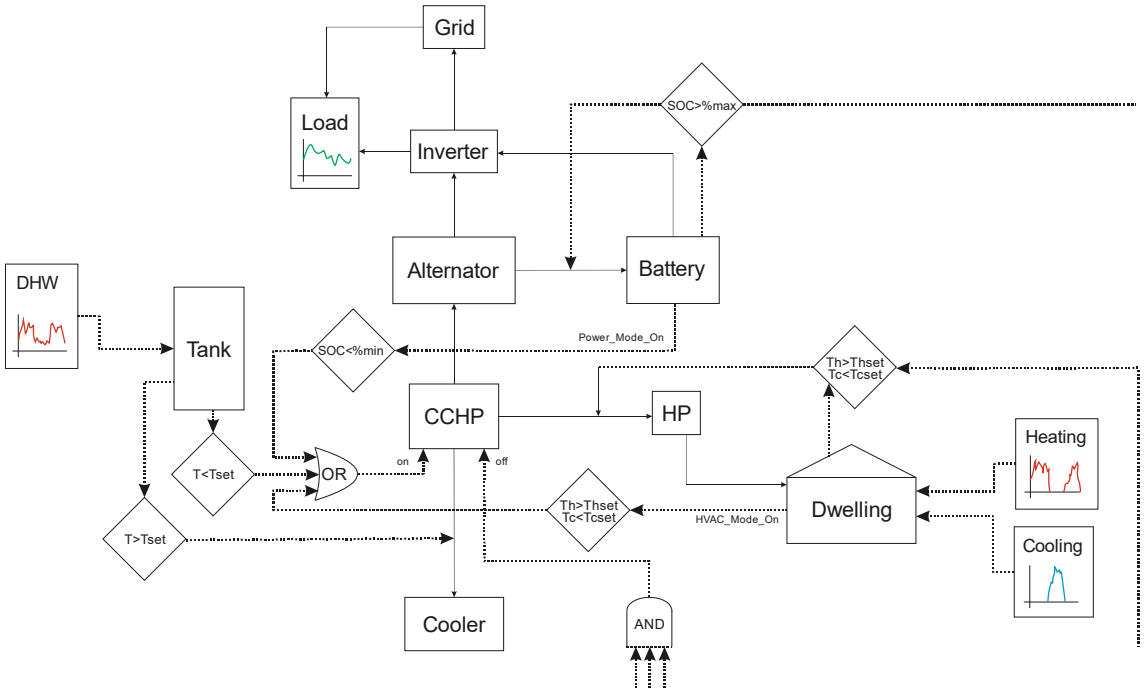


Figura 3. Esquema lógico de funcionamiento.

2.2. Simulación de sistemas dinámicos

Para la aplicación de los modelos propuestos y realizar la simulación del comportamiento del sistema micro-CHP en estado estacionario en distintas ubicaciones en viviendas móviles se emplea el software TRNSYS (Thermal Energy System Specialists, LLC).

TRNSYS es un entorno de simulación transitoria de sistemas térmicos muy completo y escalable. Su desarrollo comenzó en el Laboratorio de Energía Solar (Solar Energy Laboratory) de la universidad de Wisconsin (USA) en el año 1974 y desde entonces se ha desarrollado de forma ininterrumpida. La utilización del software TRNSYS está muy extendida entre ingenieros e investigadores de todo el mundo para la validación nuevos conceptos energéticos, diseño de edificios e instalaciones, estrategias de control, comportamiento de ocupantes, sistemas de energías renovables, etc.

Una de las principales ventajas de TRNSYS es su estructura modular abierta, que facilita la configuración de sistemas muy diferentes. Los componentes del programa (types) son independientes y se conectan unos con otros mediante entradas y salidas con el objeto de resolver una determinada tarea. Por ejemplo, para la simulación de las edificaciones en distintas ubicaciones se utilizarán varios componentes estándar como: un depósito de inercia (storage tank), unas baterías (battery), un radiador (radiator), etc. Los resultados de la simulación dependen de las cargas térmicas que varían con el tiempo (debido a las condiciones climatológicas), las demandas térmicas y eléctricas, las condiciones de confort, etc.

TRNSYS está programado en Fortran y el código fuente y los componentes están disponibles para una amplia comunidad de usuarios. Esto facilita la modificación o ampliación de componentes existentes para hacer que cumplan con unas necesidades concretas. Esta flexibilidad permite diseñar sistemas térmicos de muchas clases y estudiarlos en profundidad. Para el diseño de los componentes de TRNSYS se requiere que el modelo matemático utilizado se adapte al funcionamiento del sistema de la forma más realista posible.

TRNSYS distingue entre entradas y parámetros. Las primeras pueden ser dependientes del tiempo y los segundos son constantes en toda la simulación. Todas las entradas y los parámetros deben tener un valor dado, ya sea una constante a través de la simulación o una salida proveniente de otro componente. La salida es el resultado de los cálculos internos en el módulo de componente y se utiliza como entrada en otro componente. Cada módulo se define por un número de propiedades que se dan en los parámetros. Para un depósito de inercia estos parámetros pueden ser el tamaño, número de salidas, etc. En TRNSYS, los componentes se calculan en subrutinas del programa principal y se resuelven por separado y de forma secuencial. Se calculan una después de la otra y esta es una diferencia con otros programas de simulación basados en componentes en los que todas las ecuaciones se resuelven simultáneamente. En TRNSYS, el resultado de la salida de un componente se introduce en el componente siguiente. Si alguna entrada no se ha calculado como salida todavía en el time-step actual, se utiliza el valor correspondiente del time-step anterior. Si los componentes forman un bucle, donde la entrada de al menos un componente depende de la salida del mismo componente, las ecuaciones se resuelven por iteración. El usuario define para estos casos un valor límite de tolerancia para la convergencia así como el máximo número de iteraciones

y la exactitud de los resultados del cálculo. El proceso continúa hasta que todos los componentes y bucles se han completado. Si un bucle no está convergiendo dentro de los límites de tolerancia, se guarda el último valor calculado y se muestra un aviso. Si en una simulación se producen demasiados avisos se puede decir que ha fallado.

Las tolerancias de convergencia influyen en la consistencia de los resultados dentro de un bucle y también los balances de energía. Unos márgenes de tolerancia más estrechos conducen a un resultado más consistente, con pequeños errores en los balances de energía, pero por otro lado requiere de la realización de un número mayor de iteraciones y el incremento del tiempo de cálculo. Existe un compromiso entre la precisión en los resultados y el tiempo de cálculo y, en general, es necesario comprobar los resultados de la simulación.

TRNSYS se alimenta de una serie de datos relativos al sistema de trigeneración (capacidad de generación de calor, frío, electricidad y ACS) a través de sus curvas características, y se parametriza para cada una de las ubicaciones propuestas mediante la asignación de una geometría de estudio (para lo que se utiliza el software SKECTHUP), y de datos de demanda de los diferentes tipos de energía propuestos. Los datos relativos a electricidad se corresponden con la demanda registrada por los diferentes contingentes y los datos relativos a las necesidades de frío y calor se calculan de manera automática a partir de los datos meteorológicos obtenidos en METEONORM y las temperaturas de referencia deseadas en el interior de las instalaciones. Para ello, además, se deben tener en cuenta los datos de infiltraciones y las ganancias producidas por la presencia intermitente de los miembros del destacamento.

3. Simulación de sistemas de trigeneración en unidades de IM

3.1. Estimación de las demandas energéticas

Para la obtención de los datos climáticos necesarios se ha recurrido a METEONORM, base de datos que nos proporciona los siguientes parámetros de la localización: azimut y elevación solar, radiación global, difusa y directa (directa normal), así como la radiación en planos inclinados, radiación de onda larga, luminancia, radiación UVA/UVB, precipitación, lluvia torrencial, parámetros de humedad (punto de rocío, humedad relativa, ratio de mezcla, temperatura psicométrica).

Las demandas de agua caliente sanitaria se han considerado de acuerdo al código técnico de edificación que, aunque no es de aplicación en este tipo de instalaciones, nos ofrece una referencia válida para su dimensionamiento.

Las necesidades de calor y frío son determinadas de manera automática a partir de las temperaturas de consigna propuestas. En el estudio, se han usado nuevamente las condiciones de confort propuestas en el CTE.

En cualquier caso, dichas condiciones pueden ser modificadas de manera sencilla a través de los componentes del sistema pudiendo ser adaptadas a las condiciones del entorno y las capacidades disponibles.

La demanda de electricidad deberá ser estimada teniendo en cuenta la suma de todos los sistemas: armamento, radares, emisoras, acomodación de los miembros del destacamento, etc.

3.2. Diseño del cerramiento

Mediante la utilización del plugin para Google SKETCHUP podemos modelar diferentes tipos de construcciones, tanto fijas como móviles (por ejemplo, tiendas de campaña). Las características de los cerramientos y su composición y dimensiones pueden ser parametrizadas para aplicar el modelo de manera ágil a diferentes circunstancias. El software conocerá la situación y orientación de la construcción de manera que será capaz de estimar la influencia de la posición del sol en las ganancias térmicas.

3.3. Diseño de la simulación

La instalación ha sido modelizada en TRNSYS (v17.01.0025), software de simulación dinámico, y de acuerdo a las condiciones de funcionamiento descritas anteriormente. En concreto, se han considerado las cargas térmicas (tanto de ACS como de calor y frío) y las cargas eléctricas tipo para este tipo de vivienda.

El modelo utilizado, que incluye los cinco bloques en los que se ha dividido la instalación: tanque de almacenamiento, circuito de refrigeración, grupo motor, alternador-regulador y baterías, de recuperación de gases de exhaustación y de bomba de calor ha sido validado en un estudio anterior [6].

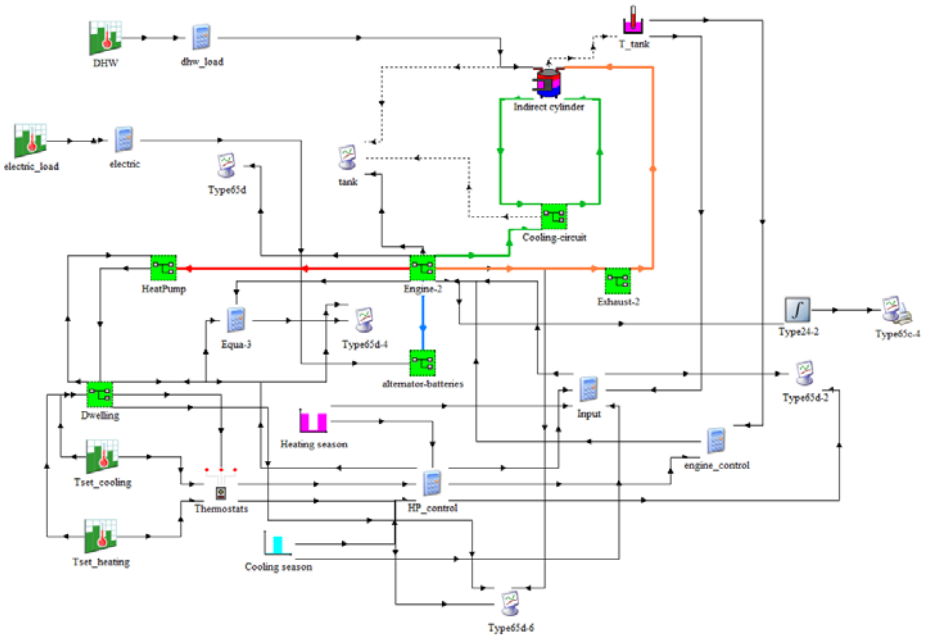


Figura 4. Vista general de la simulación en TRNSYS.

4. Conclusiones

En el presente estudio se analiza la aplicabilidad de la simulación numérica mediante TRNSYS y sus herramientas complementarias: SKETCHUP, METEONORM, etc en el cálculo y dimensionamiento de sistemas alternativos de climatización para las unidades de infantería de marina.

Además, se muestra la metodología que se debe de seguir para la definición de los equipamientos necesarios: cálculo de demandas térmicas y eléctricas, de agua caliente sanitaria, etc. y se muestra un modelo de simulación realizado en trnsys totalmente parametrizable que permite, de manera rápida, conocer las demandas térmicas de la instalación seleccionada así como los consumos de gas necesarios y el grado de cobertura alcanzado.

Referencias

[1] A. Campos Celador, A. Erkoreka, K. Martin Escudero, J. Sala, Feasibility of small-scale gas engine-based residential cogeneration in Spain, Energy Policy. 39 (6) (2011) 3813-3821.

[2] M. Feidt, M. Costea, Energy and exergy analysis and optimization of combined heat and power systems. Comparison of various systems, Energies. 5 (9) (2012) 3701-3722.

[3] M.H. Moradi, M. Hajinazari, S. Jamasb, M. Paripour, An energy management system (EMS) strategy for combined heat and power (CHP) systems based on a hybrid optimization method employing fuzzy programming, Energy. 49 (2013) 86-101.

[4] G. Angrisani, C. Roselli, M. Sasso, F. Tariello, Dynamic performance assessment of a micro-trigeneration system with a desiccant-based air handling unit in Southern Italy climatic conditions, Energy Conversion and Management. 80 (2014) 188-201.

[5] C. Horvath, Y. Hwang, R. Radermacher, W. Gerstler, C. Tang, Waste heat and electrically driven hybrid cooling systems for a high ambient temperature, off-grid application, Energy. 66 (2014) 711-721.

[6] G. Rey, C. Ulloa, A. Cacabelos, B. Barragáns, Performance analysis, model development and validation with experimental data of an ICE-based micro-CCHP system, Applied Thermal Engineering. 76 (2015) 233-244.

Sesión IV-D

Entorno, Sistemas y Modelado

Optimización del sistema de alumbrado exterior de la Escuela Naval Militar mediante técnicas 3D de simulación fotorrealista basadas en modelado CAD

Nebot Pitarch, Luis[1,*], Núñez Nieto, Xavier[1,2] y López Arana, Alba[3]

[1] Centro Universitario de la Defensa (CUD), Escuela Naval Militar de Marín (ENM); Emails: lnebotpitarch@gmail.com (L.N); xnnieto@cud.uvigo.es (X.N)

[2] Grupo de Investigación en Geotecnologías Aplicadas, Universidad de Vigo (UVigo); Email: xnnieto@uvigo.es (X.N)

[3] Ingeniería Rías Baixas S.L.; Email: alba@ingenieriariasbaixas.com (A.L)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; Email: lnebotpitarch@gmail.com

Abstract: El presente trabajo tiene como objeto el cálculo y diseño de una propuesta para mejorar la instalación de alumbrado exterior de la Escuela Naval Militar. Así, con la ayuda de software industrial de diseño asistido por ordenador, se ha elaborado la reconstrucción arquitectónica en tres dimensiones del área a estudiar. Se han determinado las condiciones lumínicas de la instalación actual de alumbrado público de la Escuela, mediante un estudio de campo basado en la técnica de los nueve puntos. De este modo se han detectado carencias manifiestas en las condiciones de la instalación, que no cumple la normativa vigente al respecto. Paralelamente, se ha llevado a cabo una simulación informática de las diversas posibilidades de mejora de la instalación actual, mediante un software específico para cálculo de instalaciones industriales de alumbrado. A la vista de los resultados y mediante el estudio de eficiencia pertinente, se ha elaborado una propuesta de mejora para el alumbrado exterior de la Escuela Naval Militar. La nueva propuesta mejora la instalación actual en condiciones de utilización, seguridad y amabilidad medioambiental, al mismo tiempo que se postula como económicamente mucho más ventajosa.

Keywords: diseño 3D; simulación de alumbrado; LED; eficiencia energética.

1. Introducción

La Escuela Naval Militar es el centro de formación de los futuros oficiales de la Armada. Se encuentra ubicada en la población de Marín, a diez kilómetros de la ciudad de Pontevedra, al Noroeste de España. Se trata de un recinto vallado, en la que hay emplazados diferentes edificios que permiten realizar la labor docente y de base naval secundaria.

Las luminarias que se destinan al alumbrado público del recinto datan de mediados del siglo pasado [1]. Ante el actual escenario de crisis económica, demanda de recursos energéticos y necesidad de ahorro en la Escuela Naval Militar se hace necesario revisar estas luminarias, y proponer una mejora para disminuir el gasto e incrementar la eficiencia energética de la instalación [2]. Dichas luminarias mencionadas están fabricadas en un material de alta opacidad y difusión, lo que provoca que parte del flujo lumínico producido por la lámpara se pierda [3]. Tampoco tiene en cuenta la normativa actual [4] en cuanto a flujo lumínico superior, que impone medidas restrictivas al respecto. Las lámparas que proporcionan la luz en las luminarias instaladas actualmente son en su mayoría de descarga de gas, bien sean de vapor de sodio o de mercurio, lo que hace que, sumado a las pantallas, la eficiencia del conjunto sea mínima [3]. La instalación actual tampoco tiene en cuenta la normativa respecto a niveles de iluminación necesarios en los viales [4], así como la referente a eficiencia energética en instalaciones de alumbrado público, lo que justifica más si cabe la elaboración de este trabajo.

El trabajo se ha realizado en tres fases, el diseño de una zona representativa en cuanto a alumbrado de la Escuela Naval Militar, la medición de iluminancia y cálculo de eficiencia energética de la instalación actual y la simulación de una propuesta de mejora mediante la inclusión de luminarias LED (Light-Emitting Diode). También se ha realizado un estudio de amortización, para comprobar si esta propuesta de mejora en la instalación sería rentable desde el punto de vista económico.

2. Materiales y Métodos.

2.1. Modelado del escenario

En esta fase del trabajo se ha realizado un levantamiento en 3D de una parte representativa de la Escuela Naval Militar, que posteriormente será utilizada como base fidedigna para la simulación de iluminación mediante software específico. El principal recurso que se ha utilizado en esta fase del trabajo ha sido el software de diseño asistido por ordenador AutoCAD 2015 (Figura 1A). Mediante este software se han creado todos los elementos del entorno a simular buscando el máximo detalle posible, de forma que los resultados de la simulación sean todo lo reales que el software de iluminación permite.

Se han utilizado varios métodos para que las medidas de la escena creada en 3D sean las correspondientes a la realidad. Por un lado, se han utilizado ortofotos, tanto del SIGPAC (visor del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente), como del visor de mapas de la empresa Google. Para escalar dichas ortofotos y comprobar los resultados obtenidos con los medidos en el terreno se ha utilizado un telémetro láser, una rueda taquimétrica y una cinta métrica. Por otro lado, la creación de la escena en 3D se ha llevado a cabo situando edificio tras edificio mediante ortofotos, para, a continuación, levantar uno por uno y crear los detalles pertinentes. Los edificios están formados

por un bloque principal, que comprende el cuerpo principal del edificio y las fachadas, y de diferentes bloques que conforman los detalles, por ejemplo, marcos, ventanas, tejados o artesonados. El motivo de crear diferentes bloques para los detalles es la comodidad a la hora de trabajar con ellos y asignar texturas en el software de iluminación.

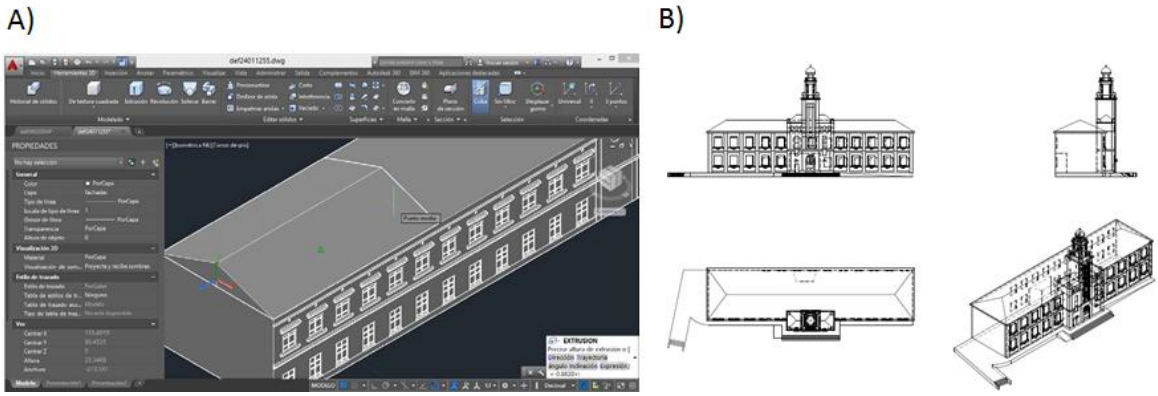


Figura 1. A) Modelado 3D de la escena y B) Vistas de la edificación resultante.

Una vez creados todos los objetos en el entorno CAD se ha procedido a la exportación de todos ellos a un formato que soporte y reconozca el software de iluminación, en este caso el tipo de archivo ACIS (extensión *.sat*). Esta exportación se ha realizado objeto a objeto, de forma que la escena en el software de iluminación la componen multitud de objetos, con las ventajas que ello supone respecto a asignación de texturas, emplazamiento y tratamiento.

2.2. Toma de datos y cálculo experimental

Los objetivos de esta fase han sido definir por un lado las diferentes zonas en el área de estudio, determinar los niveles de iluminación que la normativa [4] establece para esas zonas y medir sobre el terreno los niveles de iluminación real que hay con la instalación actual (Figura 2B).

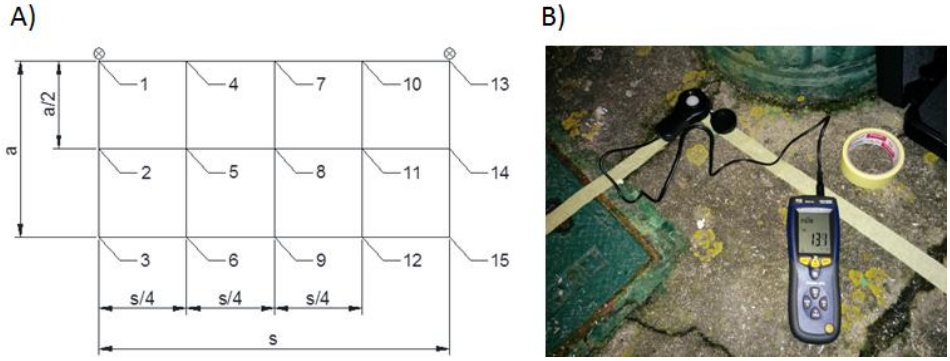


Figura 2. A) Esquema del método de medición simplificado y B) Toma de datos en campo.

La definición de los niveles de iluminación y de las zonas a estudiar, se ha realizado utilizando la normativa vigente respecto a alumbrado público [4]. En el caso del trabajo de campo se ha utilizado

una rueda taquimétrica y una cinta métrica para el marcado de las cuadrículas según establece el método simplificado [4] de medida de la iluminancia media [2,3] y un luxómetro para medir los niveles de iluminación en los puntos que determina dicho método. La clasificación de las zonas de estudio viene marcada por una serie de tablas que incluye la normativa [4], donde se determinan los niveles de iluminancia media, mínima y uniformidad [2,3], según el caso, y que se ajustan al tipo de vial en el que nos encontremos. En el caso de la Escuela Naval Militar, todos los viales existentes tienen la velocidad del tráfico rodado muy limitada, lo que hace que los niveles de iluminación requeridos sean bajos.

La normativa vigente también especifica el método a seguir para obtener los valores de iluminancia media, mínima y uniformidad que permiten determinar si una instalación cumple o no con los niveles mínimos. Este método se denomina, como ya se dijo, método simplificado de medida de la iluminancia media [4]. Para ello se deben efectuar una serie de medidas en una cuadrícula que viene determinada por el ancho del vial considerado y la distancia entre luminarias (Figura 2A). Una vez obtenidos dichos valores, y mediante el uso de una media ponderada, se obtiene el valor de iluminancia media. Mediante la ecuación que define la uniformidad mínima y con el valor obtenido anteriormente se puede obtener el valor de uniformidad que se comparará con las tablas.

2.3. Simulación fotorrealista

Para llevar a cabo el cálculo de niveles de iluminación obtenidos con unas luminarias más eficientes se ha utilizado el software de iluminación DIALux. Dicho software permite obtener resultados de iluminación reales, utilizando para ello un entorno 3D al que se pueden añadir texturas y datos de luminarias de la mayoría de fabricantes del mercado. Es por ello que se ha creado el entorno en el cual se quiere realizar el estudio con el máximo detalle, ya que el software va a tener en cuenta todos y cada uno de los detalles que existan en su entorno para realizar la simulación. El programa permite introducir objetos en 3D creados por el propio software o por otros programas de CAD. Como se ha visto anteriormente, en este trabajo los objetos se han creado utilizando AutoCAD 2015 (Figura 1A). DIALux permite importar dichos objetos e introducirlos en su entorno de trabajo. Así mismo, permite añadir texturas a los objetos importados, de forma que los resultados obtenidos tienen en cuenta todas las variables que pueden entrar en el proceso de cálculo.

Una vez se han importado los objetos en el entorno de simulación y asignado texturas, se deben introducir en la escena las zonas de cálculo en las que el programa va a calcular las variables de iluminación. Estas zonas se corresponden con las establecidas para el cálculo de la iluminación actual en el recinto. Con la escena y zonas de cálculo definidas corresponde añadir al entorno de cálculo las luminarias seleccionadas (Figura 3A). Para ello el programa cuenta con diversas extensiones proporcionadas por los principales fabricantes a nivel mundial, que permiten introducir luminarias con todos los datos reales del fabricante. Para elegir las luminarias LED se han tenido en cuenta varios factores, cuyos valores se han acotado realizando varias simulaciones previas. Estas simulaciones se han realizado en una escena en la que no se han introducido edificios, solamente con zonas de cálculo iguales a las que se han introducido en la escena. Esto hace que sean mucho más rápidas, al no calcular

todos los detalles de la escena, pero también arrojan unos valores que, si bien son aproximados, no son tan exactos como los obtenidos calculando con todos los detalles.

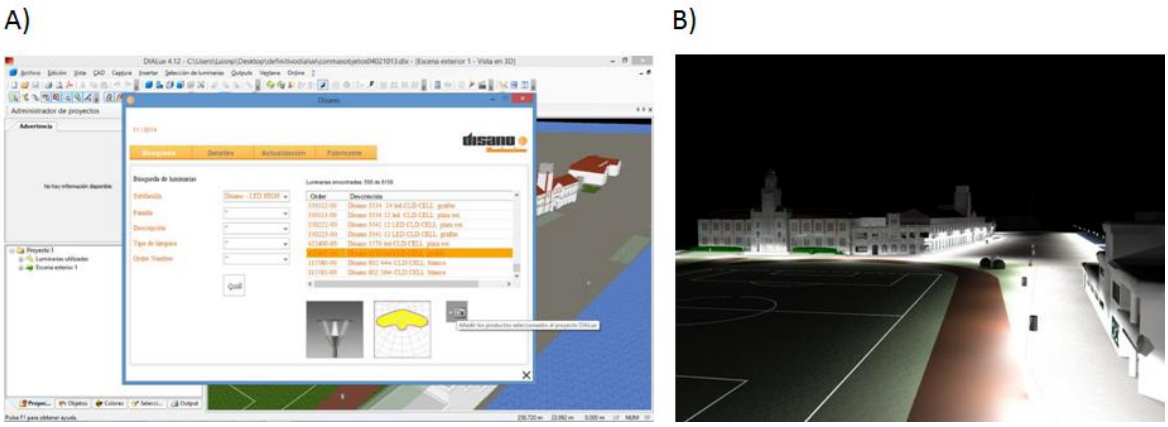


Figura 3. A) Selección de luminarias y B) Renderizado 3D de la escena.

Con la escena de cálculo completamente definida dentro del entorno de DIALux, se procede a realizar la simulación. El tiempo de cálculo puede prolongarse en mayor o menor medida, dependiendo de la complejidad de la escena y la cantidad de objetos introducidos. El programa permite elegir diferentes opciones de cálculo. En el caso de este trabajo se han tenido en cuenta todos los objetos presentes en la escena.

2.4. Estudio de amortización

Para comprobar si el cambio de la instalación actual por una más eficiente es rentable económicamente, se ha llevado a cabo un estudio de amortización. Se han tenido en cuenta varios factores, tales como la subida anual del precio de la electricidad [5,6], el coste de reposición de lámparas fundidas [4] o el coste de la nueva instalación.

3. Resultados y Discusión

3.1. Diseño 3D

A partir del proceso de diseño con AutoCAD se han obtenido un total de 16 planos, que muestran con detalle y dimensiones reales los diferentes edificios del entorno que se ha elegido en el presente trabajo (Figura 1B), el emplazamiento de luminarias y zonas de cálculo y una vista detallada de las luminarias empleadas en la simulación. Para la exportación a formato ACIS se han creado un total de 102 objetos, los cuales se han utilizado en la escena de DIALux.

3.2. Estudio de campo

Los resultados obtenidos de las mediciones de niveles de iluminación sobre el terreno muestran que la instalación actual no cumple en la mayoría de los casos con los niveles mínimos que establece la

normativa, bien sea de iluminancia mínima, media o uniformidad mínima requeridas. La Tabla 1 recoge los resultados obtenidos, marcando si cumple o no con los niveles establecidos por normativa.

Zona	**E_m(lux) medida**	**U_m(lux) medida**	**E_{min}(lux) medida**	**E_m(lux) requerida**	**U_m(lux) requerida**	**E_{min}(lux) requerida**	**Cumple**
Zona 1	18.0	0.7	12.8	7.5	-	1.5	Sí
Zona 2	5.0	0.3	1.4	7.5	-	1.5	No
Zona 3	7.6	0.2	1.4	10	0.4	-	No
Zona 4	8.6	0.2	1.3	7.5	-	1.5	No
Zona 5	11.6	0.7	8.5	7.5	-	1.5	Sí
Zona 6	1.9	0.5	1	5	-	1	No
Zona 7	9.2	0.1	1.3	10	0.4	-	No

Tabla 1. Niveles de iluminación actuales.

3.3. Simulación

El programa proporciona gran cantidad de datos, tanto gráficos como analíticos. Los más relevantes son los diagramas de isoiluminancia y los gráficos de colores falsos, que muestran claramente los niveles de iluminación obtenidos así como su distribución (Figura 4). También proporciona imágenes renderizadas del entorno 3D, lo que permite ver a simple vista los resultados obtenidos con cada luminaria (Figura 3B). Los datos obtenidos de las simulaciones realizadas utilizando la distribución actual muestran que son necesarias luminarias LED de gran potencia para alcanzar los niveles mínimos, no llegando a ser obtenidos en algunos casos pese a utilizar la luminaria más potente suministrada por el fabricante. Estas luminarias de gran potencia provocan que la distribución de la luz sea irregular, creando zonas con gran intensidad luminosa mientras que otras permanecen prácticamente en penumbra.

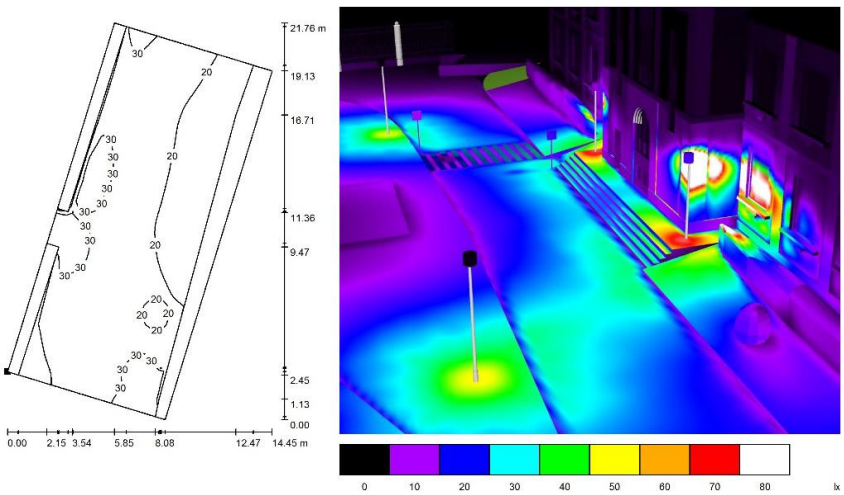


Figura 4. Diagrama de Isoiluminancia e Imagen en Colores Falsos.

La simulación realizada con la denominada distribución óptima de luminarias muestra que, con luminarias menos potentes, es posible alcanzar los valores exigidos en todos los casos. De este modo, se produce, además, un menor consumo energético y se consigue una distribución de luz mucho más uniforme.

3.4 Eficiencia energética

El estudio de eficiencia energética llevado a cabo muestra que la instalación actual no cumple con los valores de eficiencia energética establecidos por la normativa en ninguno de los casos, obteniendo calificaciones de "E", "F" y "G". Por otro lado, de los datos obtenidos de las simulaciones considerando nuevas luminarias, pero conservando la distribución original de las mismas, se concluye que pese a mejorar la eficiencia y cumplir con los niveles mínimos establecidos, el conjunto no resulta todo lo eficiente que debería obteniendo calificaciones energéticas de nivel "A", "B" e incluso "C", en las diferentes zonas.

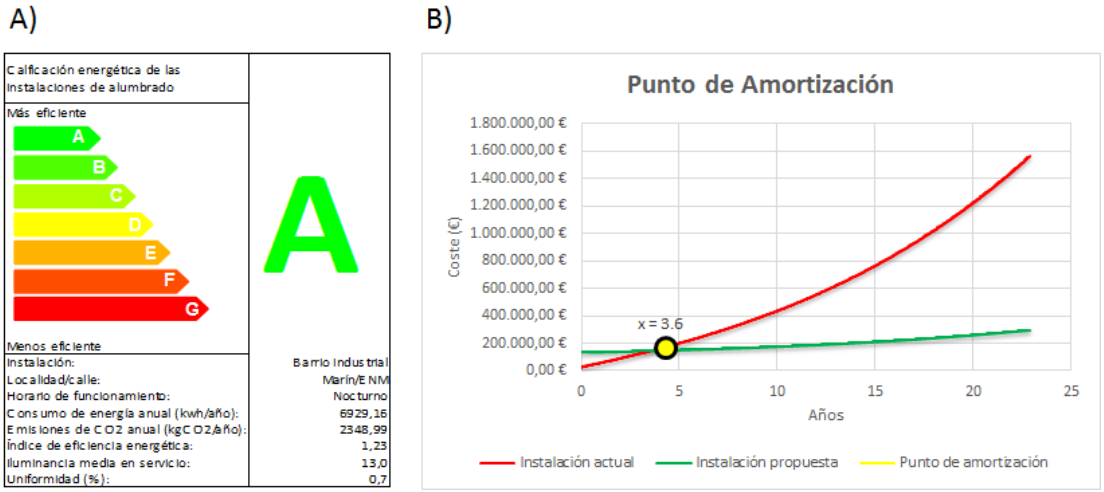


Figura 4. A) Etiquetado Energético y B) Punto de Amortización**.**

Finalmente, los datos que arroja la simulación con distribución de luminarias denominada como óptima, demuestran que esta disposición es la más eficiente, cumpliendo en todos los casos con los niveles mínimos que establece la normativa y obteniendo una calificación de "A" en todas las zonas de estudio (Figura 4A).

3.5 Punto de amortización

El estudio de amortización refleja que se podría obtener un ahorro superior al millón de euros, considerando en su totalidad la vida útil de la instalación propuesta en el trabajo. Así mismo, la amortización de la inversión inicial se produciría en un período levemente superior a los tres años (Figura 4B).

4. Conclusiones

El software específico de diseño AutoCAD 2015, se muestra como una herramienta eficaz para plasmar un entorno arquitectónico tridimensional. Por su parte, el software DIALux 4.2 ha demostrado ser un software de elevado nivel, que no solo permite realizar cálculos complejos de iluminación, sino también tratar escenas compuestas por enormes cantidades de objetos 3D.

Los resultados obtenidos concluyen que la instalación actual está completamente obsoleta y resulta ineficiente, por lo tanto, debe ser sustituida o renovada. Los valores calculados tras las mediciones en el terreno arrojan valores que en ningún caso cumplen con los establecidos en la normativa para el tipo de zona tratado. Esto se comprueba tanto en niveles mínimos de iluminancia media, mínima y uniformidad como en niveles mínimos de eficiencia, y se remarca más si cabe cuando se realiza la calificación energética de la instalación, donde el valor más alto obtenido es una "E".

De las simulaciones realizadas se extrae que no solo las luminarias son ineficientes sino que la distribución actual también debe ser mejorada. Para cumplir con los valores mínimos de iluminación utilizando la presente distribución es necesario recurrir a luminarias de gran potencia, lo que disminuye la eficiencia y la uniformidad de la iluminación. Así, la elección correcta es la sustitución de toda la instalación por una nueva, con un emplazamiento basado en la eficiencia, que permita utilizar luminarias LED de menor consumo y asociadas a una mejor distribución lumínica.

Por último, se concluye que el cambio de la instalación actual a una de tipo LED no sólo mejora en los niveles de iluminación y en la eficiencia del conjunto, sino que también es económicamente viable, ya que la inversión se amortizaría en poco más de tres años, obteniendo un ahorro superior al millón de euros.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Centro Universitario de la Defensa y a la Escuela Naval Militar de Marín, por las facilidades prestadas para la realización de este trabajo. Así mismo, se agradece el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad a través del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad (Ref. ENE2013-48015-C3-1-R).

Referencias

1. Escuela Naval Militar. *Archivo Fotográfico*, Marín, 1943.
2. Comission Internationale de L'eclairage (CIE). *Vocabulario Internacional de Iluminación*, Viena, 2011.
3. Indalux Iluminación Técnica S.L.. *Manual de Iluminación Indalux*, 2002.
4. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. I*nstrucciones Técnicas Complementarias EA-01 a EA-07*, BOE n. 279, 2008.
5. Comisión Europea. *EU Energy, Transport And GHG Emissions Trends To 2050 Reference Scenario 2013*, 2014.
6. Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia. *Boletín de Indicadores eléctricos de enero de 2015*, 2015.

Análisis numérico del efecto de la protección de mandíbula y visor del casco de combate bajo cargas explosivas

Rodríguez-Millán, Marcos[1,*], López-Gálvez Muñoz, Héctor[1], Loya Lorenzo, José Antonio[2], Lee, Heow Pueh[3] y Miguélez Garrido, María Henar[1]

[1] Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid, España. Email: mimarcoe@ing.uc3m.es (MEM), mhmiguel@ing.uc3m.es (MGMH)

[2] Departamento de Ingeniería Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid, España; Email: jloya@ing.uc3m.es (LLJA)

[3] Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Singapur, 8 Engineering Drive 1, Singapur 117576; Email: mpeleehp@nus.edu.sg (HPL)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; Email: mrmillan@ing.uc3m.es (RMM);

Abstract:

En este trabajo se ha analizado numéricamente, mediante el uso del código comercial de elementos finitos ABAQUS/Explicit, el comportamiento de distintos componentes de una protección personal de cabeza humana (casco de combate) ante una amenaza explosiva. Los resultados obtenidos muestran la propagación de la onda de choque, responsable del incremento de la presión intracraneal. El desarrollo óptimo de la protección personal de la cabeza permite paliar el efecto de la onda presión sin exceder los límites establecidos.

Keywords: explosión; ABAQUS; casco de combate; cabeza humana

---

1. Introducción

La mejora de las protecciones personales frente a amenazas balísticas y explosivas tiene un interés indudable para los usuarios de las mismas: Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado (FFCCSSEE) y Fuerzas Armadas (FFAA). Se trata de un tema estratégico, de gran actualidad, como queda patente

debido a los últimos actos terroristas en Europa que han implicado el uso de armas habituales en escenarios bélicos. Existe una necesidad real de mejorar los sistemas de protección de cuerpos policiales y de defensa en países desarrollados contra nuevas amenazas [1]. Por otra parte, el elevado número de conflictos internacionales ha incrementado el número de combatientes afectados por heridas de guerra [2]. Las protecciones personales deben cumplir unos requisitos de ergonomía, ligereza y minimización del daño personal provocado por la amenaza. Es esperable que se incremente la demanda de este tipo de protecciones, hasta ahora utilizadas en operaciones concretas, convirtiéndose en habituales en todo tipo de servicios, que hasta ahora se estimaban como de bajo riesgo. El objetivo de este trabajo es analizar numéricamente la influencia de los dispositivos de la protección de mandíbula y visera ante una amenaza explosiva. Para determinar el traumatismo craneoencefálico (TCE), se ha establecido que el nivel de presión que produce graves lesiones es de 235kPa [3].

2. Modelo de Elementos Finitos (MEF)

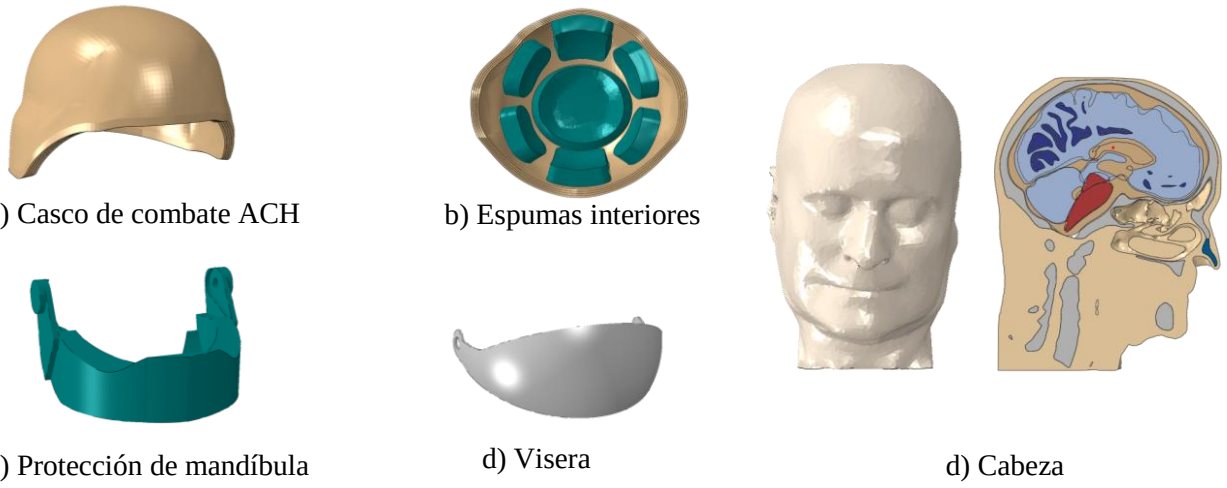
El MEF es un método numérico de resolución de problemas de ingenieriles. Uno de los programas más empleados es ABAQUS/Explicit. Dado la imposibilidad de hacer este tipo de ensayos experimentales, debido al coste económico y complejidad experimental, el uso de programas matemáticos facilita análisis como el desarrollado. El casco considerado corresponde al modelo ***A**dvance **C**ombat **H**elmet* (ACH), utilizado por diferentes fuerzas de defensa, está fabricado en aramida. Posee un sistema de amortiguamiento formado por espumas frontal, lateral y trasera. En este caso, se le ha añadido la visera y la protección de mandíbula con el fin de analizar su capacidad de protección ante una explosión. En la Figura 1 se muestra el modelo de casco completo comparado con el de combate desarrollado por la armada de los Estados Unidos de América en el programa HEaDS-UP.



(a) (b)

Figura 1. Comparación del casco de combate del programa HEaDS-UP (a) y el modelo numérico (b) desarrollado en este trabajo.

La Figura 2 a), b), c), d) muestra las partes que forman la protección personal: casco, espumas interiores, protección de mandíbula, visera y cabeza, respectivamente.



a) Casco de combate ACH b) Espumas interiores

c) Protección de mandíbula d) Visera d) Cabeza

Figura 2. Representación de las distintas partes del modelo numérico.

El modelo de la cabeza, desarrollado y validado por Lee at al. [4], incluye cráneo, cerebro (materia blanca, materia gris, pendéculo), el sistema ventricular (dos ventrículos laterales, tercer ventrículo y cuarto ventrículo) y cartílago nasal [4]. El modelo contiene algunos detalles tales como los senos frontal, esfenoidales, y maxilares; y el líquido cefalorraquídeo. El modelo de la cabeza tiene una masa 4.73 kg que consiste 327536 nodos y 1337903 elementos tetraédricos lineales (Figura 2 y Tabla 1)

Componentes	Nº de elementos	Componentes	Nº de elementos
Tronco encefálico	6104	Cartílago nasal	3578
Pendéculo cerebral	1762	Hueso del cráneo	130482
Cerebelo	21727	Tejido blando	253894
líquido cefalorraquídeo	164864	Ventrículos	36776
Materia gris	436917	Materia blanca	278925
Cartílago Lateral	2874		

Tabla 1. Componentes del modelo numérico de la cabeza y número de elementos de cada componente

3. Descripción de los materiales.

3.1. Materiales del casco de combate

El casco de combate ACH está fabricado mediante compuesto de aramida, cuyas propiedades mecánicas dependen de la dirección de las fibras. El comportamiento del material se ha considerado elástico lineal hasta el fallo, cuyas propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 2 [4].

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)	ν_{12} (-)	ν_{13} (-)	ν_{23} (-)	$\rho(kg/m^3)$
18.5	18.0	4.5	0.77	2.6	2.6	0.25	0.33	0.33	1230

Tabla 2. Propiedades mecánicas de la fibra de aramida [4].

Es importante tener en cuenta los distintos mecanismos de fallos que pueden darse en los materiales: fallo interlaminar y fallo intralaminar. Para tener en cuenta estos mecanismos, se ha implementado el criterio de fallo de Hashin mediante una subrutina usuario VUMAT, Tabla 3 [5].

Modo de Fallo	Formulación criterio de Hashin	Modo de Fallo	Formulación criterio de Hashin
Tracción fibras $(\boldsymbol{\sigma_{11}; \sigma_{22} > 0})$	$d_{1t} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_{1T}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2$ $d_{2t} = \left(\frac{\sigma_{22}}{X_{2T}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2$	***Compresión Fibras*** $(\boldsymbol{\sigma_{11}; \sigma_{22} < 0})$	$d_{1C} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_{1C}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2$ $d_{2C} = \left(\frac{\sigma_{22}}{X_{2C}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2$
Tracción Matriz $(\boldsymbol{\sigma_{33} > 0})$	$d_{mt} = \left(\frac{\sigma_{33}}{X_{3T}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2$	*Compresión Matriz* $(\boldsymbol{\sigma_{33} < 0})$	$d_{mt} = \left(\frac{\sigma_{33}}{X_{3C}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2$

Tabla 3. Formulación del criterio de fallo de Hashin [5].

Los valores de los parámetros del criterio de Hashin utilizados (ver Tabla 4) se han obtenido de la literatura científica [4].

$X1_T$ (MPa)	$X1_C$ (MPa)	$X2_T$ (MPa)	$X2_C$ (MPa)	$X3_T$ (MPa)	$X3_C$ (MPa)	S_{12} (MPa)	S_{13} (MPa)	S_{23} (MPa)
555	555	555	555	1050	1050	77	1060	1086

Tabla 4. Propiedades resistivas del compuesto de fibra de aramida [4].

La modelización de las espumas interiores del casco se han realizado mediante el modelo implementado en ABAQUS *Low density Foam.* Las propiedades del material son las obtenidas de [4]. Las propiedades del policarbonato empleadas se han obtenido del trabajo de la literatura [6].

3.2. Materiales de la cabeza

La modelización mecánica de la cabeza es compleja debido a la diversidad de componentes que constituyen la cabeza. Se ha realizado una combinación entre modelos de comportamiento viscoelásticos, Ecuación1, y elástico lineal hasta el fallo. Las propiedades de los distintos componentes de la cabeza [4] han sido validadas ante choques a baja velocidad y en ensayos de impacto.

$$G(t) = G_\infty + (G_0 - G_\infty)e^{-\beta t} \tag{1}$$

Componentes	Young Modulus (MPa)	Coef. Poisson $\nu\,(-)$	Densidad $\rho\,(kg/mm^3)$
Tronco encefálico	$G_0 = 0{,}0225\,; G_\infty = 0{,}0045;\ \beta = 80\ s^{-1}$	0,4996	$1{,}06 \cdot 10^{-6}$
Pendéculo cerebral	$G_0 = 0{,}0225\,; G_\infty = 0{,}0045;\ \beta = 80\ s^{-1}$	0,4996	$1{,}06 \cdot 10^{-6}$
Cerebelo	$G_0 = 0{,}528\,; G_\infty = 0{,}168;\ \beta = 35\ s^{-1}$	0,48	$1{,}14 \cdot 10^{-6}$
Líquido cefalorraquídeo	$E = 1.314$	0,4999	$1{,}04 \cdot 10^{-6}$
Materia gris	$G_0 = 0{,}034\,; G_\infty = 0{,}0064;\ \beta = 700\ s^{-1}$	0,4996	$1{,}04 \cdot 10^{-6}$
Cartílago lateral	$E = 30$	0,45	$1{,}50 \cdot 10^{-6}$

Cartílago nasal	$E = 9$	0,32	$1{,}50 \cdot 10^{-6}$
Hueso del cráneo	$E = 8000$	0,22	$1{,}21 \cdot 10^{-6}$
Tejido blando	$E = 16{,}67$	0,46	$1{,}04 \cdot 10^{-6}$
Ventrículos	$E = 1.314$	0,4999	$1{,}04 \cdot 10^{-6}$
Materia blanca	$G_0 = 0{,}041\ ; G_\infty = 0{,}0078;\ \beta = 700\ s^{-1}$	0,4996	$1{,}04 \cdot 10^{-6}$

Tabla 5. Propiedades mecánicas de los componentes de la cabeza [4].

4. Modelización de la onda explosiva.

La modelización de la onda explosiva se ha realizado mediante la herramienta Conventional Weapons Effects (CONWEP) que viene implementada en el código de comercial de elementos finitos ABAQUS/Explicit. La curva característica de la presión de una explosión viene dada por la Ecuación 2 desarrollada por Friedlander [8]:

$$p(t) = p^*(1 - t/t^*)e^{-\beta t/t^*} \tag{2}$$

La Figura 3 representa la evolución característica de la presión instantánea $p(t)$ con el tiempo t. p^* es la presión pico o sobrepresión, t^*es la duración de la fase positiva, I^*es el impulso de fase positiva y b es la constante de caída. Los intervalos característicos de p^* y t^* que son de intereses en el análisis el traumatismo craneoencefálico (TCE) se consideran que están entre 50-1000 kPa y 1-8 ms, respectivamente [7].

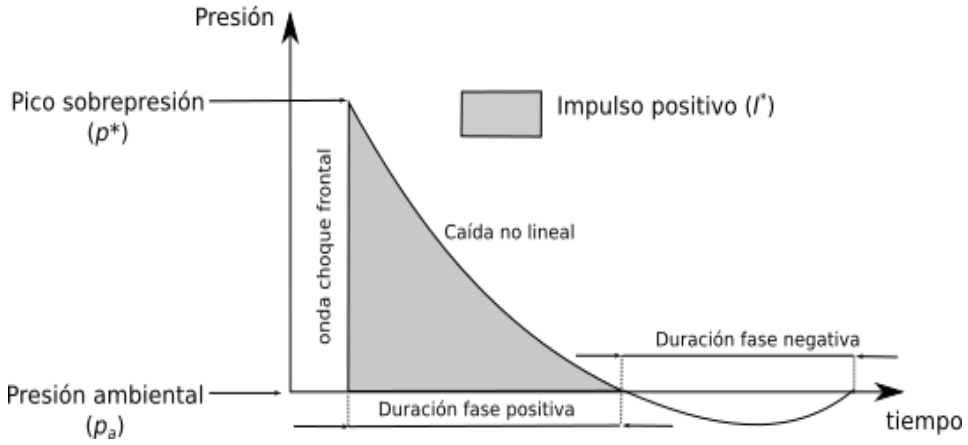


Figura 3. Representación matemática de la onda de choque [8].

La magnitud de una explosión depende de la cantidad de energía liberada, expresada en unidades de energía, como las calorías o Joule. Para calcular la presión de pico o sobrepresión y la duración de la explosión, se emplean las expresiones desarrolladas por Kinney y Graham [9] (Ecuaciones 3 y 4).

$$P_s = 808\ P_{atm} \cdot \frac{\left[1 + \left(\frac{Z}{4.5}\right)^2\right]}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.048}\right)^2\right]\left[1 + \left(\frac{Z}{0.32}\right)^2\right]\left[1 + \left(\frac{Z}{1.35}\right)^2\right]}} \tag{3}$$

$$\frac{t_d}{W^{\frac{1}{3}}} = \frac{980 \cdot \left[1 + \left(\frac{Z}{0.54}\right)^{10}\right]}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{Z}{0.02}\right)^{3}\right]\left[1 + \left(\frac{Z}{0.74}\right)^{6}\right]\left[1 + \left(\frac{Z}{6.9}\right)^{2}\right]}} \quad (4)$$

Donde P_s es la presión de pico en bares; P_{atm}es la presión atmosférica en bares; t_d es el tiempo de la fase positiva del perfil de la explosión en segundos; W es la masa de TNT en kg y Z es una medida relativa entre la masa de TNT y la distancia al objetivo; se calcula mediante: $Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}}$. El caso de estudio analizado en este trabajo, consiste en 100 gr de TNT, presión máxima 1,38 Mpa y un tiempo de 0,17 ms.

5. Resultados y Discusión

En este estudio preliminar, se ha estudiado de manera numérica la influencia de los dispositivos de la visera y protector de mandíbula ante una carga explosiva de 100 g y el daño cerebral producido. Se van a mostrar los resultados en ICP, el cual se define como la presión ejercida por el cráneo en los tejidos del cerebro y el líquido cefalorraquídeo, y tensión para el cerebro en tres escenarios. Para ello se han escogido dos puntos pertenecientes al interior de la cabeza, uno de la materia gris del cerebro y otro del ventrículo, tal y como muestra la Figura 4.

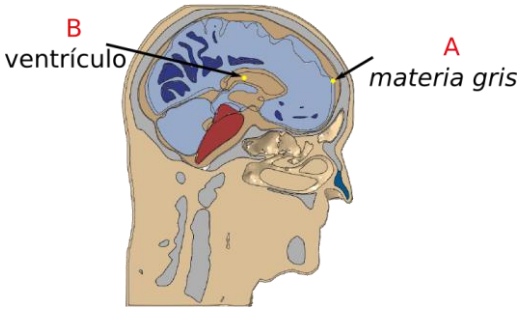


Figura 4. Puntos donde se realiza el análisis de resultados.

Los resultados muestran la eficacia de emplear el uso conjunto del casco, protección de la mandíbula y visera. La reducción de los parámetros estudiado es considerable tal y como muestra la Tabla 4. El efecto por separado no revela mejoras destacables a la hora de disminuir la presión o tensión máxima alcanza. Esto es debido al contacto directo de la onda de presión con la superficie de la cabeza.

	Modelo completo		Modelo sin mandíbula		Modelo sin visera	
	Materia gris	Ventrículo	Materia gris	Ventrículo	Materia gris	Ventrículo
ICP (kPa)	38,2	7,06	264	7,91	207	15,2
Tensión (kPa)	0,196	15,8	0,062	18,5	0,115	13,62

Tabla 4 Tensión y presión máxima en los puntos A y B para los diferentes modelos numéricos considerados.

Esta afirmación se ve corroborada por las imágenes del daño facial de la Figura 5. En esta figura se puede observar como la distribución de tensiones y presiones es parecida para los casos del uso exclusivo de la visera y de la protección de mandíbula.

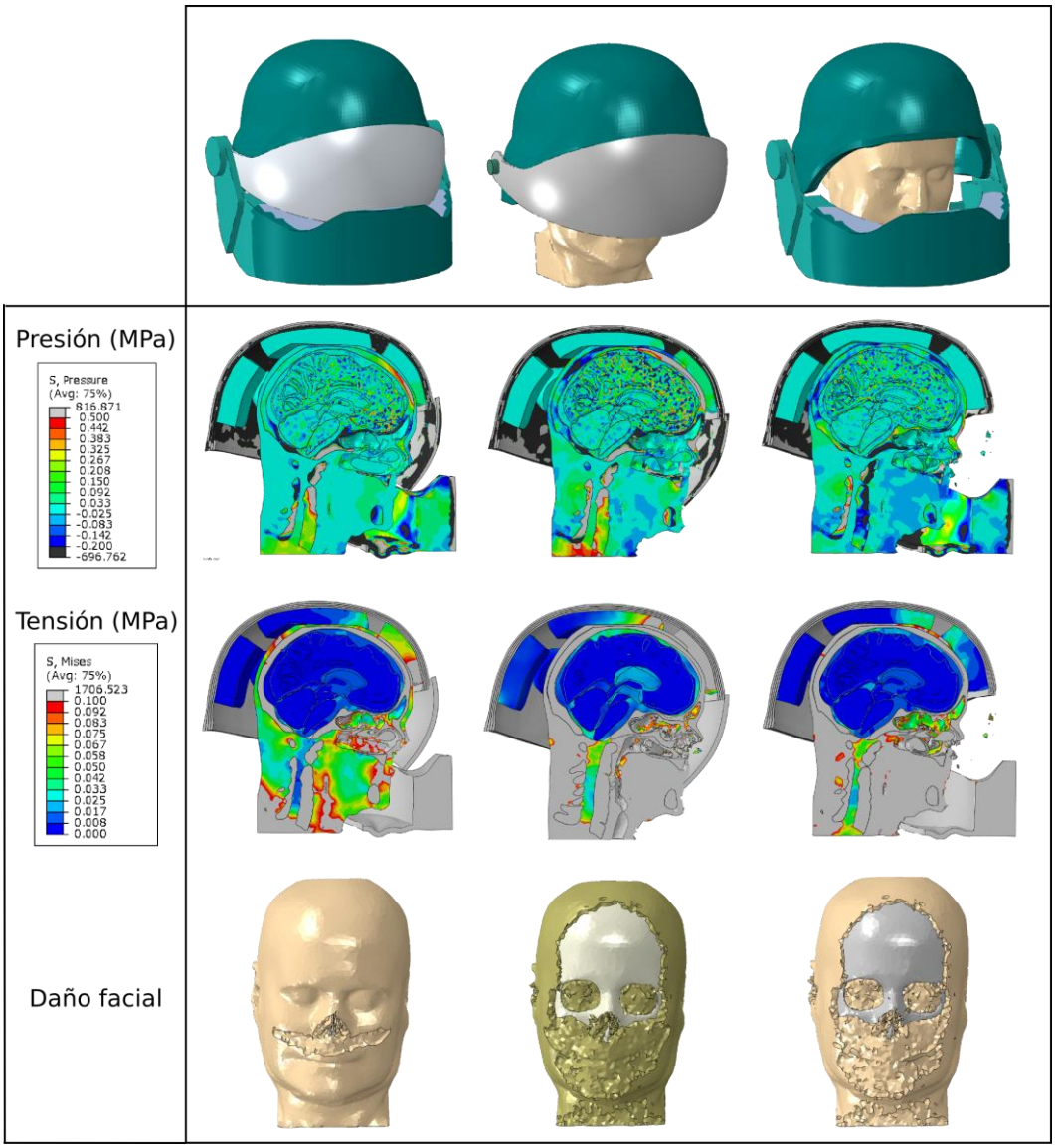


Figura 5. Puntos donde se realiza el análisis de resultados.

El valor máximo ICP considerado para identificar el traumatismo craneoencefálico *(TCE)* es de 235 kPa [3]; por tanto, se puede considerar que los casos de visera o protección de mandíbula individual pueden causar graves daños cerebrales. Se considera que no se producen ningún daño cerebral o éstos son mínimos cuando el valor máximo de ICP es menos que 173 KPa [3]. De esta manera, se puede considerar que el modelo completo consigue paliar los efectos de la onda explosiva y evitar el traumatismo craneoencefálico.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha demostrado la utilidad de emplear modelos numéricos para la predicción de daños cerebrales ante una carga explosiva. Una onda explosiva frontal puede causar graves daños personales al usuario si éste no está apropiadamente equipado. El estudio desarrollado analiza el efecto paliativo de la protección de la mandíbula y de la visera en el daño cerebral. El uso de una protección de mandíbula y de una visera resulta de vital importancia para poder paliar la presión intracraneal de acuerdo con el criterio ICP mientras que el uso individual de uno de ellos no proporcionaría protección frente a este tipo de amenazas.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la financiación recibida del Ministerio de Economía y Competitividad a través de los Proyectos RTC-2015-3887-8 y DPI2011-23191 en el Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016.

Los autores agradecen al Dr. K.M Tse y Dr. L.B Tan sus comentarios y la discusión de los resultados en los problemas dinámicos de explosión.

Referencias

1. Taber, K.H.; Warden, D.L; Hurley, R.A. Blast-related traumatic brain injury: what is known?. *The Journal of Neuropsychiatry & Clinical Neurosciences* 2006; 18(2),141–145.

2. Nyein, M.K.; Jason, A.M.; Yu, L.; Pita, C.M.; Joannopoulos, J.D.; Moore, D.F.; Radovitzky, R.A. In silico investigation of intracranial blast mitigation with relevance to military traumatic brain injury. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2010, 107(48):20703-1–20703-8.

3. Ward, C.C; Chan, M; Nahum, A.M. Intracranial pressure-a brain injury criterion. *24th Stapp Car Crash Conference*, Society of Automotive Engineers (SAE), SAE Paper No. 801304, Warrendale, USA, 1980; 347–360.

4. Tse K.M. Development of a realistic finite element model of human head and its applications to head injuries. Tesis Doctoral. National University of Singapore, 2013.

5. Hashin Z .The elastic moduli of heterogeneous materials. *Journal of Applied Mechanics* 1962; 29: 143-150

6. Dwivedi, A.; Bradley, J.; Casem, D. Mechanical Response of Polycarbonate with Strength Model Fits. *Army Research Laboratiry* 2012.

7. Teland, JA, Hamberger A, Huseby M, Säljö A. Numerical simulation of blast-induced mild traumatic brain injury. *In 6th World Congress of Biomechanics (WCB 2010)*. August 1-6, 2010, Lim CT, Goh JCH (eds). Springer Berlin Heidelberg: Singapore, 2010; 350–353

8. Friedlander, F.G. The wave equation on a curved space-time, *London: Cambridge university press* 1976.

9. Kinney, G.F.; Graham, K.J. Explosive Shocks in Air, *Springer-Verlag* 1985, New York, 2nd edn.

Retos de Investigación para la Ciber Conciencia Situacional en el Contexto de las Operaciones Europeas de Defensa

Rodríguez Hernández, Pedro S. [1]***, Sicilia Urbán, Miguel Á.** [2]**, Salazar Riaño, J. Luis** [3]**, Malgosa Sanahuja, Josemaría** [4]**, Martínez Torres, Javier** [5] **y Barragáns Martínez, A. Belén** [6]

[1] Universidad de Vigo; pedro.rodriguez@uvigo.es (UVigo)
[2] Universidad de Alcalá de Henares; msicilia@uah.es (UAH)
[3] Universidad de Zaragoza; jsalazar@unizar.es (Unizar)
[4] Universidad Politécnica de Cartagena; josem.malgosa@upct.es (UPCT)
[5] Cybersecurity Research Group; jamtorres@indra.es (Indra)
[6] Centro Universitario de la Defensa. Escuela Naval Militar (Marín); belen@cud.uvigo.es (CUD)

***** Autor responsable del trabajo; pedro.rodriguez@uvigo.es

---

Abstract: La Agencia Europea de Defensa ha establecido un concepto para la Ciberdefensa de las operaciones militares llevadas a cabo por la Unión Europea dentro del rango de tareas definidas en la Política Común de Seguridad y Defensa. Tales tareas son altamente dependientes de la compartición de información entre los estados miembros de la UE. El mencionado concepto de Ciberdefensa exige que todos los comandantes militares a todos los niveles operacionales pongan en práctica medidas para mitigar el riesgo de ciberataques. Esto requiere que se proporcione Conciencia Situacional al comandante y a sus oficiales para favorecer una toma informada de decisiones. Dicha Conciencia Situacional se basa en una vista general y específica de las amenazas, a partir de la que se pueden observar, comprender y evaluar los citados riesgos. Con el objetivo de describir los requisitos y potenciales soluciones para preparar y lanzar el proyecto de diseño de un módulo capaz de identificar y manejar el riesgo de ciberataque a las operaciones de la UE, la EDA ha puesto en marcha el paquete Cyber Situation Awareness Package (CySAP), para el cual ha definido un Common Staff Target (CST), que describe los resultados y efectos que debe alcanzar el módulo, así como los servicios que es necesario que proporcione. En esta ponencia se exponen los resultados a los que ha llegado el grupo de trabajo, y las recomendaciones que se han generado.

Keywords: ciberdefensa, amenaza, EDA, ciberataque, evaluación de riesgos

---

1. Introducción

La operaciones conformes a la Política Común de Seguridad y Defensa (CSDP) se llevan a cabo fuera de la Unión Europea (UE) en escenarios distantes, y, en consecuencia, implican la proyección sobre extensas líneas de comunicaciones de herramientas comunitarias independientes con la habilidad de trabajar autónomamente [1].

Las tareas, tal y como se definen en la CSDP, requieren que el mando y control (C2) y la toma de decisiones estén basados en la Conciencia Situacional (SA). Las capacidades militares en general (y la Conciencia Situacional especialmente) dependen para operar de la información proporcionada a través de los sistemas de comunicación e información (CIS) y de las redes de ordenadores. Un Concepto Europeo profundiza más en las medidas y estándares que pueden mejorar la ciberdefensa en general. La integridad de las redes de ordenadores y la seguridad de la información en las redes usadas durante las operaciones llevadas a cabo por la UE son críticas para cumplir las misiones. Esto implica que el ciberespacio en general y las redes de ordenadores en particular necesitan ser defendidos para garantizar la fiabilidad de la información [1].

Con el objetivo de describir los requisitos y potenciales soluciones para preparar y lanzar el proyecto de diseño de un módulo capaz de identificar y manejar el riesgo de ciberataque a las operaciones llevadas a cabo por la UE, la Agencia Europea de Defensa (EDA) ha especificado el paquete Cyber Situation Awareness Package (CySAP). Esto es, el propósito de CySAP es poner en marcha una capacidad para proporcionar Conciencia Situacional al comandante de una operación y a sus oficiales, de forma que puedan tomar decisiones informadas para mitigar dichos riesgos, tal y como exige el Concepto Europeo. Para este propósito, el panorama de amenazas se forma a partir de una referencia de amenazas generales incrementada con inteligencia específica de amenazas (sensores de tiempo real) usada para construir la imagen de amenazas *conocidas*.

Siguiendo lo establecido en la Guía para el Desarrollo de la Fase de Preparación de un Programa de la UE, se ha definido un documento CST (Common Staff Target), que describe los resultados y los efectos que debe alcanzar el módulo, así como los servicios que es necesario que proporcione.

A la empresa española Indra, con el soporte de los centros universitarios de la defensa (CUDs) y sus universidades asociadas, le fue concedido el contrato para la especificación, a partir del documento CST, del documento CSR (Common Staff Requirement), es decir, el conjunto de requisitos de usuario, las restricciones y la arquitectura conceptual de CySAP.

El principal efecto del paquete es que el Comandante tenga una comprensión clara del panorama de amenazas específicas y de tiempo real que se ciernen sobre el sistema de comunicaciones e información que soporta su operación dentro de la CSDP. Otro efecto del paquete es el de equipar al Comandante con las herramientas para manejar los riesgos durante las fases de planificación y ejecución de una operación; fundamentalmente, esto debe dar como resultado la puesta en práctica de una toma de decisiones bien informada. El resultado será un ciberentorno lo suficientemente benigno como para posibilitar la libertad de acción en los restantes entornos operacionales: mar, tierra, aire y espacio.

La sección 2 de esta ponencia presenta el modelo de arquitectura y los módulos que encarnan los requisitos de sistema propuestos por el grupo de trabajo, y las recomendaciones que se han generado.

2. Modelo de Arquitectura

La arquitectura funcional del paquete se estructura alrededor de cinco módulos. Sus responsabilidades principales se resumen en la Tabla 1:

Table 1. Módulos funcionales

Módulo funcional	Responsabilidades principales
Descubrimiento de la Infraestructura CIS (CISID)	Recolectar, gestionar, visualizar y actualizar la información sobre las infraestructuras y sus conexiones. Gestión post-incidente.
Interfaz de Ciber Sensores de Tiempo Real (CRTSI)	Integrar la información de tiempo real. Visualización y alerta basada en síntomas.
Gestión de Amenazas (TM)	Clasificar y valorar los eventos como amenazas, incluyendo estimaciones de su probabilidad e impacto. Recolectar información histórica completa y elaborar una referencia para uso posterior. Integrar las valoraciones externas e internas de las amenazas.
Servicio de Gestión Dinámica de Riesgos (DRMS)	Valorar y gestionar los riesgos. Predecir el impacto y las consecuencias. Análisis y minería del conocimiento de los ataques.
Soporte a las Decisiones de Ciberdefensa (CDDS)	Proporcionar al Comandante (y sus oficiales) un soporte al proceso de decisión mediante la presentación de recomendaciones en un lenguaje operativo.

La arquitectura del paquete se debería fundamentarse en tres compromisos arquitectónicos principales: modularidad, configurabilidad y conformidad a estándares:

- La modularidad se necesita para permitir la evolución y el despliegue independientes de las diferentes áreas funcionales.
- La configurabilidad se requiere como resultado de la necesidad que el paquete sea desplegado en diferentes naciones y escenarios, que requerirán parametrización, y también como un requisito debido a la diversidad de perfiles de usuario a los que se dirige.
- La conformidad a estándares es un requisito clave para permitir la máxima reutilización de las interconexiones con los sistemas, fuentes de datos y herramientas existentes, y también para adaptarse a los sistemas existentes de los cuales el paquete es un módulo de soporte.

2.1. Descubrimiento de la Infraestructura CIS

El módulo de Descubrimiento de la Infraestructura CIS (CISID) recolecta, gestiona, visualiza y actualiza continuamente la información sobre todos los elementos (hardware y software) que constituyen

la infraestructura y sus conexiones, proporcionando así al resto de los módulos una imagen de la infraestructura CIS actualizada.

Mediante la recolección de la información disponible sobre la infraestructura, el CISID proporciona la Imagen Aceptada CIS (RCISP), que consiste en los siguientes resultados:

- Descubrir la topología inicial de la red y crear un mapa automático de la misma que identifica los recursos: ordenadores, dispositivos de red, servicios y software principales (autorizados o no).
- Proporcionar la actualización de la topología de la red a lo largo de la operación.
- Verificar y mantener actualizada la información sobre la infraestructura relacionada en la configuración planeada con un enlace periódico a bases de datos externas proporcionadas por las agencias y/o los Centros de Operaciones de Seguridad (SOC) nacionales.
- Encontrar las eventuales diferencias entre el mapa automático de la red y la red planeada de la misión, identificándolas y evaluándolas como recursos inesperados, eventuales debilidades o potenciales vulnerabilidades. Este proceso de valoración de las vulnerabilidades identifica y clasifica los agujeros de seguridad (vulnerabilidades) tanto en los ordenadores, como en los servidores, en las redes y en las infraestructuras de comunicaciones. El escáner de vulnerabilidades depende de una base de datos que contiene toda la información necesaria para comprobar un sistema en busca de agujeros de seguridad en los servicios y puertos, anomalías en la construcción de los paquetes, y caminos potenciales a programas o scripts atacables. Cada vulnerabilidad se clasifica de acuerdo con el CVSS (Common Vulnerability Scoring System). Toda la información reunida por el escáner de vulnerabilidades se trata de acuerdo a lenguajes abiertos estándar.

El CISID también proporciona gestión post-incidente, para dar soporte al eventual proceso de restauración de las prestaciones de la red de la misión (CIS y otras capacidades) afectada por ciberataques, mediante la implementación de las medidas predefinidas de continuidad de negocio o, alternativamente, dando soporte a las actividades de restauración llevadas cabo por un SOC y/o un Centro de Operaciones de Red (NOC).

2.2. Interfaz de Ciber Sensores de Tiempo Real

El módulo de Interfaz de ciber sensores de tiempo real (CRTSI) trata la información de tiempo real, proporcionada por sensores externos, y, durante la ocurrencia de un evento, también es el responsable de la generación de las señales de Indicadores e Incidentes (I&I) para el módulo de Gestión de Amenazas (TM). Este módulo necesita leer información procedente de un enorme conjunto de sensores y, por lo tanto, debe ser conforme a estándares para tratar con múltiples productos de los más importantes fabricantes.

El módulo CRTSI desempeña dos funcionalidades principales: monitorización y visualización de la información. Estas funcionalidades son independientes, pero ambas están interconectadas.

La monitorización de la información es la responsable de recolectar la información generada por los sensores que describe los eventos de Tecnología de la Información (IT) tales como conexiones de usuarios, rearranque de dispositivos, o alertas de detección de intrusiones, pero también eventos del

mundo físico tales como el hecho de que alguien haya entrado, legítimamente o no, a una sala segura, de que una llave USB ha sido insertada en un servidor, etc. En general, hay tres tipos de sensores: los basados en ordenador, los basados en red y los Sistemas de Detección de Intrusiones.

Los sensores basados en ordenador se ubican en el ordenador que se quiere monitorizar. Su función es la de recoger información sobre los eventos que ocurren actualmente en ese ordenador (esta función también recibe el nombre de *logging*), y se dividen en sensores a nivel de aplicación y sensores a nivel de sistema operativo. A cada evento se le asocia una marca temporal y, normalmente, los registros generados son almacenados en un fichero o en una base de datos.

Por otro lado, los sensores basados en red, también llamados sondas (probes), se usan para capturar el tráfico de red, para reensamblar sesiones de aplicación, para analizar el tráfico y, posiblemente, para registrar, salvar o exportar este tráfico.

Finalmente, algunos sensores, los Sistemas de Detección de Intrusiones (IDS), proporcionan funcionalidades de análisis del tráfico de red (a menudo llamadas Inspección Profunda de Paquetes) que proporcionan información sobre los ataques en marcha contra el sistema observado.

Cuando ocurre algo incorrecto, aparece la funcionalidad de visualización, ya que el CRTSI también es el responsable de generar las correspondientes señales de Indicadores e Incidentes. Estas señales de I&I se envían al módulo de Gestión de Amenazas (TM), que es el responsable de filtrarlas y priorizarlas, antes de enviarlas al módulo del Servicio de Gestión Dinámica de Riesgos (DRMS), para integrarlos en la Imagen Aceptada CIS (RCISP). Una de las principales características de CySAP es la de mostrar los síntomas de todas las etapas de un ciberataque que afecte al desarrollo de una operación.

2.3. Gestión de Amenazas

El módulo de Gestión de Amenazas (TM) evalúa, ordena y visualiza las amenazas (Indicadores e Incidentes) detectados por el CRTSI y fusiona estas *señales internas* con otras procedentes de fuentes externas de inteligencia de amenazas. Esta información sobre amenazas (internas y externas) se utilizará para alimentar al Servicio de Gestión Dinámica de Riesgos (DRMS).

Toda la información mostrada por el módulo TM se representará de una forma comprensible por el personal de los cuarteles generales, con las amenazas clasificadas con arreglo a su impacto, con una evaluación de su probabilidad y una indicación de su tipo (directa/indirecta, tangible/intangible).

El módulo TM se puede dividir en dos submódulos: Gestión y Visualización de la Información Funcional.

El submódulo de **Gestión de la Información Funcional** recibe los Indicadores e Incidentes del módulo CRTSI y los procesa para analizar si son aplicables a la red desplegada. Una vez que el submódulo considera que una amenaza es aplicable (lo que significa que la red desplegada tiene recursos potencialmente afectados por dicha amenaza), calculará su probabilidad e impacto para mostrarle los resultados al administrador del sistema, aunque permitirá que el personal IT modifique los valores automáticos calculados (impacto y probabilidad). Finalmente, el submódulo enviará esta información al Servicio de Gestión Dinámica de Riesgos (DRMS).

El submódulo de **Visualización de la Información Funcional** mostrará en el RCISP, de una forma fácilmente comprensible, toda la información disponible sobre amenazas para facilitar su evaluación y el proceso de gestión dinámica de riesgos.

2.4. Servicio de Gestión Dinámica de Riesgos

El CISID y el TM proporcionan información sobre recursos, vulnerabilidades y amenazas al Servicio de Gestión Dinámica de Riesgos (DRMS) para la evaluación de los daños, impacto y consecuencias potenciales sobre los recursos relacionados, basándose en la topología de la red.

El módulo DRMS pretende proporcionar una herramienta para gestionar los diferentes aspectos que se verán implicados en el cálculo de riesgos. Por un lado, algunos elementos que tienen influencia se podrían proporcionar de forma automatizada; por otro lado, hay entradas no automatizadas (por ejemplo, el valor asignado a cada recurso) que deberían ser insertadas por operadores de seguridad.

El DRMS fusionará la información recogida de los módulos CRTSI, TM y CISID, teniendo en cuenta:

- Las vulnerabilidades (proporcionadas por el CISID);
- Los recursos: ordenadores, routers, estaciones de trabajo, etc. (proporcionados por el CISID);
- Las amenazas caracterizadas con su probabilidad e impacto (proporcionadas por el TM);

Todos estos elementos alimentarán la fórmula que calcula el nivel de riesgo, la cual se seleccionará entre estándares reconocidos como ISO 31000, MAGERIT [2], CRAMM [3], etc.

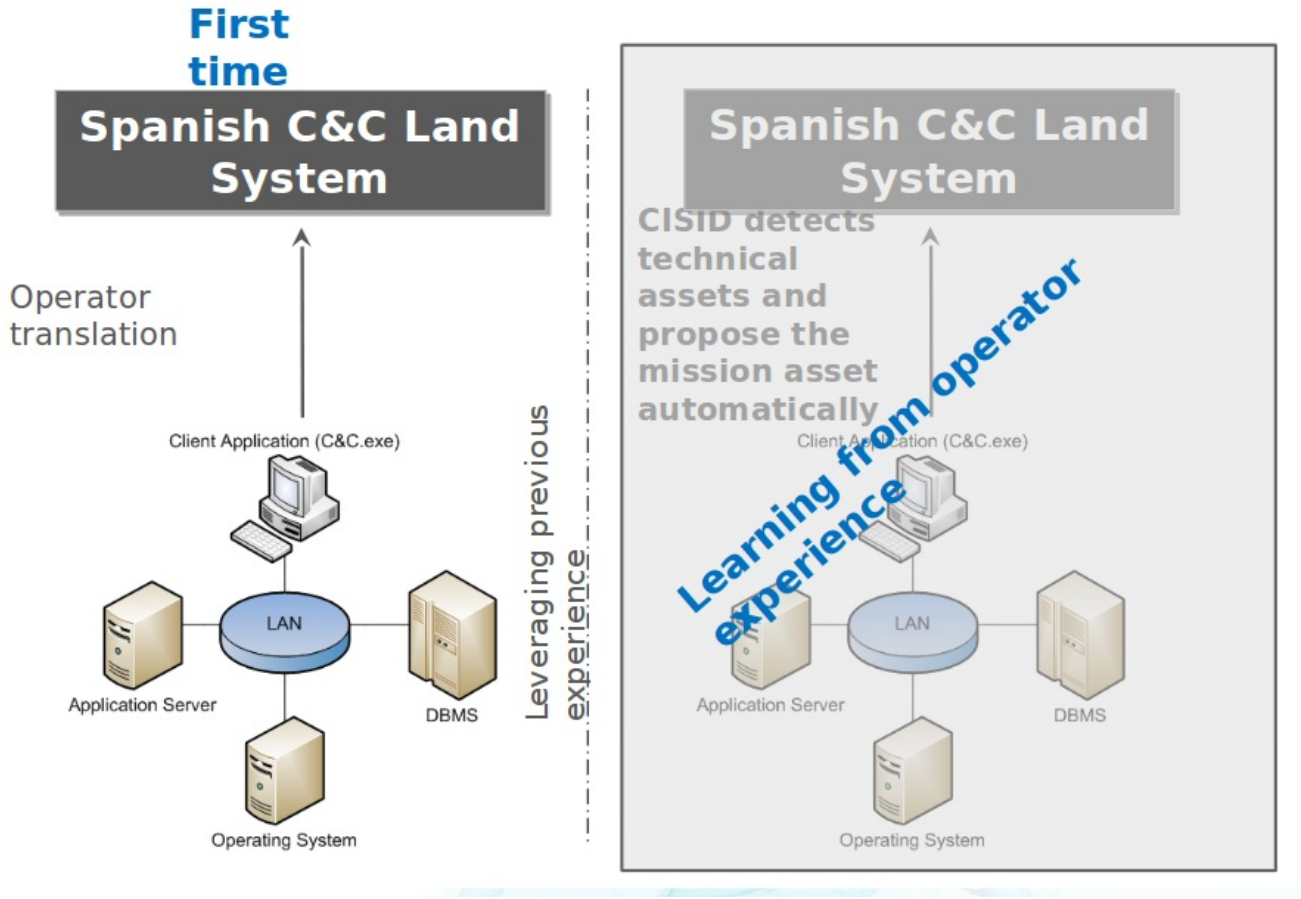
Una vez que se ha calculado el nivel de riesgo, el otro reto principal de este módulo es mostrar los resultados de una forma fácilmente comprensible por los tres tipos de usuarios a los que se dirige: los situados en los niveles Técnico, Operacional y de Comandante. El asunto primordial para los cuerpos militares es el de conseguir una traducción de *recursos técnicos* (sistemas operativos, sistemas de gestión de bases de datos, servidores de aplicación, etc.) a *recursos de misión* (sistemas de mando y control de aire/tierra/mar/anfibios, sistemas de logística, comunicaciones, etc.). Para traducir recursos técnicos a recursos de misión, es imperativa la mediación de operadores. No obstante, el DRMS propondrá una transición de recursos técnicos a recursos de misión aprovechando la experiencia previa proporcionada por los operadores (como se muestra en la Figura 1).

Otro reto para el sistema de Conciencia Situacional es el de valorar el daño causado por un ciberataque y proporcionar información sobre los recursos afectados y el tipo de ataque materializado, en tiempo real, mientras la situación se desarrolla dinámicamente. Es más, el módulo DRMS debería estimar cuál puede ser el siguiente paso de los atacantes, aprovechando los modelos probabilísticos existentes para este propósito [4], tales como las Redes de Creencia Bayesianas [5] y los Modelos Ocultos de Markov [6].

Finalmente, el DRMS estará a cargo de establecer la Imagen Aceptada CIS (RCISP) mediante la integración de la topología inicial de la red con la información proporcionada por todos los otros módulos, es decir: vulnerabilidades, incidentes, amenazas, ciberataques, ordenadores/dispositivos afectados, impacto sobre la misión, etc.

El resultado es una panorámica completa del estado de la red de la misión para garantizar al Comandante que dispone de toda la información útil para lograr realizar su misión. A este efecto, el

Figure 1. Traducción de recursos técnicos a recursos de misión



RCISP debe ser exportable a un sistema C2 para permitir que el Comandante conozca el estado del red en todo momento. Es más, el RCISP será proporcionado en los anteriormente mencionados niveles de detalle: Nivel Técnico, Nivel Operacional, y Nivel de Comandante.

2.5. Soporte a las Decisiones de Ciberdefensa (CDDS)

El módulo de Soporte a las Decisiones de Ciberdefensa (CDDS) le proporciona al Comandante funcionalidades de soporte a la toma de decisiones. Este soporte incluirá la provisión de sugerencias para la situación actual de varias formas, como las posibles contramedidas para las amenazas o ataques, las opciones y alternativas para la continuidad de negocio, o las consecuencias y efectos previstos de los posibles planes de acción. En todos los casos, las opciones y recomendaciones se proporcionan con un nivel de confianza, y, cuando sea de aplicación, ordenadas de acuerdo con su idoneidad o preferencia para la situación dada.

La provisión de sugerencias debe estar actualizada y proporcionarse en tiempo real, de manera que cambie dinámicamente según la situación se desarrolle. Además, el CDDS debe filtrar, transformar y resumir toda la información disponible para prepararla para el proceso de toma de decisiones. Esto conllevará su integración con la información generada en los sistemas de C2 para el soporte a la misión. A su vez, esto también requiere abstraer la información técnica en aspectos operacionales comprensibles por el Comandante y el personal no técnico.

3. Resultados y Discusión

La Agencia Europea de Defensa (EDA) ha lanzado un proyecto para desarrollar una herramienta para identificar y gestionar el riesgo de ciberataques en las operaciones llevadas a cabo por la EDA fuera de la Unión Europea, en escenarios distantes.

El primer paso para alcanzar el objetivo completo de la EDA ha sido definir los módulos o requisitos del sistema que se necesita para que el Comandante de una misión y sus oficiales tengan Conciencia Situacional. Por lo tanto, el resultado más importante de este trabajo ha sido la especificación del documento CSR, para el paquete Cyber Situation Awareness Package (CySAP).

El documento CSR describe los requisitos necesarios para el CySAP y también clasifica aquéllos más importantes como *requisitos clave*. Además, categoriza los requisitos como funcionales (esto es, ligados directamente al objetivo principal) y no funcionales (o sea, que proporcionan una facilidad necesaria para los requisitos funcionales).

Por otro lado, la especificación del CSR sólo es el primer paso de este proyecto, dado que, en su estado actual, el informe sólo describe los requisitos que demandan el Comandante de una misión y sus oficiales a CySAP para asegurar una toma de decisiones informada.

El siguiente paso será traducir estos Requisitos del Personal a Requisitos del Sistema. Obviamente, la complejidad de las tareas restantes es muy alta y requerirá la colaboración entre empresas privadas y grupos de investigación, todos ellos con una gran experiencia en el terreno de las redes.

4. Conclusiones

El grupo de trabajo propone una arquitectura consistente en los siguientes módulos:

1. Descubrimiento de la Infraestructura del Sistema de Comunicación e Información (CISID), que proporciona una interfaz a una fuente que provee de una imagen precisa y actualizada de la infraestructura CIS, mediante la continua recolección de la información sobre todos los elementos (hardware y software) que constituyen dicha infraestructura.

2. Interfaz de Ciber Sensores de Tiempo Real (CRTSI), que proporciona una interfaz a una fuente que provee de información en tiempo real de los sensores de la red.

3. Gestión de Amenazas (TM), que interpreta las amenazas mediante el análisis de la información provista por el CRTSI y otras fuentes externas de inteligencia de amenazas. Proporciona al personal de los cuarteles generales una herramienta que hace comprensibles la probabilidad y el impacto de un ataque.

4. Servicio de Gestión Dinámica de Riesgos (DRMS), que proporciona soporte para la gestión del riesgo de ciberataques. Valora la información provista por el TM, el CISID y otros sistemas externos a CySAP. El DRMS provee de información sobre las vulnerabilidades al módulo de Visualización.

5. Soporte a las Decisiones de Ciberdefensa (CDDS), que proporciona al Comandante soporte en su proceso de decisión mediante la presentación de recomendaciones integradas, fáciles de entender y orientadas a la operación en curso.

En pro de la modularidad, el paquete se define y construye encima de un módulo de Arquitectura, que soporta la separación de aspectos de los diferentes módulos de acuerdo a una estructura funcional que divide las tareas y responsabilidades en diferentes niveles.

Agradecimientos

Los autores desean dar las gracias a la Agencia Europea de Defensa (EDA) y al Mando Conjunto de Ciberdefensa de España (MCCD) por su continuo respaldo y por sus valiosos comentarios.

Referencias

1. European Union Concept for EU-led Military Operations and Missions Available online: http://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-17107-2014-INIT/en/pdf, Technical Report, 2014.
2. Vicente, E., Mateos, A., and Jiménez-Martín, A. (2014). Risk analysis in information systems: A fuzzification of the magerit methodology. *Knowledge-Based Systems*, 66:1–12.
3. Fray, I. E. (2012). A comparative study of risk assessment methods, Mehari & Cramm with a new formal model of risk assessment (FOMRA) in information systems. *Lecture Notes in Computer Science*, pages 428–442.
4. Raiyn, J. (2014). A survey of cyber attack detection strategies. *International Journal of Security and Its Applications*, 8(1):247–256.
5. Poolsappasit, N., Dewri, R., and Ray, I. (2012). Dynamic security risk management using bayesian attack graphs. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 9(1):61–74.
6. Chen, D. (2005). A DDoS attack detection method based on hidden markov model. *Journal of Computer Research and Development*, 42(9).

Sistemas de computación neuronal: Contextualización, tendencias y aplicaciones en Seguridad y Defensa

García-Laencina, Pedro J.* y Rodríguez-Bermúdez, Germán.

Centro Universitario de la Defensa en la Academia General del Aire;
pedroj.garcia@cud.upct.es (PJGL), german.rodriguez@cud.upct.es (GRB)

* Autor responsable del trabajo: pedroj.garcia@cud.upct.es

Abstract: Desde sus orígenes a mitad del siglo XX, los modelos de inteligencia computacional han permitido extraer automáticamente conocimiento a partir de datos y han sido aplicados con éxito en infinidad de contextos multidisciplinares, incluyendo la Seguridad y la Defensa. Debido a los enormes avances de las TICs (Tecnologías de la Información y las Comunicaciones), estos modelos inteligentes se deben enfrentar actualmente a problemas de naturaleza altamente compleja y cambiante. Para su resolución eficiente, se están desarrollando sistemas derivados de nuevas y emergentes técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning, ML) para redes neuronales artificiales (Artificial Neural Networks, ANNs), entre las que destacan las Máquinas de Aprendizaje Extremo (Extreme Learning Machine, ELM) y las Máquinas de Aprendizaje Profundo (Deep Learning, DL). Este trabajo describe la situación actual de los sistemas de computación neuronal y las técnicas emergentes para el diseño eficiente de ANNs, así como su contextualización y aplicaciones en el ámbito de la Seguridad y la Defensa.

Keywords: Inteligencia Computacional; Computación Neuronal; Aprendizaje Automático; Redes Neuronales Artificiales; Aprendizaje Máquina Extremo; Aprendizaje Profundo.

---

1. Introducción

En general, el aprendizaje humano consiste en adquirir, procesar, comprender y, finalmente, aplicar una información que nos ha sido previamente 'enseñada' relativa a un determinado problema o tarea que se desea resolver. Este aprendizaje se suele denominar '*aprendizaje inductivo*'. En otras palabras, dado un problema objetivo, el aprendizaje consiste en adquirir una serie de datos de entrada/salida relativos a experiencias previas en este problema. Estos datos son procesados para extraer información útil (*conocimiento*) que será utilizada para tomar decisiones o realizar estimaciones en un futuro.

El desarrollo de sistemas artificiales que sean capaces de emular las capacidades de aprendizaje del ser humano constituye todo un reto para la comunidad científica. En particular, desde sus origenes a mitad del siglo XX, la '*Inteligencia Artificial*' ("*Artificial Intelligence*", AI) [1] es el término general más utilizado para referirse a la ciencia cuyo objetivo es crear sistemas inteligentes. Sin embargo, en los últimos años se emplea mayoritariamente el término '*Inteligencia Computacional*' ("*Computational Intelligence*", CI) [2]. De hecho, la CI es una rama de la AI que consiste en el estudio de mecanismos adaptativos que permitan el comportamiento inteligente en sistemas computacionales. Las principales características de los modelos incluidos dentro de la CI son las siguientes:

- son sistemas computacionales inspirados en la biología y basados en el aprendizaje inductivo;
- son robustos y adaptativos;
- son enfocados hacia la resolución de una tarea objetivo (o incluso multiobjetivo);
- y tienen aplicaciones multidisciplinares en la sociedad, la industria y la defensa.

En este punto hay que resaltar que la CI aporta una visión complementaria y paralela a la Estadística, ya que ambas disciplinas se basan en el análisis y modelado de datos. En concreto, la mayoría de las técnicas en CI, además de ser bioinsipiradas, tienen una base estadística. Por ello, es habitual emplear el término '*Aprendizaje Máquina*' o '*Aprendizaje Automático*' ("*Machine Learning*", ML) [3,4], ya que éste engloba a los sistemas computacionales bioinspirados y a los sistemas basados en el modelado y análisis estadístico. Dentro del gran número de técnicas y modelos en ML [3,4], las Redes Neuronales Artificiales ("*Artificial Neural Networks*", ANNs) destacan por su versátilidad y su extendido uso en la práctica [5]. Este artículo pretende ofrecer una perspectiva completa de los fundamentos de la computación neuronal y las principales técnicas emergentes para el diseño de ANNs, así como su contextualización y aplicaciones en el ámbito de la Seguridad y la Defensa.

2. Fundamentos de la Computación Neuronal

Dada la naturaleza de los problemas a los que se enfrentan los sistemas de computación neuronal, es conveniente antes introducir unos conceptos básicos sobre ML y '*Reconocimiento Estadístico de Patrones*'. Tal y como se ha descrito en la sección anterior, estos sistemas son diseñados para resolver un determinado problema en base a un conjunto de datos (i.e. *aprenden en base a la experiencia*). Aunque existen problemas donde se desconocen la(s) variable(s) objetivo (i.e. *aprendizaje no supervisado*), nos centraremos en problemas de *aprendizaje supervisado*, que están definidos inicialmente por un conjunto de datos de entrada ("*input data*") y una(s) variable(s) de salida ("*targets*"). En función de la naturaleza del "*target*", podemos distinguir dos tipos de problemas:

- *Clasificación*, cuando la variable de salida es discreta;
- *Regresión*, cuando la variable de salida es continua.

Un ejemplo de un problema de clasificación es el reconocimiento de objetivos en imágenes hiperespectrales; mientras que un ejemplo de un problema de regresión es la predicción del precio del combustible JP-8 para aviación militar.

La resolución de estos problemas de clasificación o regresión siguen el esquema general de la Figura 1, donde se muestran las tres etapas principales de un sistema de reconocimiento de patrones [3]. El sensor capta la(s) señal(es) de entrada, transformándola(s) en una serie de datos numéricos, que son aptos para ser procesados. Las señales de entrada pueden pertenecer a cualquier tipo de proceso: señales eléctricas, voz, imágenes, etc. Los datos procedentes de cada medida obtenida por el sensor se pasan por una sistema de extracción de información ('*características*'), con el propósito de transformar estos datos en vectores multidimensionales que contengan información útil para el posterior diseño del modelo predictivo (tercera etapa), que en el caso de un problema de clasificación se utiliza el término '*clasificador*' para dicho modelo (véase la Figura 1). En este trabajo, el modelo predictivo de esta tercera etapa será implementado mediante una ANN.

Figure 1. Esquema básico de un sistema de reconocimiento de patrones (para clasificación).



Hay que resaltar que al finalizar la segunda etapa de extracción de características, y asumiendo que se han adquirido N muestras/medidas, se obtiene una matriz $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_n\}_{n=1}^{N}$, donde $\mathbf{x}_n = \{x_{ni}\}_{i=1}^{d}$ denota el n-ésimo vector ('*patrón*') de entrada definido por sus d dimensiones ('*características*'). Adicionalmente, y dado que son problemas de aprendizaje supervisado, se dispondrá de un vector de salidas deseadas $\mathbf{t} = \{t_n\}_{n=1}^{N}$ para cada variable objetivo. En el caso de un problema definido por múltiples "*targets*", se dispondrá de una matriz de salidas deseadas, $\mathbf{T}$, en lugar de un vector, $\mathbf{t}$. Para concluir esta sección, nótese que el diseño de la ANN será realizado a partir del '*conjunto de entrenamiento*' definido por $\mathbf{X}$ y $\mathbf{T}$. Este diseño (i.e. '*entrenamiento*') de la ANN implica la definición de su arquitectura y los hiper-parámetros de la misma mediante la optimización de una función de coste, que dependerá del tipo de problema a resolver (clasificación o regresión) [3].

2.1. Introducción a las Redes Neuronales Artificiales

Las redes de neuronas artificiales (ANNs) son modelos bastante simplificados de las redes de neuronas biológicas que forman el cerebro y, al igual que éste, una ANN intenta '*aprender*' en base a la experiencia (i.e. a los datos que se le suministran). Hasta la fecha se han propuesto diferentes tipos de sistemas de computación neuronal [5], como son los perceptrones multicapa ("*Multi-Layer Perceptron*", MLP), los mapas auto-organizativos ("*Self-Organizing Maps*", SOM), las redes de Hopfield o incluso redes más complejas derivadas de combinaciones de diferentes sistemas neuronales. Una descripción detallada de todos estos sistemas es fácilmente accesible en libros de referencia, como son [3–5]; por lo que debido a la escasez de espacio y en aras de la claridad, este trabajo se centrá en los sistemas basados en arquitecturas neuronales de tipo MLP.

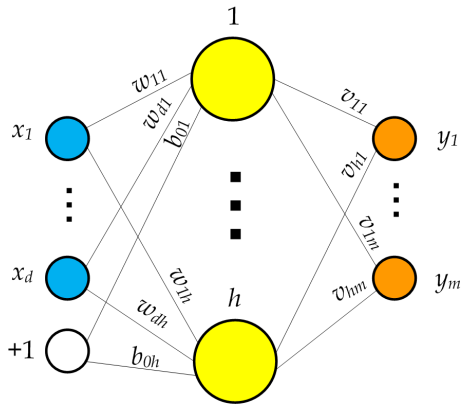
Las ANNs de tipo MLP constan de múltiples capas de unidades computacionales ('*neuronas*') interconectadas mediante '*pesos*', pudiendo aproximar cualquier función continua seleccionando adecuadamente los hiper-parámetros (pesos y número de neuronas) [3]. La Figura 2 muestra un MLP estándar, cuya arquitectura dispone de una capa oculta de h neuronas. Los pesos de la capa de entrada

conectan las d unidades de entrada con las h neuronas ocultas, mientras que una segunda capa de pesos conecta las salidas de las h neuronas ocultas con las m unidades de salida. Considerar un patrón $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \ldots, x_d]^T \in \mathbb{R}^d$, con "*target*" $\mathbf{t} = [t_1, t_2, \ldots, t_m]^T \in \mathbb{R}^m$. Así, la salida de la ANN es

$$\mathbf{y} = \sum_{j=1}^{h} \mathbf{v}_j z_j = \sum_{j=1}^{h} \mathbf{v}_j f\left(\mathbf{w}_j^T \mathbf{x} + b_j\right), \tag{1}$$

donde $\mathbf{y} = \{y_k\}_{k=1}^m$, $f(\cdot)$ es la función de activación de las neuronas ocultas, $\mathbf{v}_j = [v_{j1}, v_{j2}, \ldots, v_{jm}]^T$ son los pesos de salida asociados a la neurona oculta j-ésima, mientras que $\mathbf{w}_j = [w_{j1}, w_{j2}, \ldots, w_{jn}]^T$ y b_j representan respectivamente el vector de pesos de entrada y el sesgo correspondientes a dicha neurona. z_j es la salida de la neurona j-ésima de la capa oculta. Habitualmente, las unidades de salida tienen funciones de activación lineales, mientras que para $f(\cdot)$ se suelen emplear funciones de tipo sigmoide.

Figure 2. Arquitectura estándar de una red neuronal de tipo MLP.



Los hiper-parámetros a optimizar en la ANN durante su entrenamiento son los pesos y el número de neuronas. Generalmente, se establece un número de neuronas h, después $\mathbf{w}$ y $\mathbf{v}$ son inicializados aleatoriamente, y a partir del conjunto de datos de entrenamiento asociado al problema objeto de estudio, la ANN es entrenada mediante el algoritmo "*back-propagation*", junto con métodos de optimización (habitualmente basados en gradiente) para conseguir una buena modelización del problema ($\mathbf{y}_n \approx \mathbf{t}_n, \forall n$) y una buena capacidad de generalización (i.e. evitando el sobre-ajuste en el conjunto de entrenamiento). El tamaño óptimo de la capa oculta (h) puede seleccionarse mediante técnicas de validación cruzada [3]. Este entrenamiento requiere un proceso de optimización con múltiples iteraciones y, que junto con una búsqueda exhaustiva del parámetro h, puede suponer un elevado coste computacional en determinadas aplicaciones. Para más detalles de implementación/diseño, véase [3–5].

3. Nuevas tendencias en Redes Neuronales Artificiales

A pesar de las conocidas ventajas que han demostrado los MLPs en multitud de aplicaciones, algunos inconvenientes relacionados con su diseño han producido detractores en la comunidad científica [5]. Sin embargo, estos inconvenientes pueden ser solventados con el correcto uso de eficientes técnicas de diseño y entrenamiento de MLPs, junto con la experiencia previa del usuario en ANNs. Concretamente, en los últimos años se han propuesto dos nuevas técnicas que han revolucionado la implementación de sistemas de computación neuronal: Aprendizaje Extremo ("*Extreme Learning Machine*", ELM) y Aprendizaje

Profundo ("*Deep Learning*", DL). Debido al gran interés que han despertado ambas técnicas, éstas han generado multitud de artículos/libros científicos y de congresos/jornadas específicas.

3.1. Extreme Learning Machine (ELM)

El algoritmo ELM estándar está fundamentado en que un MLP compuesto por h neuronas, con inicialización aleatoria de los pesos de entrada de cada neurona $\mathbf{w}_j$ y unidades de salida de tipo lineal, puede teóricamente (1) modelar el conjunto de N casos de entrenamiento produciendo un error cero, siendo $N \geq h$, y (2) aproximar cualquier tipo de función continua y discriminar cualquier conjunto de clases discretas [6]. Tras asignar valores iniciales aleatorios a los pesos de entrada, se puede considerar un MLP como un sistema lineal y los pesos de salida pueden obtenerse de manera analítica mediante un simple cálculo de la pseudo-inversa de la matriz de salidas de las h neuronas ocultas. De esta forma, dado un conjunto de N patrones de entrenamiento, un MLP con h neuronas ocultas puede aproximar estos N patrones con error nulo ($\sum_{n=1}^{N} \|\mathbf{y}_n - \mathbf{t}_n\| = 0$), i.e., existen $\mathbf{v}_j$, $\mathbf{w}_j$ y b_j tal que,

$$\sum_{j=1}^{h} z_{nj}\mathbf{v}_j = \mathbf{t}_n, \quad n = 1, \ldots, N, \tag{2}$$

siendo $z_{nj} = f\left(\mathbf{w}_j^T\mathbf{x}_n + b_j\right)$. Las anteriores N ecuaciones se pueden expresar:

$$\mathbf{ZV} = \mathbf{T}, \tag{3}$$

donde $\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^{N\times h}$ es la matriz de salidas de la capa oculta de neuronas del MLP, $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{h\times m}$ es la matriz de pesos de salida, y $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{N\times m}$ es la matriz de "*targets*" de los N patrones de entrenamiento. De esta forma, el entrenamiento del MLP usando ELM viene dado por la solución del problema de mínimos cuadrados establecido en (3), es decir, los pesos óptimos de la capa de salida son

$$\hat{\mathbf{V}} = \mathbf{Z}^{\dagger}\mathbf{T}, \tag{4}$$

donde $\mathbf{Z}^{\dagger}$ es la pseudo-inversa de Moore-Penrose. ELM proporciona un entrenamiento rápido y eficiente para MLPs [6], aunque es necesario pre-establecer el número de neuronas ocultas. Dado que su solución es dependiente de la inicialización aleatoria de los pesos de la capa de entrada y estos valores iniciales aleatorios pueden ser inapropiados para algunas neuronas ocultas, las ANNs basadas en ELM necesitan un mayor número de neuronas ocultas que en el caso de ser entrenadas con otros métodos clásicos.

A partir de la versión estándar del algoritmo ELM [6], se han propuesto multitud de técnicas y procedimientos basados en el mismo [7]. Por ejemplo, podemos destacar la técnica "*Optimally Pruned ELM*" (OP-ELM) [8] que establece un número inicial muy elevado de neuronas ocultas ($h >> N$), y mediante el algoritmo "*Least Angle Regression*" (LARS) -junto con el estimador PRESS para "*Leave One Out - Cross Validation*" (LOO-CV)- elimina/poda aquellas neuronas que no son útiles para resolver el problema de mínimos cuadrados. Dos ejemplos adicionales son la combinación óptima de arquitecturas ELM [9] y el diseño automático y completo de una arquitectura ELM [10]. A día de hoy se sigue avanzando activamente en nuevos modelos basados en ELM (recientemente se ha extendido a métodos de '*kernel*") [7], así como profundizando a nivel teórico sobre sus fundamentos biológicos y computacionales [11].

3.2. Deep Learning (DL)

Como sabemos, la idea de emular el complejo sistema neuronal del cerebro en una ANN tiene décadas de antigüedad, dando lugar tanto a avances como a decepciones. Un claro ejemplo fueron las ANNs con múltiples capas ocultas de diferentes tamaños, i.e., con varios niveles consecutivos de abstracción. En principio, se consideraba posible obtener mejores prestaciones de aprendizaje con ANNs de mayor tamaño. Al respecto surgieron dos problemas principales [3,5]:

- En el entrenamiento basado en "*back-propagation*", el error se diluye exponencialmente a medida que va pasando capas hasta llegar a las unidades de entrada. En una red muy profunda - con muchas capas ocultas -, sólo las últimas capas se entrenan, ya que las primeras apenas son adaptadas.
- Cuanto más compleja es una ANN, más propensa es al fenómeno del '*sobre-ajuste*' ("*over-fitting*") en entrenamiento, lo que suele conllevar a una pobre capacidad de generalización.

Por ambas razones, se han utilizado mayoritariamente ANNs con una única capa oculta (compuesta por un número suficiente de neuronas), en lugar ANNs con muchas capas ocultas. Sin embargo, avances científicos recientes [12,13] han demostrado que, si se emplean algoritmos de diseño apropiados, una red profunda sí es capaz de obtener niveles de rendimiento superiores a los de una ANN estándar. Estas arquitecturas de DL pueden considerarse como la última generación de ANNs y están compuestas por múltiples capas de neuronas ocultas, que realizan una abstracción compleja de la información.

Las arquitecturas más habituales en DL [14–16] están basadas en Auto-Codificadores ("*Auto-Encoders*"), que se caracterizan por aprender a reproducir exactamente a la salida la misma información que recibe como entrada. Por eso, en este tipo de redes, las capas de entrada y salida siempre deben tener el mismo número de unidades. Con respecto a la capa oculta, si su tamaño es menor, se consigue una compresión de la información en dicha capa (i.e., una representación de la información en un espacio con menor dimensionalidad). Si el tamaño de la capa oculta es mayor, existe el riesgo de que se limite a replicar la información de entrada en un subconjunto de neuronas ocultas y dejando las restantes neuronas sin utilizar. Para evitarlo, se incorporan factores de dispersión y/o ruido durante el entrenamiento de los auto-codificadores. Los investigadores en DL han desarrollado arquitecturas profundas basadas en auto-codificadores apilados, entrenándolos uno a uno de manera progresiva. Una red profunda de este tipo aprende sin supervisión: sólo necesita datos y se encarga de encontrar categorías sin disponer de "*targets*". Otra característica importante es que, con este tipo de arquitecturas apiladas, se consigue entrenar eficientemente redes tan profundas como sea necesario. Con respecto a aprendizaje supervisado, se suele proceder de la siguiente forma: (1) entrenar de manera no supervisada una pila de auto-codificadores, y (2) seguidamente, componer los codificadores y continuar con un entrenamiento supervisado. Es decir, el entrenamiento supervisado, en lugar de empezar con pesos aleatorios, empieza con pesos 'útiles', especialmente para las primeras capas.

Además de los auto-codificadores, en DL existen otras alternativas como las "*Deep Belief Networks*" [14–16]. Éstas también consisten en una serie de capas entrenadas una a una -de la más específica a la más genérica- y en cada una de ellas se emplea un "*Restricted Boltzmann Machine*" en lugar de un auto-codificador. Otra arquitectura neuronal utilizada en DL son las "*Convolutional Networks*" [14–16], cuyo ámbito de aplicación principal es el reconocimiento de imágenes.

4. Aplicaciones de los Sistemas de Computación Neuronal en Seguridad y Defensa

La I+D+i sobre CI, y particularmente ANNs, ha sido siempre apoyada desde el sector de Seguridad y Defensa. Así, en la decada de los 90, EEUU subvencionó un gran número de proyectos innovadores para desarrollar sistemas de computación neuronal que fueran capaces de solventar problemas concretos de sus Fuerzas Armadas. Sin embargo, posteriormente, el término ANN pasó a estar en desuso en proyectos propios del entorno militar, llegando a tener incluso detractores por su consideración de ser una "*magic black-box*". En los últimos años, este hecho está cambiando a raiz de las elevadas prestaciones que ofrecen nuevas técnicas de diseño/implementación, como pueden ser ELM y DL. También es importante destacar la organización del prestigioso congreso "*IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications*", que anualmente atrae a un importante número de investigadores internacionales procedentes de entornos industriales, académicos y militares. A continuación, se revisan brevemente algunas aplicaciones reales de las ANNs para Seguridad y Defensa.

Tradicionalmente, una de las aplicaciones militares de las ANNs más conocidas es el reconocimiento automático de objetivos a partir de señales, imágenes y videos [17]. En el contexto de la simulación de escenarios de combate, se han empleado arquitecturas neuronales como herramientas computacionales para implementar modelos durante el desarollo de las simulaciones [18]. También conviene destacar el estudio de conflictos internacionales y la predicción de los niveles de seguridad en las naciones implicadas en dichos conflictos [19]. Un ejemplo complementario es el empleo de redes neuronales para la predicción de anomalias en plataformas terrestres, navales y áreas [20]. Por otro lado, el uso de sistemas de computación neuronal está también extendido en el ámbito de la criptografía [21]. Otro ejemplo adicional es la identificación automática de objetivos hostiles en escenarios tácticos usando patrones de movimiento [22]. Uno de los últimos campos de aplicación es la ciberdefensa [23], donde las ANNs han demostrado recientemente su utilidad para extraer información relevante a partir de los datos del tráfico de red y para la detección de intrusos [24]. Por último, destacar que arquitecturas neuronales basadas en ELM y DL se han aplicado con éxito en algunos casos prácticos recientes [24–27].

5. Conclusiones

Actualmente, la I+D+i en los sistemas de computación neuronal sigue avanzando enormente, así como las capacidades que ofrecen estos sistemas gracias a nuevas técnicas como el Aprendizaje Extremo y el Aprendizaje Profundo. La Seguridad y la Defensa es uno de los campos principales de aplicación y dispone de un amplio potencial de uso en aplicaciones de vanguardia.

Referencias

1. McCarthy, J.; Hayes, P. Some phylosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. En *Readings in Artificial Intelligence*; Standford University; 1968; pp. 463-502.
2. Duch, W. What is Computational Intelligence and where is it going? En *Challenges for Computational Intelligence*, vol. 63; Springer; 2007; pp. 1-13.
3. Bishop, C.M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, 2006.
4. Alpaydin, E. *Introduction to Machine Learning*, 3rd Edition. The MIT Press, 2010.
5. Haykin, S. *Neural Networks and Learning Machines*, 3rd Edition. Prentice Hall, 2008.

6. Huang, G.-B.; Zhu, Q.-Y.; Siew, C.-K. Extreme Learning Machine: Theory and Applications, *Neurocomputing* **2006**, *70(1-3)*, 489-501.
7. Huang, G.; Huang, G.-B.; Song, S.; You, K.; Trends in Extreme Learning Machine: A Review, *Neural Networks* **2015**, *61(1)*, 32-48.
8. Miche, Y.; Sorjamaa, A.; Bas, P.; Simula, O.; Jutten, C.; Lendasse, A. OP-ELM: Optimally Pruned Extreme Learning Machine, *IEEE Transactions on Neural Network* **2009**, *21(1)*, 158-162.
9. García-Laencina, P.J. Improving predictions using linear combination of Extreme Learning Machines, *Information Technology and Control* **2013**, *42(1)*, 86-93.
10. Bueno-Crespo, A.; García-Laencina, P.J.; Sancho-Gómez, J.-L. Neural architecture design based on extreme learning machine, *Neural Networks* **2013**, *48*, 19-24.
11. Huang, G.-B. What are extreme learning machines? Filling the gap between Frank Rosenblatt's Dream and John von Neumann's Puzzle, *Cognitive Computation* **2015**, *7*, 263-278.
12. Hinton, G. E.; Salakhutdinov, R. R. Reducing the dimensionality of data with neural networks, *Science*, **2006**, *313 (5786)*, 504 - 507.
13. Hinton, G. E. Learning multiple layers of representation, *Trends in Cognitive Sciences*, **2007**, *11 (10)*, 428-434.
14. Bengio, Y. Learning Deep Architectures for AI, *Foundations and Trends in Machine Learning*, **2009**, *2 (1)*, 1-127.
15. LeCun, Y.; Bengio, Y.; Hinton G. E. Deep Learning, *Nature*, **2015**, *521*, 436-444.
16. Schmidhuber, J. Deep learning in neural networks: An overview, *Neural Networks*, **2015**, *61*, 85-117.
17. Lupo, J.C. Defense Applications of Neural Networks, *IEEE Communications Magazine*, **1989**, *November*, 82-98.
18. Kilmer, R. A. Applications of Artificial Neural Networks to Combat Simulations, *Mathl. Comput. Modelling*, **1996**, *23 (1/2)*, 91-99.
19. Andreou, A. S.; Zombanakis, G. A. *A Neural Network Measurement of Relative Military Security: The Case of Greece and Cyprus*, University of Cyprus, 2001.
20. Brotherton, T.; Johnson T. Anomaly Detection for Advanced Military Aircraft Using Neural Networks, **2001**, 3113-3124.
21. Kanter, I.; Kinzel, W. The Theory of Neural Networks and Cryptography, *Quantum Computers and Computing*, **2005**, *5(1)*, 130-140
22. Biswas, S.; Nene, M. J. Hostile Intent Identification by Movement Pattern Analysis Using Artificial Neural Networks, *Proc. 3rd IEEE International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing*, **2014**.
23. Tyugu, E. Artificial Intelligence in CyberDefense, *Proc. 3rd International Conference on Cyber Conflict*, **2011**, 95-105.
24. Xiang, J.; Westerlund, M.; Sovilj, D.; Pulkkis, G. Using extreme learning machine for intrusion detection in a big data environment, *Proc. of the 2014 Workshop on Artificial Intelligent and Security Workshop*, **2014**, 73-82.
25. Kan, E.; Lim, M.; Ong, Y.; Tan, A.; Yeo, S. Extreme learning machine terrain-based navigation for unmanned aerial vehicles, *Neural Computing and Applications*, **2013**, *22 (3-4)*, 469-477.
26. Ding, X.J.; Lei, M. Optimization ELM Based on Rough Set for Predicting the Label of Military Simulation Data, *Mathematical Problems in Engineering*, **2014**, Article ID 706178 (8 pages).
27. Stone, K.; Keller, J.M. Convolutional neural network approach for buried target recognition in FL-LWIR imagery, *Proc. Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XIX*, **2014**.

Proyecto EYES. Mejorar la seguridad en vuelo desarrollando nuevos métodos de evaluación basados en medidas neuroergonómicas

Di Stasi, Leandro L. [1, 2, 3]*, Diaz-Piedra, Carolina [1, 3*], Cardenas, David[4], Fuentes, Luis J.[5], Rios, Francisco[6], Cherino, Alberto[7], Suarez, Juan[8], Catena, Andrés[1]

[1] Centro de Investigación Mente, Cerebro y Comportamiento (CIMCYC), Universidad de Granada. Emails: distasi@ugr.es (LLDS); dipie@ugr.es (CDP); acatena@ugr.es (AC)

[2] Centro Mixto Universidad de Granada-Mando de Adiestramiento y Doctrina (CEMIX UGR-MADOC)

[3] College of Nursing and Health Innovation, Arizona State University, Phoenix, Arizona, USA

[4] Instituto Mixto Universitario "Deporte y Salud" (iMUDS), Universidad de Granada. Email: dcardena@ugr.es (DC)

[5] Laboratorio de Neurociencia Cognitiva, Universidad de Murcia. Email: lfuentes@um.es (LF)

[6] Centro de Instrucción de Medicina Aeroespacial (CIMA), Ejército del Aire. Email: friotej@oc.mde.es (FR)

[7] Batallón de Helicópteros de Ataque I (BHELA I) y Centro de Simulación de las Fuerzas Aeromóviles del Ejército de Tierra (CESIFAMET), Base "Coronel Sánchez Bilbao" de Almagro. Email: achemun@et.mde.es (AC)

[8] Jefatura de Operaciones Aéreas Especiales y Recuperación de Personal, Ejército del Aire. Email: jsuayan@ea.mde.es (JS)

***** Autores Principales y responsables del trabajo; E-Mail: distasi@ugr.es (LLDS); dipie@ugr.es (CDP)

Abstract: Los accidentes en el contexto militar ocurren por la acumulación de múltiples factores, incluida la inexperiencia del combatiente y la consiguiente sobrecarga mental. En este proyecto se está desarrollando un conjunto de pruebas neuroergonómicas, basadas en la monitorización psicofisiológica del combatiente, con el objetivo de mejorar su bienestar integral y reducir los errores en los procesos de instrucción y operaciones. Se han registrado los movimientos oculares y la actividad cerebral de pilotos militares en entornos simulados/reales de alto estrés, como procedimientos de emergencia o vuelos instrumentales de larga duración, para estimar el impacto negativo de estos estresores en la seguridad del vuelo. Además, se han evaluado el rendimiento y los niveles subjetivos de

fatiga, carga mental y activación. Los movimientos oculares (e.g. velocidad de la mirada o diámetro de la pupila) han mostrado ser una medida sensible para detectar cambios en el estado cognitivo debido tanto a la complejidad de la tarea como a la fatiga acumulada. Por su parte, los análisis de potencia espectral de la actividad cerebral mostraron la diferente complejidad de las maniobras según el nivel de carga cognitiva, con una menor potencia asociada a procedimientos monótonos. La combinación de estas dos medidas ha demostrado ser una fuente inestimable de información para la mejora del entrenamiento de los pilotos de las Fuerzas Armadas Españolas.

Keywords: Carga mental; Electroencefalografía; Error humano; Fatiga; Instrucción aérea; Movimientos oculares; Piloto; Psicofisiología; Sácadas

1. Introducción

Es universalmente reconocido que el 80% de los accidentes aéreos implican factores humanos [1]. Así, la dimensión humana es un factor determinante que produce, pero que también puede evitar, la ocurrencia final de estos accidentes [2]. Reducir estos errores es unos de los retos prioritarios para los ejércitos del tercer milenio. Tradicionalmente, los expertos en factores humanos y de gestión de riesgos han utilizado autoinformes para evaluar las demandas impuestas a los pilotos, así como para evaluar su rendimiento [3]. Dichos autoinformes son fáciles de administrar e interpretar, pero no permiten la evaluación continua del rendimiento del piloto, presentan una sensibilidad insuficiente para detectar pequeñas variaciones en las demandas de trabajo y ciertos factores personales y motivacionales pueden sesgar las respuestas [4]. De esta forma, la evaluación sensible y objetiva de las demandas del vuelo, así como del rendimiento en escenarios reales/simulados, sigue siendo un reto en la aviación civil y militar [5].

La habilidad para monitorizar de forma continuada [6] el estado psicofísico del combatiente y para evaluar de forma fiable la interacción hombre-máquina desempeñará un papel clave en la mejora del diseño de programas de entrenamiento militar y de nuevos sistema de armas. Para ello, la evaluación (neuro)ergonómica más puntera integra diferentes metodologías y tecnologías avanzadas. En particular, los movimientos oculares [7] y la actividad cerebral [8] son actualmente las medidas más fiables para conocer el desempeño del operador de forma objetiva. Por ejemplo, en contextos de laboratorio [5,9] y otros no relacionados con la aviación (cirugía [4], conducción [10-12] o control del tráfico aéreo [13,14]), se ha visto que la fatiga (debida al tiempo de la tarea) está asociada a un decremento de la velocidad sacádica (parámetro ocular que no está bajo control voluntario). Por su parte, a pesar del temprano interés suscitado [15], los estudios de registro electroencefalográfico (EEG) durante el vuelo son escasos [16]. La mayor parte de la investigación ha tenido lugar en aeronaves de ala fija y se han limitado a evaluar las maniobras específicas en vuelo, no habiendo estudios sobre maniobras complejas y peligrosas, tales como el despegue y el aterrizaje [17].

Con estos estudios se pretende determinar el efecto de la complejidad y duración del vuelo, sobre los movimientos oculares y la actividad cerebral de pilotos militares de helicópteros de las Fuerzas Armadas Españolas mientras realizan vuelos reales/simulados.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1. Estudio I: Detección del estado atencional del piloto en vuelo real mediante EEG

Los participantes fueron 8 pilotos militares, alumnos de la Base Aérea de Armilla (alféreces del Ejército del Aire, edad: 25,0±2,0 años; altura: 178,0±4,9 cm; peso: 80,0±6,3 kg, horas de vuelo: 160±25). Los participantes volaron en el helicóptero Sikorsky S-76 durante 1 hora (lección 6 del módulo de vuelo instrumental básico). Antes y después del vuelo, se evaluó la fatiga percibida (Borg Scale, BORG [18]) y la somnolencia (Standford Sleepiness Scale, SSS [19]). Durante el vuelo, se grabó la actividad cerebral utilizando el electroencefalógrafo SOMNOwatch plus EEG-6 en F3, F4, C3 y C4, referenciados a los mastoides (frecuencia de muestreo: 256 Hz). Después del vuelo, el instructor evaluó el rendimiento del piloto. El registro EEG se segmentó en cuatro épocas de 15 minutos: despegue (S1), épocas de maniobras en el aire (S2 y S3) y aterrizaje (S4). Cada época a su vez se dividió en segmentos de 4 segundos. Se realizó el análisis espectral de estos segmentos para calcular la potencia espectral de las bandas δ (0,5-4 Hz), θ (4,0-8 Hz), α (8,0-13 Hz) y β (13,0-30 Hz). Se llevó a cabo un ANOVA de medidas repetidas [4 (*época de vuelo*) x 4 (c*anal*) x 4 (*banda de frecuencia*)].

2.2. Estudio II: Hacia un detector de fatiga basado en los movimientos oculares

Los participantes fueron 5 pilotos militares, alumnos de la Base Aérea de Armilla (pilotos del Ejército de Tierra y la Armada, edad: 27,6±1,7 años; altura: 180,4±5,8 cm; peso: 79,6±7,5 kg, horas de vuelo: 107±22). Los participantes volaron en el helicóptero Sikorsky S-76 durante más de 2 horas (≈150 min) (lecciones de radio-ayuda del módulo de vuelo instrumental avanzado). Antes y después del vuelo, se evaluó la fatiga percibida (BORG) y la somnolencia (SSS), así como su dinámica oculomotora a través de una tarea de seguimiento [20] utilizando el sistema de *eye-tracking* EyeLink 1000 en su configuración de escritorio (frecuencia de muestreo: 500 Hz). Durante la tarea, el participante debe seguir un punto de fijación que "salta" de un punto a otro de la pantalla durante 15 min. Del registro de movimientos oculares se eliminaron parpadeos y semi-parpadeos y se identificaron las sácadas de tipo binocular. Para cada sácada, se promediaron los valores del ojo izquierdo y derecho para obtener el pico de velocidad máxima y su magnitud y se obtuvo la correspondiente relación pico de velocidad máxima-magnitud (*main sequence*) cuya pendiente se vería afectada por el tiempo de vuelo. Se llevó a cabo una prueba de Wilcoxon para medidas relacionadas.

2.3 Estudio III: Efectos de las emergencias en vuelo sobre el estado atencional del piloto

Los participantes fueron 13 pilotos militares, oficiales y suboficiales del Batallón de Helicópteros de Ataque I (BHELA I) de la Base de Almagro (edad: 38,5±5,5 años; altura: 178,8±5,7 cm; peso: 79,7±9,1 kg, horas de vuelo: 1775,1±846,1). Los participantes volaron en el simulador del helicóptero Tigre (CESIFAMET, Almagro, Ciudad Real) durante aproximadamente 1 hora realizando su entrenamiento en situaciones de emergencia. Durante el entrenamiento, se realizó 1 vuelo de reconocimiento y, a continuación, se presentaron 6 situaciones de emergencia de distinta dificultad. El entrenamiento finalizaba con otro vuelo de reconocimiento. Los pilotos no conocían de antemano las emergencias a practicar. Después de cada emergencia, se evaluó la carga mental subjetiva (NASA

Task Load Index, NASA [21]). Durante todo el vuelo, se registraron los parámetros oculares utilizando el sistema de *eye-tracking* Tobii Glasses 2.0 (frecuencia de muestreo: 30 Hz). Se comparó el diámetro pupilar durante la emergencia más compleja y el tráfico para volver (vuelo sin emergencia, pero similar en cuanto a tiempo de vuelo acumulado en la sesión). Se llevó a cabo una prueba *t* de Student para medidas relacionadas.

3. Resultados y Discusión

3.1. Estudio I: Detección del estado atencional del piloto en vuelo real mediante EEG

Se pretendía comprobar la sensibilidad de la potencia espectral del EEG -durante el vuelo- para detectar variaciones del estado atencional del piloto relacionadas a la complejidad de la fases de vuelo (S1 y S4, despegue y aterrizaje, alta complejidad; S2 y S3, maniobras aéreas, baja complejidad) (Figura 1.A).

La interacción *época de vuelo* y *banda de frecuencia* fue significativa, $F(9, 63) = 9{,}91$, $p < 0{,}01$ (Figura 1). Las bandas de alta frecuencia eran distintas dependiendo de la *época del vuelo*, α, $F(3, 21) = 9{,}05$, $p < 0{,}01$; and β, $F(3, 21) = 18{,}61$, $p < 0{,}01$. Las comparaciones post-hoc indicaron que la potencia de α fue mayor para S1 que para S2 y S3. La potencia de β fue mayor para S1 que para S2, S3 y S4 y también para S2 frente S3. Los niveles percibidos de fatiga y de somnolencia permanecieron estables tras el vuelo, $p > 0{,}05$. El rendimiento de los pilotos fue satisfactorio (>5; $\bar{X} = 7{,}7 \pm 0{,}6$).

Estos hallazgos sugieren que es posible monitorizar en tiempo real y con un alto nivel de fiabilidad el estado atencional de los pilotos en ambientes extremos [22].

3.2. Estudio II: Hacia un detector de fatiga basado en los movimientos oculares

Se pretendía conocer si el tiempo de vuelo, una variable que se presupone asociada a un incremento de fatiga, afecta a la velocidad sacádica en pilotos militares (Figura 1.B).

La pendiente de la relación pico de velocidad sacádica-amplitud sacádica (conocida como secuencia principal) disminuyó tras un vuelo instrumental avanzado de ≈150 min, $Z = 2{,}0226$, $p = 0{,}043$, lo que implica una disminución de la velocidad sacádica. Los niveles percibidos de fatiga y de somnolencia permanecieron estables tras el vuelo, $Z = 1{,}2780$, $p = 0{,}201$ y $Z = 0{,}801$, $p = 0{,}422$, respectivamente.

Estos resultados muestran la sensibilidad de la velocidad de los movimientos oculares para la detección de estado de fatiga en población militar.

3.3. Estudio III: Efectos de las emergencias en vuelo sobre el estado atencional del piloto

Se pretendía comprobar la sensibilidad de una medida basada en el diámetro pupilar -un índice del grado de procesamiento cognitivo [23]- para detectar las variaciones del estado atencional de los pilotos al enfrentarse a situaciones de emergencias en vuelo simulado (i.e. emergencia fallo de rotor de cola vs. vuelo sin emergencia) (Figura 1.C).

El diámetro pupilar fue mayor durante el vuelo con la emergencia más compleja, $t(12) = 4{,}444$, $p < 0{,}001$. La carga mental subjetiva también fue mayor durante el vuelo con emergencia, $\bar{X} = 58{,}9 \pm 14{,}7$, que durante el vuelo sin emergencia, $\bar{X} = 24{,}8 \pm 11{,}1$; $t(12) = 7{,}960$, $p < 0{,}001$.

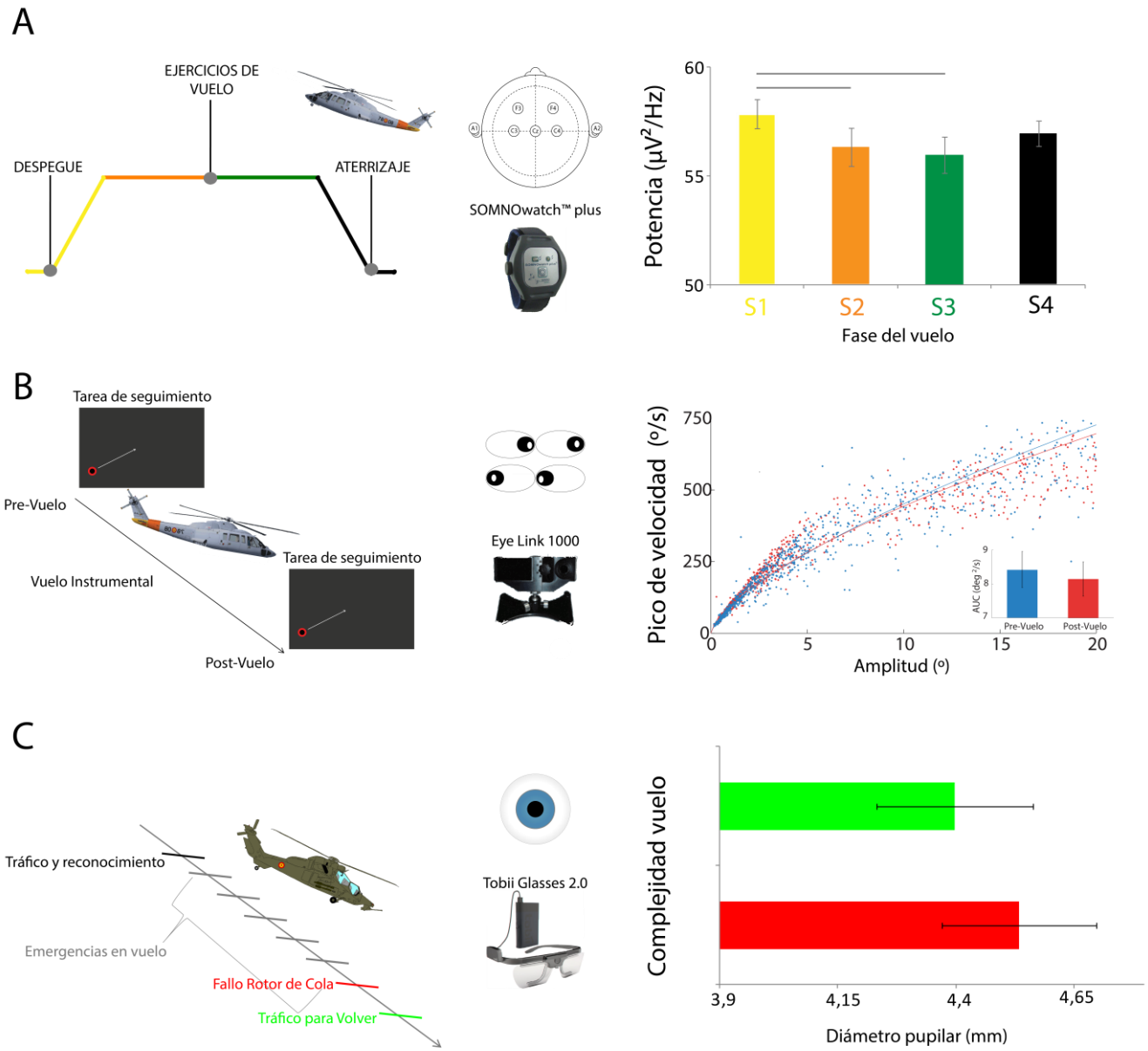


Figura 1. A) Izquierda: Esquema gráfico del diseño experimental y dispositivo de medida, Derecha: La potencia espectral del registro electroencefalográfico (que refleja el número de neuronas que descargan de forma síncrona en un momento dado) varió según la complejidad de la maniobra: las maniobras más complejas (despegue y aterrizaje) requerían más actividad cognitiva (i.e. esfuerzo). **B)** Izquierda: Esquema gráfico del diseño experimental y dispositivo de medida, Derecha: Representación gráfica de la secuencia principal de la relación amplitud-pico de velocidad en uno de los pilotos. Cada punto representa una sácada (azul: pre-vuelo, rojo: post-vuelo). La velocidad sacádica disminuyó tras el vuelo en la tarea de seguimiento (gráfico de barras). **C)** Izquierda: Esquema gráfico del diseño experimental y dispositivo de medida, Derecha: La emergencia #6, fallo del rotor de cola, i.e. situación de mayor complejidad, provocaba un incremento del diámetro pupilar respecto al vuelo sin emergencia (i.e. tráfico para volver).

4. Conclusiones

La acción militar es compleja por naturaleza y, por ello, operar de manera segura impone demandas cognitivas y atencionales esenciales. Así, tanto las situaciones de infracarga (e.g. tareas monótonas) como las de sobrecarga atencional (e.g. tareas de complejidad y/o presión temporal excesiva) conllevan, en la mayoría de los casos, un deterioro del rendimiento en la ejecución. En este trabajo se ha presentado una serie de estudios cuyo objetivo era validar medidas fisiológicas (basadas en los movimientos sacádicos y la potencia espectral del EEG) y tecnologías de última generación (fundamentalmente, *eye-trackers* y electroencefalógrafos portables) para la monitorización continuada del estado atencional de los pilotos de helicópteros de las Fuerzas Armadas Españolas. Para ello, hemos estudiado el efecto de la complejidad de la tarea en pilotos en instrucción (estudio #1) y en pilotos de combate experimentados (estudio #3) y el efecto de la fatiga por el tiempo de vuelo (estudio #2), tanto en situaciones de vuelos reales como simulados. Los resultados obtenidos apuntan a que las variaciones del estado atencional del piloto, tanto un bajo nivel de alerta (debido a la fatiga) como un alto nivel de alerta (debido a la complejidad de la maniobra), pueden ser fácilmente detectables, utilizando la instrumentación adecuada, mediante la monitorización de los parámetros oculares y de la actividad cerebral. De esta forma, la capacidad de monitorizar de forma continuada el estado atencional desempeñaría un papel clave en la mejora de la seguridad de vuelo (e.g., desarrollo de cascos inteligentes, cajas negras fisiológicas) y de los programa de entrenamiento militar (e.g. instrucción basada en realidad aumentada utilizando estrategias de observación experta).

Nuestros hallazgos representan un avance significativo para la mejora de los estándares *fitness-for-duty* y pueden contribuir a reducir los errores y accidentes debidos a la infracarga o la sobrecarga cognitiva al proporcionar recomendaciones basadas en la evidencia científica para las nuevas normas de vuelos y entrenamiento. Además, nuestros resultados tienen el potencial de reducir la distancia entre la ciencia aplicada y la básica [24], proporcionando a los servicios de medicina aeroespacial información relevante para el desarrollo de sistemas de soporte del entrenamiento fisiológico convencional (por ejemplo, un detector temprano de hipoxia normobárica basado en los índices aquí validados). Para concluir, gracias a los nuevos dispositivos de registro, poco intrusivos y de bajo coste [25,26], el desarrollo de una herramienta de evaluación neuroergonómica basada en las tecnologías aquí presentadas es factible. En conclusión, el concepto de "monitorización psicofisiológica del combatiente" [27,28] se traducirá en una realidad útil para las Fuerzas Armadas, permitiendo mejorar la seguridad en vuelo y el proceso de entrenamiento al tomar las medidas correctivas necesarias.

Agradecimientos

Este proyecto está financiado por el CEMIX UGR-MADOC (Proyecto PINS 2014-16 dirigido por L. L. Di Stasi y C. Diaz-Piedra y PINS 2014-11 dirigido por D. Cárdenas) y por el Plan Nacional de Investigación (DEP2013-48211-R dirigido por D. Cárdenas). L. L. Di Stasi está financiado por el programa Talentia Postdoc de la Agencia Andaluza del Conocimiento de la Junta de Andalucía, cofinanciado por el Séptimo Programa Marco de la Comunidad Europea, Acciones Marie Skłodowska-Curie (COFUND – Acuerdo nº267226) y por la Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y

Empleo de la Junta de Andalucía. C. Díaz-Piedra está financiada por el Programa de Perfeccionamiento de Doctores de la Universidad de Granada (Plan Propio de Investigación 2013).

Referencias

1. Thomas, M.L.; Russo, M.B. Neurocognitive monitors: Toward the prevention of cognitive performance decrements and catastrophic failures in the operational environment. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* **2007**, *78*, B144–B152.
2. Reason J. *Human error.* Cambridge University Press: New York, 1990.
3. Young, M.S.; Stanton, N.A. Mental workload: theory, measurement, and application. *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors* **2001**, *1*, 507–509.
4. Di Stasi, L.L.; McCamy, M.B., Macknik, S.L.; Mankin, J.A., Hooft, N.; Catena, A.; Martinez-Conde, S. Saccadic eye movement metrics reflect surgical residents' fatigue. *Annals of Surgery* **2014**, *259*, 824–829.
5. Di Stasi, L.L.; McCamy, M.B.; Catena, A.; Macknik, S.L.; Cañas, J.J.; Martinez-Conde, S. Microsaccade and drift dynamics reflect mental fatigue. *European Journal of Neuroscience* **2013**, *38*, 2389–2398.
6. Friedl, K.E.; Allan, J.H. *USARIEM: Physiological research for the warfighter*. DTIC Document, 2004.
7. Di Stasi, L.L.; Catena, A.; Cañas, J.J.; Macknik, S.L.; Martinez-Conde, S. Saccadic velocity as an arousal index in naturalistic tasks. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* **2013**, *37*, 968–975.
8. Borghini, G.; Astolfi, L.; Vecchiato, G.; Mattia, D.; Babiloni, F. Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* **2014**, *44*, 58–75.
9. Di Stasi, L.L.; Antolí, A.; Cañas, J.J. Main sequence: an index for detecting mental workload variation in complex tasks. *Applied Ergonomics* **2011**, *42*, 807–813.
10. Di Stasi, L.L.; Renner, R.; Staehr; P.; Helmert, J.R.; Velichkovsky, B.M.; Cañas, J.J.; Catena, A.; Panas, S. Saccadic peak velocity sensitivity to variations in mental workload. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* **2010**, *81*, 413–417.
11. Di Stasi, L.L.; Renner, R.; Catena, A.; Cañas, J.J.; Velichkovsky, B.M.; Pannasch, S. Towards a driver fatigue test based on the saccadic main sequence: A partial validation by subjective report data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **2012**, *21*, 122–133.
12. Di Stasi, L.L.; McCamy, M.B.; Pannasch, S.; Renner, R.; Catena, A.; Cañas, J.J.; Velichkovsky, B.M.; Martinez-Conde, S. Effects of driving time on microsaccadic dynamics. *Experimental Brain Research* **2015**, *233*, 599–605.
13. Marchitto, M.; Di Stasi, L.L.; Cañas, J.J. Ocular movements under taskload manipulations: Influence of geometry on saccades in air traffic control simulated tasks. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries* **2012**, *22*, 407–419.
14. Di Stasi, L.L.; Marchitto, M.; Antolí, A.; Baccino, T.; Cañas, J.J. Approximation of on-line mental workload index in ATC simulated multitasks. *Journal of Air Transport Management* **2010**, *16*, 330–333.

15. Sem-Jacobsen, C.W.; Nilseng, O.; Patten, C.; Eriksen, O. Electroencephalographic recording in simulated combat flight in a jet fighter plane; the pilot's level of consciousness. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* **1959**, *11*, 154–155.
16. Caldwell, J. A. Electroencephalographic indicators of impaired aviator status during sleep deprivation. In National Research Council (Ed.), *Monitoring metabolic status: Predicting decrements in physiological and cognitive performance*. The National Academies Press: Washington, DC, USA, 2004, pp. 392–400.
17. Caldwell, J.A.; Kelly, C F.; Roberts, K.A.; Jones, H.D.; Lewis, J.A. *A comparison of EEG and evoked response data collected in a UH-1 helicopter to data collected in a standard laboratory environment (No. 97-30)*. U.S. Army Aeromedical Research Laboratory, Fort Rucker, AB, USA, DTIC Document,1997.
18. Borg, G. *Borg's perceived exertion and pain scales*. Human Kinetics Publishers: Champaign, IL, USA, 1998.
19. Hoddes E.; Zarcone V.; Smythe H.; Phillips, R.; Dement, W. C. Quantification of sleepiness: a new approach. *Psychophysiology* **1973**, *10*, 431–436.
20. Di Stasi, L.L.; Cabestrero, R.; McCamy, M.B.; Ríos, F.; Catena, A.; Quirós, P.; Lopez, J.A.; Saez, C.; Macknik, S.L.; Martínez-Conde, S. Intersaccadic drift velocity is sensitive to short-term hypobaric hypoxia. *European Journal of Neuroscience* **2014**, *39*, 1384–1390.
21. Hart, S.G.; Staveland, L.E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology* **1988**, *52*, 139–183.
22. Di Stasi, L.L.; Diaz-Piedra, C.; Suárez, J.; McCamy, M.B.; Martinez-Conde, S.; Roca-Dorda, J.; Catena, A. Task complexity modulates pilot electroencephalographic activity during real flights. *Psychophysiology* **2015**, *52*, 951–956. doi:10.1111/psyp.12419
23. Kahneman, D. *Attention and effort*. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, USA, 1973.
24. Tracey, I.; Flower, R. The warrior in the machine: neuroscience goes to war. *Nature Reviews Neuroscience* **2014**, *15*, 825–834.
25. Morales, J.M.; Díaz-Piedra, C.; Di Stasi, L.L.; Martínez-Cañada, P.; Romero, S. Low-cost remote monitoring of biomedical signals, In *Artificial Computation in Biology and Medicine*; J.M.F. Vicente, J.R. Álvarez-Sánchez, F. de la P. López, F.J. Toledo-Moreo, H. Adeli (Eds.); Springer International Publishing: Elche, Spain, 2015, pp. 288–295.
26. Morales, J.M.; Di Stasi, L.L.; Diaz-Piedra, C.; Morillas, C.; Romero, S. Real-time monitoring of biomedical signals to improve road safety, In *Advances in Computational Intelligence*; I. Rojas, G. Joya, A. Catala (Eds.); Springer International Publishing: Palma de Mallorca, Spain, 2015, pp. 89–97.
27. Friedl, K.E. Is it possible to monitor the warfighter for prediction of performance deterioration? In *Workshop on Operational Fatigue. Technical Report RTO-HFM/WS-151*. Research and Technological Organization: North Atlantic Treaty Organization, Neuilly-sur-Seine Cedex, France, 2008, pp. 7.1-7.10.
28. Friedl, K.E.; Allan, J.H. Physiological research for the warfighter – the U.S. Army Research Institute of Environmental Medicine. *U.S. Army Medical Department Journal* **2003**; Oct-Dec: 33-44

OZONO TROPOSFÉRICO EN EL CENTRO NACIONAL DE ADIESTRAMIENTO DE SAN GREGORIO Y SU ENTORNO

Escudero Tellechea, Miguel [1,*], **Tapia Júdez, Óscar** [1], **Lozano Rojo, Álvaro** [1], **Hierro Álvarez, Juan Pablo** [1], **del Valle Melendo, Javier** [1] **y Mantilla Iglesias, Enrique** [2]

[1] Centro Universitario de la Defensa (CUD) de Zaragoza, Academia General Militar, Ctra. de Huesca s/n, E-50090 Zaragoza, España

[2] Instituto Universitario Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM-UMH), Parque Tecnológico C/Charles R. Darwin 14, E-46980 Paterna, España

* Autor responsable del trabajo; mescu@unizar.es

Abstract: Los niveles de O_3 troposférico en el campo de maniobras del CENAD San Gregorio y su entorno se han estudiado en el periodo Abril-Octubre de 2014. Para ello se ha contado con concentraciones obtenidas de monitores automáticos y de sistemas de captación pasiva. La zona de estudio posee una características geo-climáticas proclives a la formación de O_3 en verano y el nivel de exposición a la población es reseñable. Se han observado niveles promedio elevados especialmente en las zonas centrales del campo de maniobras en donde no hay emisiones de NO mientras que en el valle del Ebro y en Zaragoza las concentraciones han sido más bajas. Se ha analizado en detalle un episodio extremo de O_3 observando posibles aportes externos desde el País Vasco, y el oeste Europeo durante el mismo.

Keywords: CENAD San Gregorio; AGM; Ozono troposférico; Dosimetría; Zaragoza

---

1. Introducción

El ozono (O_3) troposférico es un gas oxidante presente en la atmósfera cuyo principal origen es una compleja interacción de gases precursores como los óxidos de nitrógeno ($NO_x = NO_2 + NO$) y los compuestos orgánicos volátiles (COV_s) en presencia de luz solar [1]. Se han detallado efectos negativos del O_3 sobre la salud en forma de aumento de la morbilidad y mortalidad, alteraciones en el sistema respiratorio y, en menor medida, sobre el sistema cardiovascular [5] que se ven agravados en personas que realizan ejercicio físico intenso o en individuos con enfermedades previas como el asma. También

se han detallado efectos nocivos sobre la vegetación y los cultivos [2] y los materiales [3] así como un efecto climático alterando el balance radiativo de la Tierra [4].

Se han registrado altos niveles de O_3 en distintas regiones Europeas [6,7] pero es en la cuenca Mediterránea donde los niveles son más extremos por diversas razones. La intensa insolación, las altas temperaturas y la baja pluviometría en época de verano dan lugar a tasas elevadas de formación de ozono. Asimismo, la particular orografía de la Península Ibérica genera episodios de recirculación y envejecimiento de masas de aire que favorecen la elevación de los niveles de O_3 [8]. Estos eventos ocurren con frecuencia en verano en circunstancias de estabilidad sinóptica debido al desplazamiento del anticiclón de las Azores sobre el Mediterráneo occidental. Por otro lado, las importantes emisiones de precursores en el centro y norte de Europa generan altas concentraciones de O_3 cuando alcanzan la cuenca Mediterránea [9]. Por último, los habituales incendios forestales que ocurren en verano en el sur de Europa son responsables de aumentar las concentraciones de ozono [10].

De acuerdo a diferentes estudios [11–13] en España se constata una tendencia creciente de los niveles de O_3 en zonas urbanas y suburbanas mientras que en las zonas rurales no se observan tendencias reseñables. Esta situación responde a la deriva en las emisiones de NO_x en Europa debido a la introducción desde los 90 de nuevas tecnologías en los vehículos basadas en los estándares EURO que han reducido de manera eficiente las emisiones de NO_x [14]. Sin embargo, los niveles en aire ambiente de óxidos de nitrógeno totales sólo muestran una ligera tendencia decreciente mientras que los de NO_2 crecen en las ciudades. La principal razón para esta paradoja es el uso creciente de catalizadores de oxidación en vehículos diesel que son en la actualidad mayoritarios en la flota de transporte a nivel Europeo [15]. De manera resumida, la reducción de emisiones de NO_x ha recaído en las emisiones de la especie que destruye de ozono (NO) y no en la productora (NO_2). Añadido lo anterior, se han reducido las emisiones de NO_x de tráfico rodado en ciudades de España asociadas a la crisis económica y a la puesta en marcha de planes y medidas de reducción de emisiones contaminantes [12,13]. Así pues, se debe poner atención sobre las concentraciones en zonas urbanas y suburbanas donde existe una exposición a la población más elevada que en zonas rurales y que han sido menos estudiadas. En particular, Zaragoza y su entorno poseen unas características climáticas que, junto a una fuerte exposición a emisiones de precursores de zonas industriales y aglomeraciones urbanas, hacen que los niveles de ozono sean altos en época estival [12].

El presente estudio se centra en caracterizar y discutir la variabilidad espacio-temporal de los niveles de O_3 en Zaragoza, el campo de maniobras del Centro Nacional de Adiestramiento (CENAD) San Gregorio y su entorno en época estival. La relevancia de este estudio es alta ya que el CENAD es empleado intensivamente para la realización de maniobras tanto del ejército español como de otros países. Por otro lado, en la zona este y al sur del CENAD se encuentran acuartelamientos (Agrupación de apoyo logístico 41, Brigada de caballería Castillejos II, Agrupación de sanidad n° 3 y el Regimiento de Pontoneros y Especialidades de Ingenieros n° 12) y la Academia General Militar (AGM) lo que supone que varios miles de personas viven o trabajan en el entorno del CENAD. Además, la mayoría de esas personas realizan en el ámbito de su actividad profesional actividad física intensa en el área.

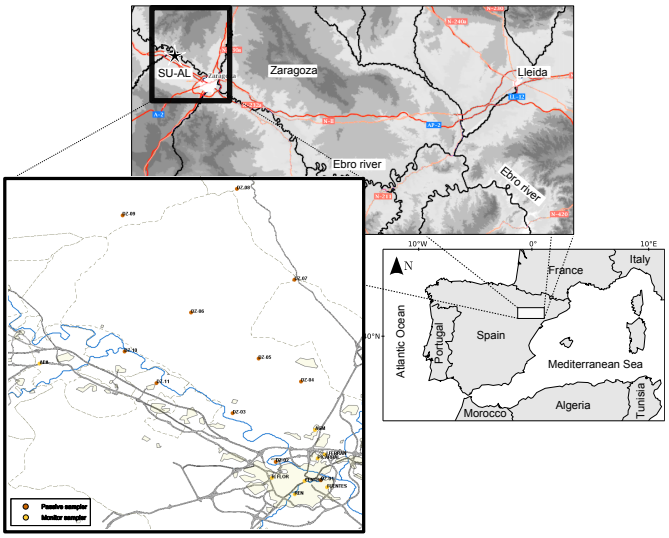
2. Materiales y métodos. Sección Experimental

2.1. Área de estudio

El valle del Ebro Central en una ancha canalización natural delimitada orográficamente por los Pirineos en el norte, la cordillera Ibérica en el sur y las cadenas costero-catalanas en el este. El clima es semi-árido Mediterráneo (unos 315 mm/año de precipitación) caracterizado por una escasa pluviometría y temperaturas extremas. La circulación predominante sigue el eje del valle y alterna la dirección NW como más frecuente y la SE más irregular y con menos intensidad. Las principales fuentes de contaminantes en la zona son, por un lado, el tráfico con vías principales como las autopistas/autovías A-2, AP-2, A-68, AP-68, AP-15 y A23 y la industria de producción de energía con hasta 7 Centrales de Ciclo Combinado que aprovechan el agua del río para su refrigeración. El valle del Ebro también está expuesto a la llegada de contaminantes desde zonas densamente pobladas (áreas metropolitanas de Madrid, Barcelona, Valencia o Bilbao) o industrializadas (costa Mediterránea y País Vasco) a lo que se añade la intensa actividad agrícola y ganadera existente en el entorno.

Zaragoza (área metropolitana de unos 750000 habitantes) es la principal ciudad del valle del Ebro (Figura 1). En los últimos años, además de una clara caída en la construcción de obra pública, ha sufrido una gran transformación en la movilidad debido a la construcción de vías de circunvalación y de una línea de tranvía norte-sur que ha llevado asociada una reorganización del tráfico en el centro que, junto a la crisis económica, ha dado como resultado una reducción del tráfico de un 28.3% en el centro de la ciudad y de un 14.5% en las vías de entrada a la misma [16]. El campo de maniobras del CENAD San Gregorio comprende una extensa zona de más de 34000 Ha. ubicada al noreste de la ciudad de Zaragoza. El campo está enmarcado por vías principales de tráfico al sur (A-68 y AP68) y al este (A-23). Tanto las vías de tráfico como Zaragoza son zonas con fuertes emisiones de precursores de ozono.

Figure 1. Area de estudio y ubicación de puntos de muestreo.



2.2. Datos y software

La caracterización de los niveles de O_3 troposférico en el CENAD San Gregorio y su entorno se ha llevado a cabo empleando datos de campañas semanales de dosímetros o captadores pasivos y de

monitores de medida en continuo. Los dosímetros son muestreadores simples, capaces de captar O_3 a través de un proceso de difusión molecular. Estos sistemas son ideales para el muestreo en zonas remotas ya que no necesitan alimentación eléctrica y tienen un coste reducido de preparación, uso y análisis. Sin embargo, al no tratarse de una captación de aire forzada, no permiten tiempos de integración cortos.

Entre Abril y Octubre de 2014 se realizaron 24 campañas semanales con captadores pasivos en 11 localizaciones dentro del CENAD y su entorno (Figura 1). Este periodo corresponde con lo que se denomina la campaña anual de O_3 en el que se controlan a nivel Europeo las concentraciones de este contaminante. Se dispusieron 2 puntos de muestreo (DZ1 y DZ2) dentro del núcleo urbano de Zaragoza en una zona urbana de fondo y en una suburbana. Otros tres puntos de dispusieron en un transecto a lo largo del valle del Ebro (DZ3, DZ10 y DZ11) hacia el noreste de Zaragoza. Los otros 6 puntos se ubicaron dentro o en el perímetro del campo de maniobras (DZ4, DZ5, DZ6, DZ7, DZ8 y DZ9). Se han tomado siempre muestras duplicadas y la concentración semanal para cada punto se ha obtenido promediando los dos valores. Es importante destacar que las tasas de muestras válidas obtenidas (97%) evidencian una alta representatividad. El análisis por cromatografía iónica ha sido realizada por el CEAM.

Además de las campañas de dosímetros, durante el periodo de estudio se instaló un monitor en continuo dentro de la AGM y se recabaron los datos de los monitores que tiene el Gobierno de Aragón en Alagón y el Ayuntamiento de Zaragoza en sus 7 estaciones de medida (Jaime Ferrán, El Picarral, Las Fuentes, Renovales y Centro). Estos monitores son equipos basados en la técnica de fotometría UV que es la de referencia para la medición de O_3 según la norma UNE-EN 14625:2005. Los monitores de las redes públicas han estado sujetos a las labores de revisión y mantenimiento adecuadas según los estándares de calidad del fabricante y el monitor de la AGM fue calibrado antes y después de la campaña mostrando en ambas ocasiones un comportamiento adecuado.

Para la elaboración de mapas y la interpolación de resultados se ha empleado el software gvSIG mientras que para el análisis de transporte de masas de aire se ha usado el modelo de dispersión HYSPLIT4 [17] alimentado con campos de reanálisis GDAS de 0.5 °.

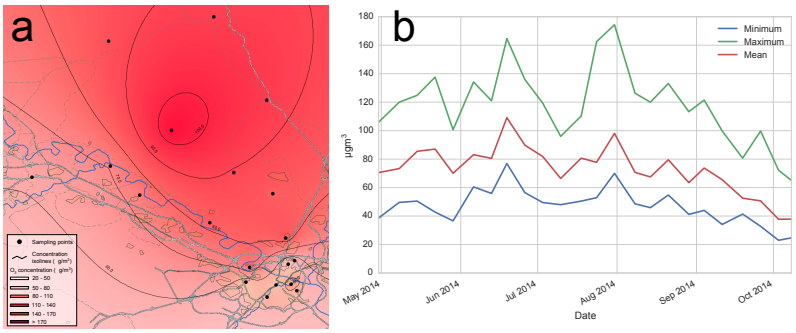
3. Resultados y Discusión

3.1. Niveles promedio y evolución temporal

En la Figura 2a se muestran los campos promedio de concentraciones semanales de O_3 en el CENAD y su entorno obtenidos mediante interpolación Kriging para el periodo de estudio. Para ello se han empleado los valores obtenidos en los captadores pasivos así como los promediados semanales de los monitores automáticos. Los niveles promedio más altos se registraron en la parte central del campo de maniobras (83-106 $\mu g/m^3$) mientras que en áreas más expuestas a emisiones directas de NO como Zaragoza o el valle del Ebro, los niveles fueron más reducidos (52-84 $\mu g/m^3$). Esto se debe al efecto de destrucción de O_3 por titración con el NO así como a una mayor ventilación y renovación de masas de aire en la zona del valle del Ebro por donde se canalizan los vientos dominantes. A lo largo de la campaña de verano de 2014 en la zona de estudio se produjo una evolución de los niveles (Figura 2b) típica del O_3 con máximos entre Mayo y Agosto (promedios entre 63 y 109 $\mu g/m^3$) y una caída a partir

de Septiembre-Octubre (38-74 $\mu g/m^3$), siguiendo el ciclo anual de la radiación solar que decae a partir del final de Agosto. Llama la atención que hay dos episodios en los que existen puntos de muestreo con concentraciones promedio semanales muy elevadas, superando los 160 $\mu g/m^3$ en la zona central del CENAD. En el siguiente apartado se realizará un análisis detallado del primero de estos dos eventos.

Figure 2. Niveles promedio de O_3 en el CENAD San Gregorio y su entorno (a) y serie de niveles promedio, máximo y mínimo semanal (b) entre Abril y Octubre de 2014.



Haciendo uso de los datos de los monitores de O_3 se ha evaluado el cumplimiento de los valores normativos sobre calidad del aire para valorar su cumplimiento. En el periodo de estudio no se rebasó en ninguna ocasión los umbrales de información o alerta (media horaria superior a 180 y 240 $\mu g/m^3$, respectivamente) aunque en el monitor de la AGM se alcanzaron los 167 $\mu g/m^3$ de media horaria (Tabla 1). Sin embargo, sí se registraron niveles integrados a una semana que podrían indicar concentraciones horarias cercanas al umbral de información dentro del CENAD como es caso del episodio extremo que se discute más adelante en este trabajo. Respecto al valor objetivo para protección de la salud humana (120 $\mu g/m^3$ como valor máximo diario de las medias móviles octohorarias, que no deberá superarse más de 25 días por cada año civil de promedio en un período de 3 años), es en la estación de la AGM donde se registran el mayor número de superaciones con 54. Aunque el valor objetivo se supera teniendo en cuenta un promedio de tres años, parece evidente que existe una tendencia que indicaría la superación de este valor objetivo en la AGM.

El estadístico usado para la protección de la vegetación es el AOT40 que se define como la suma de las diferencias entre las concentraciones horarias superiores a 80 $\mu g/m^3$ y 80 $\mu g/m^3$ durante mayo y julio, utilizando únicamente los valores horarios medidos diariamente entre las 8.00 y las 20.00, hora central europea (CET). El valor objetivo para el AOT40 es de 18000 $\mu g/m^3 \cdot h$, que no debe ser superado como promedio de 5 años. Aunque de nuevo no supondría una superación de este valor objetivo porque se necesitaría medir durante 5 años, en la AGM se registran valores elevados de AOT40 en el año 2014 (30559 $\mu g/m^3 \cdot h$) que serían indicativos de problemas de calidad del aire en esa zona.

3.2. Descripción de un episodio extremo

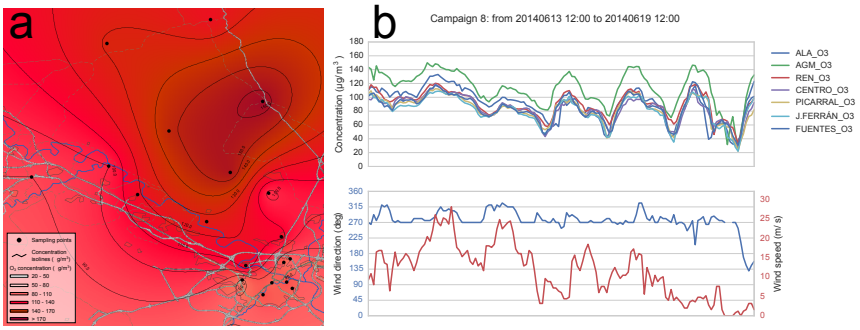
Se ha analizado en detalle un episodio concreto con altas concentraciones de O_3 para conocer la dinámica de transporte durante el mismo e inferir información sobre posibles áreas fuente. El evento elegido es durante el que se registraron los niveles medios más elevados de todo el muestreo: Del 13 al 19 de Junio. La Figura 3a muestra el mapa de concentraciones interpolado por Kriging durante el episodio.

Table 1. Detalle de estadísticos de la legislación para O_3 en el periodo Abril-Octubre 2014 en 7 estaciones de Zaragoza y su entorno.

Estación	Promedio horario máximo ($\mu g/m^3$)	Número de superaciones diarias de 120 $\mu g/m^3$	AOT40 ($\mu g/m^3 \cdot h$)
AGM	167	54	30559
Alagón	137	4	11389
Renovales	126	0	5574
Centro	126	0	3217
El Picarral	122	0	3669
Jaime Ferrán	128	0	5995
Las Fuentes	130	0	6624

Se puede observar que las concentraciones alcanzadas en la parte central del campo de maniobras fueron muy elevadas con promedios semanales entre 97 y 165 $\mu g/m^3$. En el valle del Ebro y Zaragoza los promedios semanales fueron algo más bajos aunque igualmente elevados (entre 77 y 126 $\mu g/m^3$). Si analizamos la evolución de los niveles de O_3 en los monitores durante el episodio (Figura 3b), se pude comprobar que existe un cambio de tendencia a partir del 15 de junio ya que antes de esa fecha los ciclos diarios no están muy marcados mientras que tras el 15, la oscilación diaria de las concentraciones es muy elevada. Hay que tener en cuenta que el periodo del 13-15 de junio corresponde con un fin de semana y la reducción en emisiones de tráfico hacen que no se produzca una destrucción importante de O_3 en las horas punta lo que eleva el nivel base durante esos días. Además, durante todo el evento hay viento del noroeste que cuya intensidad decrece desde valores moderadamente altos de hasta 30 m/s el día 14 hasta valores por debajo de 5 m/s al final del episodio.

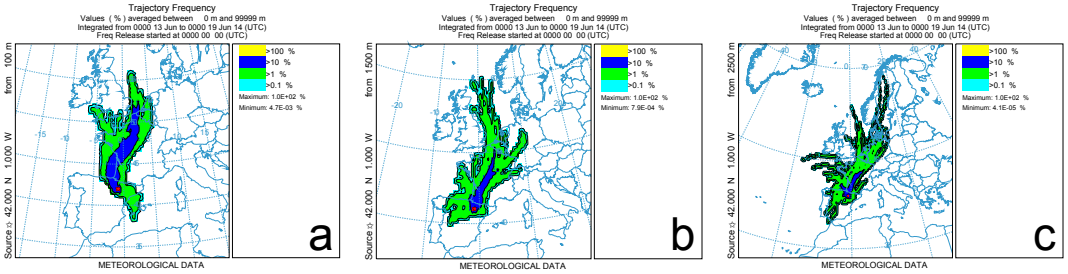
Figure 3. Niveles promedio de O_3 en el CENAD San Gregorio y su entorno (a) y niveles promedio horarios de O_3, dirección y velocidad del viento en 7 monitores de Zaragoza y el valle del Ebro (b) durante el episodio del 13-19 de Junio de 2014.



Para identificar las áreas fuente regionales que han podido contribuir, junto a las fuentes locales, con aporte de precursores y/o ozono durante el episodio, se han construido con HYSPLIT4 los mapas de frecuencia de origen de masas de aire en base a retrotrayectorias de 48 horas lanzadas cada 3 horas a tres alturas (100, 1500 y 2500 m sobre el suelo) durante el periodo del evento (Figura 4). Estos mapas corroboran la circulación dominante del noroeste infiriendo transporte de masas de aire a las tres alturas estudiadas desde el oeste de Francia y la zona del País Vasco, aunque la mayor intensidad del viento hace que el área fuente en alturas superiores se extienda abarcando zonas de Europa central, el Reino Unido y hasta los países nórdicos. A diferencia de la zona Mediterránea donde los episodios intensos de O_3 se dan en situaciones de calma sinóptica y recirculación mesoescalar de masas de aire [8], en la

zona central del valle del Ebro, episodios como el que se ha descrito se producen en un contexto de transporte sinóptico del noroeste por lo que es plausible suponer que existen aportes externos desde las zonas anteriormente citadas.

Figure 4. Mapas de frecuencia de origen de masas de aire a 100 (a), 1500 (b) y 2500 (c) m para 48 h sobre el CENAD San Gregorio durante el episodio del 13-19 de Junio de 2014.



4. Conclusiones

El presente trabajo muestra los resultados de un estudio de evaluación de los niveles de O_3 troposférico en el CENAD San Gregorio y su entorno desde Abril hasta Octubre de 2014. Ello se ha llevado a cabo empleando datos de concentración semanales a partir de 24 campañas con captadores pasivos y datos de monitores automáticos ubicados. A nivel promedio y, como es habitual en amplias zonas del sur de Europa en verano, los niveles de O_3 en las zonas centrales del campo de maniobras son altas y se hayan por encima de las registradas en la zona del valle del Ebro y en Zaragoza. Ello se debe principalmente a la mayor cercanía de estas áreas a las fuentes emisoras de NO (tráfico principalmente) que, por titración, destruye el O_3 así como a una más eficiente ventilación del valle. Se han encontrado indicios de posibles superaciones de los valores objetivo de protección de la salud y de la vegetación en el monitor instalado en la AGM por lo que sería aconsejable monitorizar a más largo plazo esa zona.

Se ha realizado un análisis detallado de un episodio extremo de O_3 acaecido entre el 13 y el 19 de Junio en el que se detectan posibles aportes regionales desde el oeste Europeo y la zona del Pais Vasco en un escenario de formación de O_3 diferente a los que generan altas concentraciones en la costa Mediterránea caracterizados por estabilidad sinóptica y recirculación mesoescalar.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el CUD de Zaragoza (Proyecto CUD 2013-18). Agradecemos al Ayuntamiento de Zaragoza y al Gobierno de Aragón por la provisión de datos y al CENAD San Gregorio y a la AGM por su apoyo para la realización de este trabajo.

Referencias

1. Atkinson, R. Atmospheric chemistry of VOC_s and NO_x. *Atmospheric Environment* **2000**, *34*, 2063-2101.
2. Paoletti, E. Impact of ozone on Mediterranean forests: a review. *Environmental Pollution* **2006**, *144*, 463-474.

3. Screpanti, A.; Marco, A.D. Corrosion on cultural heritage buildings in Italy: a role for ozone? *Environmental Pollution* **2009**, *157*, 1513-1520.
4. IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*; Cambridge University Press; Cambridge, United Kingdom, 2013; 1535 pp.
5. WHO. *Health Risks of Ozone from Long-range Transboundary Air Pollution*; Ed.: WHO Regional Office for Europe; Copenhagen, Denmark, 2008.
6. Derwent, R.; Simmonds, P.; Manning, A.; Spain, T. Trends over a 20-year period from 1987 to 2007 in surface ozone at the atmospheric research station, Mace Head, Ireland. *Atmospheric Environment* **2007**, *41*, 9091-9098.
7. Parrish, D.D.; Law, K.S.; Staehelin, J.; Derwent, R.; Cooper, O.R.; Tanimoto, H.; Volz-Thomas, A.; Gilge, S.; Scheel, H.E.; Steinbacher, M.; Chan, E. Long-term changes in lower tropospheric baseline ozone concentrations at northern midlatitudes. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2012**, *12*, 11485-11504.
8. Millán, M.; Salvador, R.; Mantilla, E.; Artíñano, B. Meteorology and photochemical air pollution in southern europe: experimental results from EC research projects. *Atmospheric Environment* **1996**, *30*, 1909-192.
9. Duncan, B.N.; West, J.J.; Yoshida, Y.; Fiore, A.M.; Ziemke, J.R. The influence of European pollution on ozone in the Near East and northern Africa. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2008**, *8*, 2267-2283.
10. Tressol, M.; Ordonez, C.; Zbinden, R.; Brioude, J.; Thouret, V.; Mari, C.; Nedelec, P.; Cammas, J.; Smit, H.; Patz, H.; Volz-Thomas, A. Air pollution during the 2003 European heat wave as seen by MOZAIC airliners. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2008**, *8*, 2133-2150.
11. Sicard, P.; De Marco, A.; Troussier, F.; Renou, C.; Vas, N.; Paoletti, E. Decrease in surface ozone concentrations at Mediterranean remote sites and increase in the cities. *Atmospheric Environment* **2013**, *79*, 705-715.
12. Escudero, M.; Lozano, A.; Hierro, J.; del Valle, J.; Mantilla, E. Urban influence on increasing ozone concentrations in a characteristic Mediterranean agglomeration. *Atmospheric Environment* **2014**, *99*, 322-332.
13. Querol, X.; Alastuey, A.; Pandolfi, M.; Reche, C.; Pérez, N.; Minguillón, M.; Moreno, T.; Viana, M.; Escudero, M.; Orío, A.; Pallarés, M.; Reina, F. 2001-2012 trends on air quality in Spain. *Science of The Total Environment* **2014**, *490*, 957-969.
14. Vestreng, V.; Ntziachristos, L.; Semb, A.; Reis, S.; Isaksen, I.S.A.; Tarrasón, L. Evolution of NO_x emissions in Europe with focus on road transport control measures. *Atmospheric Chemistry and Physics* **2009**, *9*, 1503-1520.
15. Carslaw, D.C. Evidence of an increasing NO_2/NO_x emissions ratio from road traffic emissions 2005. *Atmospheric Environment* **2005**, *39*, 4793-4802.
16. Ayuntamiento de Zaragoza. European Green Capital Award 2016: City Introduction and Context, Technical Report, 2014.
17. Draxler, R.R.; Hess, G.D. An overview of the HYSPLIT4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition. *Australian meteorological magazine* **1998**, *47*, 295-308.

Sesión IV-E

Sociedad, Economía y Humanidades

Análisis de las técnicas y materiales de intervención policial: resultados de investigación técnico-jurídicos para la formación de la Policía de los Ejércitos

Ruiz Rodríguez, Luis Ramón [1,*] y Solari Merlo, Mariana [2]

[1] Director del Instituto Andaluz Interuniversitario de Criminología. Universidad de Cádiz. ramon.ruiz@uca.es: LRRR

[2] Profesora de Derecho penal. Universidad de Cádiz; mariana.solari@uca.es: MSM

***** Autor Principal y responsable del trabajo; ramon.ruiz@uca.es (LRRR);

Abstract: El Instituto de Criminología y el Departamento de Química Física de la Universidad de Cádiz, y el Área de Medicina Legal y Forense de la Universidad de Granada, han desarrollado un Proyecto Coordinado de I+D+i centrado en el estudio de algunas técnicas físicas básicas e instrumentos propios de la intervención policial, tanto desde un punto de vista jurídico criminológico, como desde las áreas técnico científica y médica. Se ha buscado mejorar de forma sustancial la formación de los profesionales de la seguridad pública y privada y evaluar la adecuación de determinados instrumentos de uso policial al cumplimiento de sus obligaciones legales. Siendo los resultados aplicables a las funciones y competencias de cualquier institución de la seguridad, es objeto de interés primario de este trabajo la aplicación de aquellos a las funciones y a los profesionales de los Ejércitos que desarrollan funciones de naturaleza policial dentro de sus instalaciones y en las misiones exteriores, en particular, tras el reconocimiento como agente de la autoridad que realiza el Real Decreto 194/2010 a los miembros de la policía militar, naval y aérea. De ahí la propuesta de elaboración de un manual de intervención policial universal válido para cualquier institución de la seguridad.

Keywords: formación; agente de la autoridad; policía; intervención física, Ejército

---

1. Introducción

El reconocimiento como agente de la autoridad que realiza con claridad el Real Decreto 194/2010 a los miembros de la policía militar, naval y aérea, obliga a abordar los problemas comunes con las fuerzas

y cuerpos de seguridad respecto del uso de la fuerza para la evitación de delitos o de daños, y cuya evitación sea competencia de dichas fuerzas.

Sin embargo, ese reconocimiento como agentes de la autoridad no es suficiente para realizar una equiparación automática entre las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad y las policías de los ejércitos. En primer lugar, porque las situaciones en las que el Real Decreto reconoce el carácter de autoridad a los policías aéreos, navales o militares son tasadas y limitadas, algunas de ellas, en particular, por efectuarse en colaboración con aquellas.

En segundo lugar, porque en los ejércitos la función de policía no constituye la función básica de sus miembros, sino que constituye una función complementaria y de apoyo al buen funcionamiento del resto de actividades principales de los mismos (artículo 30 RD). Esto, jurídicamente, se traduce en un desarrollo normativo menor, más especializado y, en cierto modo, dependiente del que condiciona el trabajo de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad. Por ello, en la jurisdicción militar son numerosas las referencias y remisiones a la legislación civil para completar la interpretación de las normas del propio ejército.

En concreto, en el área de la seguridad, la primera gran diferencia entre instituciones policiales estriba en los fines de las mismas, encargadas de la seguridad ciudadana y el orden público las policías civiles y del correcto funcionamiento de las instituciones de los ejércitos las policías militares.

Esta diferencia resulta esencial a la hora de abordar algunos problemas, especialmente los derivados de la legitimidad general de las policías para efectuar el uso de la fuerza, ya que la proporcionalidad en la utilización de la misma está vinculada al ejercicio de los derechos fundamentales de los ciudadanos, mientras que en el ejército, el uso de la fuerza en su vertiente policial está centrada, al menos teóricamente, en el buen funcionamiento de las instituciones y la protección de las estructuras del ejército, tanto en su funcionamiento ordinario como en las misiones de naturaleza militar que desarrollen.

Cuando se dice teóricamente es porque estas funciones son las que legalmente prevé la normativa aplicable, pero la realidad impone que sean otras funciones, algunas de orden civil más que militar, las que finalmente terminan asumiendo las policías del ejército.

Tan sólo hay que pensar en las situaciones de ataques contra la integridad física por conflictos personales, en las situaciones de violencia de género en los acuartelamientos o en los casos de tráfico de drogas realizados hacia, desde o dentro de los mismos para entender que esas conductas delictivas no son las que el legislador ha previsto para ser abordadas por la policía militar cuando pensó en sus funciones y, sobre todo, cuando se planifica la formación que debe tener este personal. Las propias cuestiones relacionadas con el tráfico de vehículos dentro de las instalaciones militares, la investigación de sus accidentes o cuestiones básicas sobre cómo extraer a un sujeto que se resiste del interior de un vehículo, son cuestiones intrínsecamente policiales que requieren respuestas de esta naturaleza con los matices necesarios, pero secundarios, propios del espacio o los sujetos implicados. De hecho, el artículo 32 del Real Decreto 194/2010 regula la intervención de las policías de los ejércitos ante delitos flagrantes, de modo que “estando de servicio y en ausencia de miembros de las fuerzas y cuerpos de seguridad los miembros de la policía militar, naval o aérea intervendrán ante delitos flagrantes de acuerdo con lo previsto en la Ley de Enjuiciamiento Criminal. Tan pronto como les sea posible recabarán la presencia de aquellos y darán cuenta de su actuación a sus superiores”.

Estos aspectos de la operativa policial son los que desde las Universidades de Cádiz y Granada investigamos en un proyecto coordinado de I+D+i, de ámbito nacional, con la finalidad de incrementar

la eficacia de la intervención policial reduciendo los riesgos para los policías y para los sujetos objeto de la intervención. A este respecto, resulta relativamente indiferente la función ejercida si de lo que hablamos es de la mejor forma de practicar una detención, de cómo inmovilizar a un sujeto, de cómo dispersar a un grupo violento, de cómo engrilletar o de cómo trabajar con personas situadas en el interior de vehículos, actuaciones estas que suelen requerir el uso de fuerza legítima cuya única cobertura legal la proporciona la eximente de cumplimiento de un deber, oficio o cargo, ubicada en el artículo 20 del Código penal, y a la que se remite expresamente el artículo 21 del Código penal militar.

Para determinar el objeto de investigación del proyecto, dada la amplitud de contenidos que constituye la operativa policial, se seleccionaron dos elementos que venían siendo objeto de atención por parte del Instituto de Criminología en su plan formativo y de divulgación, en concreto la intervención física de la policía con técnicas propias de reducción y detención de personas, bien con el propio cuerpo del policía o con uno de los instrumentos más representativo de la actuación policial como son las defensas policiales.

El trabajo de formación previo permitía tener una opinión formada sobre problemas reales que permitieran formular hipótesis de trabajo sólidas dirigidas, en su caso, a replantear o proponer nuevos métodos de intervención menos lesivos y mejoras técnicas de diseño y fabricación de defensas de uso policial en contraste con las ya existentes en el mercado propio de estos materiales.

Cada equipo de trabajo, de forma coordinada, evaluaría las técnicas de intervención policial de acuerdo con la metodología propia de su disciplina, poniendo posteriormente en común resultados parciales obteniendo, de este modo, respuestas multidisciplinares a problemas concretos, hasta el momento analizados sectorialmente.

Desarrollar estos subproyectos sin aportar la experiencia y métodos de trabajo de los operadores reales del área de la seguridad habría representado una grave limitación del proyecto en su conjunto, por lo que se integró en el mismo a una parte muy significativa de aquellos en calidad de Entes Promotores Observadores, instituciones de la seguridad que aportasen información y experiencia, y que colaborasen en la ejecución de los subproyectos para, de este modo, identificar con mayor precisión las fallas de la operativa policial en las intervenciones físicas y con defensas, contribuyendo a buscar las mejores soluciones posibles. Entidades públicas y privadas de la seguridad, asociaciones y sindicatos aportarían ese conocimiento cuyo acceso resultaba más complejo para los investigadores.

Con todos estos mimbres, la propuesta se evaluó favorablemente por el Ministerio de Economía y Competitividad y se ha venido desarrollando según el plan de ejecución previsto, estando los investigadores en condiciones de hacer públicos los primeros resultados del proyecto.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

Los diferentes subproyectos trabajaron de un modo independiente puesto que en cada caso los objetivos parciales a alcanzar diferían en gran medida en función de las características propias de cada disciplina.

El *subproyecto jurídico* consta de dos partes, una primera estrictamente jurídica y otra criminológica. En el primer caso, el trabajo del equipo investigador se centró en el análisis jurisprudencial relativo al uso de la fuerza en las intervenciones de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado con el objeto de determinar y analizar las posibles consecuencias legales que los métodos y

técnicas empleadas conllevan. En este sentido, el estudio no sólo se ciñó al Cuerpo Nacional de Policía, Guardia Civil y Policía Local, sino que se dio cabida a sujetos que trabajan en el campo de la seguridad privada. El interés de su inclusión es doble ya que, por un lado, y al igual que los Cuerpos de Seguridad del Estado, a diario realizan intervenciones con ciudadanos; y, por otro, al pertenecer al sector privado su actividad, si bien regulada, no es del todo controlada por el Estado, fundamentalmente en lo concerniente a su formación.

En el trabajo se parte del estudio de los requisitos legales del uso de la fuerza para poder determinar los casos en que ésta ha sido claramente excesiva. En este caso, y coincidiendo con la jurisprudencia más numerosa, las conductas pueden ser calificadas como delito de lesiones o torturas y, en menor medida, como homicidio. Su cara opuesta viene determinada por la alegación del cumplimiento de un deber legal como causa de justificación, que será de apreciación en los casos en que los sujetos no hayan excedido los límites de lo necesario para el control de la situación.

Por lo que respecta a la parte criminológica, el estudio ha girado en torno a la elaboración de un cuestionario dirigido a las FF y CC de Seguridad sobre cuestiones relativas al empleo de la fuerza en sus intervenciones, tanto la directa ejercida por el propio policía, como la que se ejerce mediante el uso de las defensas policiales.

En su estructura, el cuestionario se divide en tres partes. Una primera sobre cuestiones sociodemográficas de los sujetos a efectos de poder comparar datos relativos a las diferentes instituciones de procedencia así como para el cruce de variables en atención a diversos factores como la edad, la antigüedad en el puesto, la movilidad del personal, etc. Las otras dos partes, principales en cuanto a su contenido, se han centrado en cuestiones relativas a las técnicas de intervención física y a las técnicas de intervención con defensas. En ambos casos, la estructura interna de estas subsecciones es similar, con preguntas relativas a la formación en la materia –contenido, antigüedad, frecuencia, etc.- zonas de intervención recomendadas, posibles lesiones sufridas y/o producidas con el empleo de dichas técnicas, satisfacción con la formación recibida, y posibles consecuencias legales que las intervenciones han generado.

Una vez completada la fase de campo, con la realización de más de trecientas entrevistas entre miembros de policía local, nacional, guardias civiles, miembros del ejército del aire, policía portuaria y personal de seguridad privada, tuvo lugar el procesamiento de datos y análisis de los resultados obtenidos. Las cifras aisladas son de por sí significativas en muchos casos pero los resultados tienen un interés aun mayor, como se verá a continuación, cuando se procede al cruce de las diferentes variables.

El *subproyecto médico legal* tiene como objetivo el estudio de las diversas lesiones que las intervenciones policiales pueden conllevar sobre el cuerpo de los propios intervinientes, sean los destinatarios o quienes efectúan el golpe.

Las principales lesiones producidas son las intoxicaciones, heridas por arma blanca o arma de fuego y, con mayor frecuencia, contusiones. En este último caso, los policías suelen ser tanto sujetos activos como pasivos de la lesión, ya sea por el empleo de una fuerza excesiva como por la aplicación de una incorrecta técnica de intervención y defensa, dando lugar a caídas y lesiones tumultuosas, aplastamientos, golpes directos y autolesiones.

El trabajo experimental en este caso consistió en determinar la lesividad que las agresiones directas y los golpes con defensas tienen para sus destinatarios. Para ello se realizaron diferentes pruebas de golpeo sobre la piel de cerdo –anatómicamente similar a la del ser humano-, ejerciendo diferente

presión y empleando distintos materiales. Una vez obtenidas las muestras, se procede a la valoración médica de su gravedad y extensión para finalizar con una propuesta de medios y métodos menos lesivos.

Finalmente, en el *subproyecto físico-químico* se analizó la composición física, química y técnica de los materiales empleados en la confección de las defensas policiales. El trabajo se ha realizado principalmente en el laboratorio, estudiando las propiedades de estos elementos y el deterioro que presentan por un uso prolongado.

Para determinar la composición de las defensas se han realizado análisis químicos, caracterizaciones mecánicas y, en determinados casos, sometimiento a microscopía óptica y electrónica. El estudio de su deterioro, por otra parte, parte del examen de las formas de empleo del material y la recreación de determinados tipos de sufrimientos mecánicos determinados por el tipo de uso al que son sometidos. Con estos datos, es posible analizar las zonas de mayor impacto y desgaste, así como las propiedades que se van perdiendo o transformando.

3. Resultados y Discusión

Condicionado el desarrollo de cada subproyecto por su propia metodología de trabajo, propia de las diferentes disciplinas en acción, los resultados se han obtenido en una primera fase de manera independiente, de acuerdo a los objetivos y parámetros de investigación utilizados en cada uno, para, finalmente realizar un ejercicio de aproximación y adaptación al cumplimiento de los objetivos comunes, fundamentalmente el desarrollo de un manual de intervención policial propio adaptado a los resultados legales, criminológicos, médico legales y físico-químico obtenidos.

Como resultados principales obtenidos en el subproyecto jurídico criminológico, se pueden ofrecer los siguientes:

- La formación policial en técnicas de intervención física y uso de defensas de uso policial, con algunas variaciones significativas dependiendo del cuerpo o institución, presenta déficits importantes en cuanto a frecuencia, contenidos y fines a cumplir: las entrevistas realizadas en diferentes instituciones públicas y privadas de la seguridad dan como resultado un bajo nivel de actualización de conocimientos en estas disciplinas, centradas en un tipo de formación que mayoritariamente denominan como Defensa personal policial que, en realidad es una formación basada en la combinación de técnicas procedentes de artes marciales y deportes de contacto adaptadas parcialmente a la actividad policial, pero sin un desarrollo coherente que no atiende a las principales exigencias de la intervención policial con ciudadanos.
- Los centros de formación policial utilizan como guías de formación documentos internos sin mayor valor legal, desconectándose en todos los casos la reglamentación de la actuación policial y la determinación de responsabilidades legales de dichas guías o manuales y de las decisiones formativas que se desarrollan en los distintos centros de capacitación. Estos carecen de toda responsabilidad por la formación impartida en todos los supuestos en los que los trabajadores de la seguridad han tenido responsabilidades legales y las mismas han podido estar condicionadas por déficits formativos. No existe una sola resolución judicial que matice la intervención de un funcionario policial de acuerdo con una formación defectuosa o inexistente en el momento de ejecutar la intervención.

- La regulación aplicable en materia de intervenciones policiales es mínima y genérica. La Ley de Fuerzas y Cuerpos de Seguridad y su normativa de desarrollo se limitan a fijar una serie de principios de actuación poco definidos y sin desarrollo reglamentario, quedando este objetivo cumplido, en parte, por los códigos de conducta nacionales o internacionales adoptados en las últimas décadas por las organizaciones policiales. Dichos códigos no son de obligado cumplimiento ni contienen un sistema de infracciones y sanciones, por lo que, además de ser poco concretos, tienen una capacidad muy limitada para condicionar el trabajo policial.
- La figura central de la regulación legal del uso de la fuerza policial viene representada por la causa de justificación penal de cumplimiento de un deber, oficio o cargo. Todas las intervenciones policiales conflictivas se evalúan mediante este instrumento de orden penal recogido en el artículo 20.7 del Código penal y la jurisprudencia del Tribunal Supremo es constante al respecto en el sentido de distinguir entre la necesidad de actuar violentamente entendida en "abstracto" y la considerada en "concreto", de tal manera que cuando no existe la primera no cabe hablar ni de eximente completa ni de incompleta. Esa necesidad abstracta de intervenir, que es obligatoria, condiciona la forma en concreto de intervenir, por lo que la técnica elegida para actuar por parte del policía debe estar en consonancia con aquella situación de conflicto de la que no puede desentenderse. Así, golpear con la defensa a un sujeto que se marcha pacíficamente de una manifestación ilegal es sancionado por los tribunales sin excusa alguna por no estar cubierto por la obligación de actuar.
- En los delitos de lesiones provocadas por policías en sus intervenciones, comparativamente con los que se provocan entre particulares, la actuación de los tribunales tiende a ser mucho más exquisita desde el punto de vista de la aplicación de las garantías constitucionales. Esta respuesta, en cierto modo de comprensión institucional refleja un escoramiento poco justificable hacía una parte de la propia Administración de justicia penal en la que las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad se encuentran integrados.

En el subproyecto físico-químico para la evaluación de las defensas de uso policial, se han aplicado los métodos descritos para determinar qué elementos del diseño, selección de materiales y construcción de este elemento básico de la dotación del policía pueden ser causantes de daños evitables tanto para el trabajador de la seguridad como para el ciudadano. Mediante el estudio de medidas de la intensidad de las fuerzas de golpeo en la zona de impacto, y del acoplamiento de los efectos dinámicos producidos por el momento de giro y las vibraciones que se detectan en el mango de la defensa, y a través de estudios de medidas de las vibraciones recogidas en el mango de la defensa, cuando se golpean con fuerzas de diferentes intensidades, se está pudiendo evaluar la lesividad de las defensas tanto para el policía como para el receptor del golpeo. Estas medidas, realizadas en el laboratorio de Ingeniería Acústica, mediante el golpeo sistemático de varias masas lanzadas desde diferentes alturas, para lo cual se ha fabricado un prototipo de péndulo de golpeo ajustado a las necesidades de las defensas, ha permitido evaluar equipos modulares, principalmente por su flexibilidad para acoplarle diversos tipos de transductores, en concreto los transductores de fuerza y vibraciones, y obtener datos sustanciales de medidas caracterización mecánicas, así como de los efectos vibra-rotacionales acoplados.

Estas pruebas han permitido catalogar todas las defensas existentes en el mercado, pudiendo medir su resistencia y efecto de vibración, considerándose como las más inadecuadas las fabricadas con materiales metálicos y aquellas cuyo diseño no tiene en cuenta la capacidad de absorción de las

vibraciones por un defectuoso diseño del equilibrio interno del instrumento, diseño que provoca directamente luxaciones o roturas óseas en muñecas y antebrazos de policías durante las intervenciones policiales.

Finalmente, en el subproyecto médico legal se ha evaluado el impacto de todos los tipos de defensa que existen en el mercado actual y que utilizan o pueden utilizar las fuerzas de seguridad pública y privada. Del estudio de impacto de las defensas realizado sobre piel de cerdo se han podido catalogar las diferentes defensas por su capacidad destructora de tejido y su capacidad de penetración y afectación a órganos vitales mediante un uso estandarizado de las defensas acorde con los procedimientos vigentes en los manuales y especificaciones establecidos por los fabricantes. De acuerdo con los objetivos de dispersión de multitudes, defensa frente a agresiones y golpeos para la reducción e inmovilización de sujetos, algunos de los tipos defensa exceden con claridad en su uso normalizado los fines de reducción o dispersión de grupos que tienen, al provocar daños en la piel, en grupos musculares y en órganos internos que resultan totalmente innecesarios para el cumplimiento de los fines legales atribuidos a las policías. Habitualmente las lesiones causadas por estos instrumentos corresponden a equimosis figuradas, con dos líneas equimóticas paralelas que dejan una zona de piel indemne entre ellas, y cuya anchura corresponde exactamente a la de la de este instrumento de defensa policial. Además de estas lesiones contusas superficiales visibles en la piel, producirán dolor y pequeñas roturas de fibras musculares esqueléticas subyacentes a la zona golpeada

De los grupos de defensas analizados se rechaza que formen parte de la dotación básica de la policía las defensas con terminación en punta redondeada, tanto en acero como en cualquier otro material rígido por la gran capacidad de penetración que presentan sobre la piel, finalidad totalmente alejada de la idea de reducción que se puede alcanzar con la función exclusiva de golpeo sin aplastamiento de tejido y músculo, siendo de naturaleza mortal si su uso se realiza sobre zonas vitales. También se consideran poco recomendables las defensas metálicas rígidas debido a que, pese a su menor capacidad destructiva, tienen una alta capacidad para quebrar material óseo.

Se recomienda, por lo tanto, en la dotación básica policial el uso de defensas no extensibles construidas con materiales no metálicos y un nivel de flexibilidad suficiente para absorber el impacto, causando dolor sin ocasionar daños en piel u órganos que son completamente innecesarios para conseguir la inmovilización de un sujeto. En particular, se recomiendan las defensas tipo tonfa que están diseñadas como instrumentos principalmente defensivos y no como instrumentos de ataque que olvidan por completo la necesidad de defensa del agente de la autoridad.

.

4. Conclusiones

El desarrollo de la actividad policial no ha venido siendo objeto de interés para la investigación de primer nivel, en particular, en lo que se refiere a la intervención física y el uso de las defensas policiales. Los problemas más relevantes surgen de la escasa atención que se presta a la capacitación de los trabajadores de este sector, tanto en frecuencia como en contenidos, por un lado, y al diseño y fabricación de las defensas de uso policial, concebidas en las últimas década como elementos de ataque más que como elementos de defensa, con escasa atención a los daños físicos que tanto el usuario como el

destinatario reciben y que se pueden paliar en un alto porcentaje. De los tres estudios realizados se puede concluir:

- Que se precisa un cambio sustancial en los manuales de formación policial, sustituyendo las técnicas y procedimientos clásicos por otros adaptados a la intervención operativa real
- Que es necesario un cambio en la regulación de la intervención policial precisando mejor los límites de la misma y la responsabilidad de los formadores en las situaciones de daño material.
- Que el diseño y elección de materiales para la fabricación de defensas policiales requiere la realización de estudios más contundentes sobre resistencia, vibración y capacidad de defensa, así como la eliminación de la dotación básica de la policía de defensas que no cumplen los objetivos básicos de la función policial.
- Que las defensas policiales se construyan manteniendo su eficacia y eliminando los daños potenciales que no aportan nada a la seguridad pública, como así se desprende de los estudios forenses realizados con defensas con puntas de acero o de construcción rígida que multiplican los daños corporales sin incrementar la eficacia de la intervención policial.
- Que la elaboración de un manual de intervención policial que acoja de forma coherente todos estos resultados, y combine eficacia y minimización de daños debe ser un objetivo prioritario de la formación policial
- Por último, que la naturaleza especial por competencia de las policías existentes en los ejércitos, han de adaptar parte de su formación y dotación de material a estos nuevos objetivos marcados legalmente desde 2010, en parte coincidentes con los de las FF y CC de Seguridad, pero con los condicionantes propios de la institución en la que se integran.

Agradecimientos

El desarrollo de este proyecto ha sido viable gracias a los Entes Promotores Observadores del mismo, a los que agradecemos su colaboración e interés tanto en la ejecución como en los resultados del proyecto. Nuestro agradecimiento, por tanto, a la Escuela de Seguridad Pública de Andalucía, la Jefatura de la Policía Local de Cádiz, la Autoridad Portuaria de la Bahía de Cádiz, la empresa EULEN Seguridad, el sindicato CSIF, la Confederación Española de Policía y la Asociación Española de Guardias Civiles.

Bibliografía

Concheiro, L., Suarez, J.M. (2005). Asfixias mecánicas. En E. Villanueva (Ed), *Gisbert Calabuig. Medicina Legal y Toxicología* (pp. 460-478) Barcelona: Masson S.A.

Gisbert, J.A. (2005). Contusiones. En E. Villanueva (Ed), *Gisbert Calabuig. Medicina Legal y Toxicología* (pp. 360-370) Barcelona: Masson S.A.

---------- (2005). Lesiones por arma blanca. En E. Villanueva (Ed), *Gisbert Calabuig. Medicina Legal y Toxicología* (pp. 383-393) Barcelona: Masson S.A.

Guerrero Agripino, L. F, de Santiago Álvarez, A. (2013). El uso legítimo de la fuerza policial, *Ciencia jurídica*, núm. 3.

Langón Cuñarro, M. (2003). Cumplimiento de la ley como causa de justificaciónel uso de la fuerza y de las armas por parte de funcionarios policiales, *Revista de derecho*, año 2, núm. 3.

Martínez, J., Sorribas, P. (2014). Atribuciones sobre el uso de la fuerza policial desde la perspectiva del agente, *Psicol. Soc.*, vol.26, núm. 2.

Dispositivos de monitorización y registro en los planes de instrucción EOD/CBRN

Muntané Rodríguez, Joan [1,*]

[1] Muntané Rodríguez, Joan. Policía de la Generalitat de Cataluña – Mossos d'Esquadra
Email: jmr.muntane@gmail.com (JMR)

***** Autor Principal y responsable del trabajo;

Abstract: Este trabajo estudia diferentes equipos de monitorización y registro, así como el valor de los datos que estos aportan (rutas GPS, pulsaciones, tiempo de actividad, de descanso, temperatura corporal, etc…) y tiene por objetivo valorar su uso en los proyectos de investigación y en los planes de instrucción física EOD/CBRN y cómo afectarían a las operaciones Counter IED llevadas a cabo por los técnicos especialistas en desactivación de artefactos explosivos y defensa NBQ.

Keywords: C-IED; EOD; CBRNe; TEDAX-NRBQ; Instrucción física; Policía; Estudios ocupacionales, Nuevas tecnologías.

---

1. Introducción

Los especialistas EOD/CBRN deben cumplir un exigente plan de formación tanto técnico como psicofísico para mantener el nivel operativo que les permite llevar a cabo las misiones encomendadas con las máximas garantías de seguridad y éxito posibles.

La carga lectiva de los planes de formación es extensa, siendo imposible integrarla dentro de una jornada laboral limitada en el tiempo, lo que requiere un compromiso especial y ejemplar por parte de los policías que integran estos grupos de elite, ya que parte del programa deben realizarlo en sesiones relámpago o fuera del horario laboral.

Dichos planes de formación se han de ir adaptando a los cambios en la tipología terrorista y se deben conocer, no sólo por su dureza y exigencia, sino también por su excelencia y rigor científico. Es por ello, por lo que mandos y responsables, desarrollan diferentes estudios que abarcan e interrelacionan varias disciplinas (biomecánica, motricidad, pedagogía, etc.) y perspectivas científicas (medicina deportiva, estudios biomédicos, etc.) con objeto de lograrlo y así aumentar el índice de éxito y supervivencia en las operaciones *Counter-IED*.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

Los avances tecnológicos y su integración en diferentes ámbitos como en el de las comunicaciones, los videojuegos o las aplicaciones móviles (APP's) han puesto al alcance de todos herramientas que antes estaban económicamente reservadas a pocos.

Este proyecto de investigación estudia diferentes equipos de monitorización y registro, así como el valor de los datos que éstos aportan (rutas GPS, pulsaciones, tiempo de actividad, de descanso, temperatura corporal, etc…) y tiene por objetivo valorar su uso en los proyectos de investigación y en los planes de instrucción física EOD/CBRN y cómo afectarían a las operaciones *Counter IED* llevadas a cabo por los técnicos especialistas en desactivación de artefactos explosivos y defensa NBQ.

Concretamente se han utilizado el pulsómetro H7 HR de la marca POLAR y la pulsera de actividad diaria (de la misma marca), modelo LOOP, ambos vinculados a un Smartphone con sistema Android y a una Tablet con sistema IOS de la empresa Apple con sus respectivas aplicaciones (App's).

También se ha utilizado una plataforma open-source de Arduino con una plataforma e-Health del grupo Cooking Hacks para obtener datos biométricos por medio de cinco de los nueve sensores que permite integrar la plataforma, todos ellos controlado por la aplicación gratuita e-Health desarrollada por el mismo grupo.

3. Resultados y Discusión

El objetivo de esta fase inicial del estudio es determinar el valor de los datos en dos ámbitos concretos: los estudios ocupacionales y los planes de instrucción.

Si bien es cierto que lo ideal es no tener una dependencia externa/pública y utilizar dispositivos que permitan exportar la información a bases de datos y aplicaciones propias desarrolladas en la Unidad, el presente estudio se ha realizado con dispositivos Polar que sincronizan los datos con sus servidores y no se pueden exportar, ya que los datos expuestos o son irrelevantes o, para aquellos más sensibles, manteniendo medidas básicas de protección, se puede garantizar la seguridad y el anonimato de los técnicos EOD/CBRN .

De esta forma, no se ha tenido que invertir en desarrollo consiguiendo que los costes del estudio sean mínimos.

3.1. Dispositivos de monitorización y registro para la Instrucción física

El acondicionamiento físico, al igual que los procesos de aprendizaje, son complejos en sí mismos y cada agente progresa de una forma distinta. Por ello, si se quiere obtener el máximo nivel de cada uno de los técnicos EOD/CBRN, se debe adecuar la instrucción a las necesidades individuales de cada agente.

Con ello no se refiere a un instructor por especialista, sino a un instructor que tenga capacidad de conocer, entre otras cosas, las necesidades y capacidades de cada uno de los especialistas a su cargo; Hecho que le permita diseñar los planes de formación con mayor rigor y controlar que los programas se han realizado adecuadamente y alcanzado los objetivos.

Pero, ¿cómo lograrlo si el personal está en diferentes destinos? ¿Cómo integrar la formación específica de las unidades con las competiciones y entrenamientos realizados fuera del horario laboral?

3.1.1 Pulsómetro POLAR H7 HR sincronizado con la App Polar Beat

Actualmente en el mercado existen gran variedad de pulsímetros. Un factor determinante es la codificación, ya que está vinculado con la fiabilidad. El pulsómetro Polar H7 HR cumple con las exigencias necesarias para usarlo en maniobras y misiones y, a diferencia del resto de modelos, también en el agua.

El pulsómetro se sincroniza con la aplicación gratuita App Polar Beat, del Smartphone, la cual permite:

- Realizar entrenamientos marcando objetivos de tiempo, distancia o calorías (PLAN).
- Sincronizando el pulsómetro con el teléfono, se puede ver gráficamente los diferentes niveles de intensidad durante el entrenamiento (TRAIN).
- En el apartado ANALYZE se pueden observar los datos recogidos durante el entrenamiento: pulsaciones, niveles de intensidad, distancia, tiempo, calorías y ruta GPS.



Figura 1. Presentación de las diferentes pantallas de la aplicación Polar Beat.

Además, la aplicación dispone de un apartado SHARE que permite compartir en las redes sociales (Facebook / Twiter) los objetivos alcanzados. Para el estudio que ocupa este apartado no es importante, pero sí la posibilidad de realizarlo, ya que, como se verá a continuación permite compartir los datos con un entrenador.

3.1.2 Polar Flow Coach

Flow Coach es un servicio web gratuito de la empresa Polar que ofrece servicios a entrenadores. La página ofrece un entorno de comunicación entre el entrenador y sus "clientes" permitiendo acceder a los datos recogidos por las aplicaciones Polar Beat (comentada anteriormente) o Polar Flow (la veremos en el apartado 3.2.1). Es decir, es el entorno para compartir toda la información.

En la página web, el responsable de la instrucción física dispone de un resumen de los entrenamientos más recientes de los especialistas a su cargo, pudiendo consultar los informes individuales si así lo considera y comunicarse mediante mensajes privados para darles feedback.

De esta forma, los mandos pueden conocer e integrar la actividad física realizada fuera de la jornada laboral al plan de formación del agente, evitando sobreentrenamiento (SE) que podría derivar en lesiones o, trasferencias negativas perjudiciales para los objetivos de la Unidad o para la especialidad deportiva. Esta combinación es adecuada sobre todo a aquellos agentes que compiten en alguna modalidad deportiva (triatlones, carreras de montaña, escalada…) fuera de horario laboral y que realizan planes de entrenamiento específicos marcados por el equipo o club deportivo.

Aparte de "conocer", la principal herramienta del servicio web es la que permite al entrenador planificar online un entrenamiento específico a un usuario concreto y evaluarlo una vez el agente lo ha realizado. El responsable planifica desde un ordenador, el técnico realiza el entrenamiento que le consta en su Smartphone y al finalizar ambos comparten impresiones. Esta opción permite planificar los entrenamientos y que los agentes los realicen cuando el servicio lo permita.

Al disponer de esta opción, se consigue que un solo entrenador, aun no estando presente en el entrenamiento, pueda planificar, controlar y evaluar la formación realizada por las personas a su cargo aunque estén lejos geográficamente.

3.1.3. App Polar Team

La aplicación Polar Team permite controlar/registrar las pulsaciones, niveles de intensidad, tiempo de entrenamiento y calorías, de varios pulsímetros simultáneamente y a tiempo real.

Muestra, en una misma pantalla del dispositivo, la frecuencia cardiaca y su correspondiente nivel de intensidad de los integrantes del equipo y permite consultar y compartir los informes con los agentes y realizar un seguimiento general del tipo de entrenamientos que realiza la unidad.

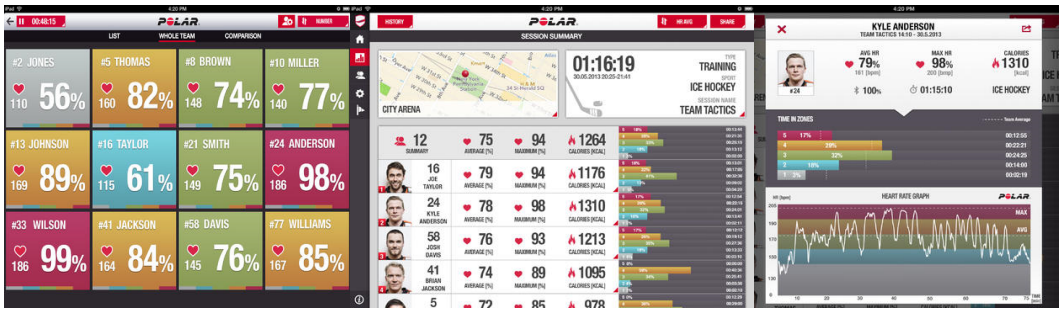


Figura 2. Diferentes pantallas de la aplicación Polar Team.

Este apartado finaliza con la presentación de esta herramienta de monitorización para entrenamientos *indoor*. La información de la que dispone el mando a tiempo real le permite realizar feedbacks al momento. Junto a las anteriores aplicaciones se completa el círculo que permite monitorizar y registrar la gran mayoría de los tipos de entrenamientos de instrucción física realizados por los técnicos EOD/CBRN.

3.2. Dispositivos de monitorización y registro para estudios e instrucción operativa

De igual manera que un reloj da bien la hora cuando cada una de sus piezas funcionan correctamente (por pequeñas que puedan ser), el éxito de una misión depende de la correcta ejecución de cada una de sus fases.

Dentro de las operativas policiales se integra gran cantidad de tecnología, sobre todo en el marco de la lucha *counter IED* (robots, equipos de detección, cámaras de todo tipo, etc…) y representan el grueso del gasto presupuestario. Sin embargo, el factor humano sigue siendo crucial para resolver las incidencias; Y, ¿cuánto se "invierte" en el factor humano? ¿Cuántos medios se ponen para realizar estudios?

Inconscientemente, en ocasiones, el factor humano es eclipsado por la tecnología y se descuida. Pero de la misma forma que la tecnología ayuda a los especialistas EOD/CBRN en la intervención, también les debería ayudar en la instrucción, permitiendo a los especialistas conocerse y conocer sus limitaciones y capacidades y a los mandos, responsables de los estudios, obtener datos suficientes que les permitan interrelacionar disciplinas y perspectivas científicas para adaptar las operativas a la realidad operacional.

Una solución a este apartado son las pulseras de actividad y la plataforma para Arduino *e-Health* de Cooking Hacks.

3.2.1 Pulsera de actividad diaria Polar Loop sincronizada con la App Polar Flow

Las pulseras de actividad existentes en el mercado registran en su mayoría los pasos realizados y las calorías gastadas. La pulsera Polar Loop aparte de lo anterior también registra de forma continua la intensidad de la actividad realizada en cinco niveles de intensidad: reposo, sentado, actividad baja, media y alta, el tiempo de reposo y las horas de sueño, diferenciando cuántas horas han sido de sueño reparador y cuantas de sueño intranquilo.

Estos datos se sincronizan en la aplicación Polar Flow para dispositivos móviles y/o directamente en la cuenta personal del especialista en la página web flow.polar.com



Figura 3. Pulsera de actividad Polar Loop y presentación de las diferentes pantallas dependiendo del dispositivo móvil.

Los datos son recogidos en formato informe que pueden ser consultados y analizados. Esto permite a los agentes conocer sus las rutinas de actividad así como las circunstancias afectan a su estado de salud o al sueño, pudiendo modificar hábitos tanto en la jornada laboral como en la vida personal que no le son favorables.

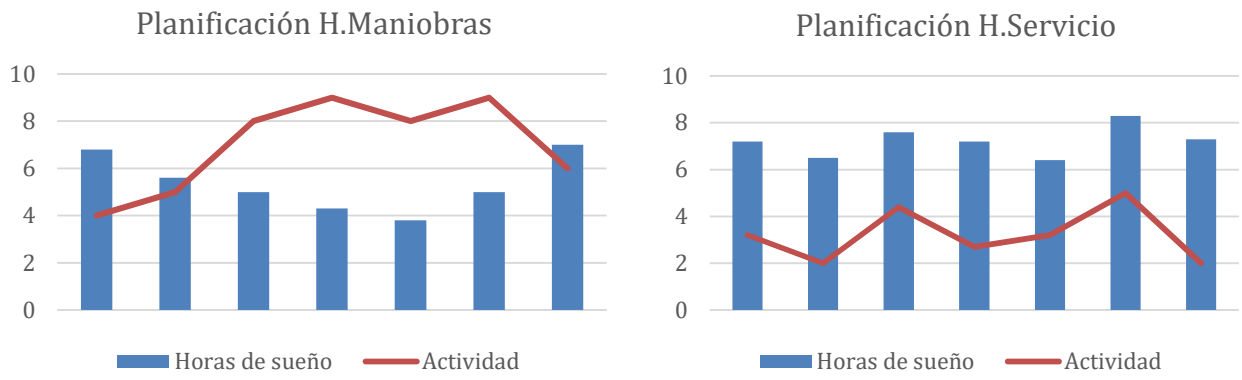


Gráfico 1. Datos semanales, en horas, del tiempo de actividad y descanso de un técnico.

Esta es quizá la pieza más pequeña del reloj, pero no menos importante, ya que nos permite estudiar la relación de la actividad con el rendimiento y capacidad de estar operativo, así como demostrar lo evidente, que a veces la dinámica de las operaciones no permite ver.

En este sentido se pudo observar que durante un periodo de maniobras (1 semana) los especialistas, pese a forzar valores extremo, mantenían sus capacidades operativas con un buen rendimiento, a diferencia de los días consecutivos en los que el rendimiento era bajo. Aparte, y a diferencia de un periodo normal de servicio en que los valores de actividad y descanso están equilibrados, en los días posteriores a las maniobras se concentraban las lesiones.

La pulsera de actividad es una herramienta simple, pero que aporta datos necesarios para "completar" y poder interrelacionar el resto de datos obtenidos con otros dispositivos como, por ejemplo, el pulsímetro o la plataforma e-Health.

3.2.2 Plataforma para Arduino e-Health de Cooking Hacks

e-Health Sensor es una plataforma para Arduino diseñada por Cooking Hacks que permite registrar los datos obtenidos por nueve sensores biométricos: pulso, oxígeno en la sangre (SpO2), el flujo de aire (respiración), la temperatura corporal, electrocardiograma (ECG) , glucómetro, la respuesta galvánica de la piel (GSR - sudoración), la presión arterial (esfigmomanómetro) y la posición del paciente (acelerómetro). Toda esta información se puede controlar en tiempo real utilizando Wi-Fi, GPRS, 3G, Bluetooth… y analizarla con posterioridad.

Dado que la finalidad del proyecto de Cooking Hacks es el diseño de una plataforma de monitorización médica de "código abierto" están a disposición las herramientas necesarias para el desarrollo de nuevas aplicaciones y el coste de los productos sean bajos.



Figura 4. Presentación de la plataforma y de los diferentes sensores del Cooking Hacks.

Para el tratamiento de los datos el grupo ha desarrollado una aplicación gratuita (Figura 5) que permite ver a tiempo real los datos procedentes de los sensores instalados y consultar los registros con posterioridad.

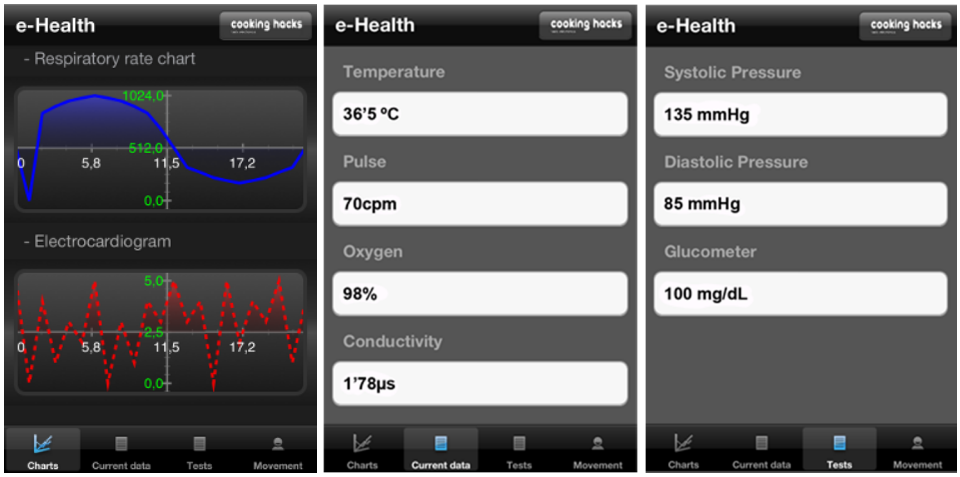


Figura 5. Diferentes pantallas de la aplicación e-Health.

El aspecto más relevante de la plataforma e-Health es, que al ser de fuente abierta, puedes modificar los parámetros y enviar los datos o exportarlos directamente a aplicaciones de desarrollo propio que cumplen las exigencias propias de la unidad operativa (Figura 6) e interrelacionar y cruzar los datos.

Actualmente, el problema no es la obtención de los datos, que estará limitado principalmente por el presupuesto económico, sino la capacidad de procesar los datos obtenidos y que estos tengan valor para los estudios. Por ello es importante el desarrollo de aplicaciones que faciliten esta tarea.



Figura 6. Diferentes pantallas de la App "C-IED" de diseño y desarrollo del Área TEDAX-NRBQ de la policía de la Generalitat de Cataluña – Mossos d'Esquadra.

4. Conclusiones

Los planes de formación deben ser conocidos no sólo por su dureza y exigencia, sino también por su excelencia y rigor científico.

Para lograr el máximo rendimiento de los técnicos EOD/CBRN es necesario adaptar los planes de formación a las necesidades individuales de cada agente.

El uso de pulsómetro sincronizado con el Smartphone durante los planes de instrucción física permite, por medio de diferentes Apps, analizar de forma individual la progresión de los técnicos, sin necesidad de que los instructores estén presentes en las sesiones de entrenamiento.

Disponer de servicios web para entrenadores, permite a los responsables de formación planificar los entrenamientos de forma personalizada a cada uno de los técnicos evitando sobreentrenamientos y trasferencias negativas.

Las pulseras de actividad registran "datos de base" que ayudan a los instructores a planificar mejor los entrenamientos y a los técnicos EOD/CBRN a mejorar su operativa. También aportan datos relevantes para el estudio operativo, el qual permite planificar mejor las intervenciones.

La plataforma e-Health registran y monitorizan gran cantidad de datos biométricos que permiten a los responsables de formación y operativa realizar estudios con objeto de aumentar el índice de éxito y supervivencia en las operaciones *Counter-IED.*

Actualmente el problema no es la obtención de los datos, sino la capacidad de procesarlos. Será de especial importancia el desarrollo de aplicaciones propias que faciliten el análisis de los mismos.

5. Bibliografía

ESTEVE-LANAO, J., CEJUELA, R. y CARDONA, C., "Aerobic training". En: *EHFA's foundations por exercise professionals*, cap. 8. Human Kinetics.

ESTEVE-LANAO, J., CEJUELA, R. y MENÉNDEZ DE LUARCA, J., "Entrenamiento de la resistencia en deportes cíclicos". En: *Entrenamiento deportivo: Fundamentos y aplicaciones en diferentes deportes.* Madrid: Panamericana, 2010, capítulo 12, pp. 171-193.

KNAPIK J. J.; BULLOCK, S. H.; CANADA, S.; TONEY, E., y WELLS, J. D., *The Aberdeen Proving Ground Injury Control Project: influence of a multiple intervention program on injuries and fitness among ordenance school soldiers in advanced individual training.* Aberdeen Proving Ground MD: U. S. Army Center for Health Promotion and Preventive Medicine, 2003.

LÓPEZ CHICHARRO, J., LÓPEZ MOJARES, L. M. *et al.*, "Overtraining parameters in Special Military Units". *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 1998

MCARDLE, W. D., KATCH, F. L. y KATCH, V. L., "Training for anaerobic and aerobic power". En *Essentials of exercise physiology.* Philadelphia: Williams and Wilkins, 1994.

PRIETO, J.; VALLE, M.; MONTOLIÚ, M. A.; MARTÍNEZ, P. C.; NISTAL, P., y GONZÁLEZ, V., "Relación entre la percepción de la capacidad aeróbica y el VO2max en bomberos". *Psicothema*, 2010, vol. 22, n.º 1, pp. 131-136.

Agradecimientos

Al Área TEDAX-NRBQ de la Policía de la Generalitat de Cataluña – Mossos d'Esquadra.

Nueva metodología de enseñanza/aprendizaje de la automatización e instrumentación electrónica basada en la motivación vocacional de los alumnos del Centro Universitario de la Defensa en la Academia General del Aire

Rodríguez Bermúdez, Germán [1,*], García Laencina, Pedro J. [1] y Roca Dorda, Joaquín [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa en la Academia General del Aire. german.rodriguez@cud.upct.es (GRB), pedroj.garcia@cud.upct.es (PJGL), joaquin.roca@upct.es (JRD);

***** Germán Rodríguez Bermúdez; E-Mail: german.rodriguez@cud.upct.es (GRB);

Abstract: En Septiembre del año 2010, el nuevo modelo de formación militar comenzó a dar sus primeros pasos en la Academia General del Aire (AGA) y en el Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier. Los alumnos del CUD de San Javier obtendrán el título oficial de Grado en Ingeniería en Organización Industrial (GIOI) por la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT). Dentro del plan de estudios definido para tal efecto, en el primer cuatrimestre del 2º Curso se imparte la asignatura obligatoria "Automatización e Instrumentación Electrónica" (AIE) de 4,5 ECTS. Este artículo presenta una nueva y eficiente metodología de enseñanza donde parte de los resultados de aprendizaje y las competencias adquiridas en la asignatura AIE se afianzan a través de la comprensión del funcionamiento de la electrónica del avión y del instrumental de vuelo, del caza a reacción C-101. Para ello, en esta asignatura se realiza una práctica en la que se visitan los talleres de mantenimiento de electrónica de la AGA para que los Cadetes Alumnos (CA), puedan aplicar in situ los conocimientos adquiridos.

Keywords: Centro Universitario de la Defensa; Academia General del Aire; Grado de Ingeniería en Organización Industrial; Automatización e Instrumentación Electrónica

---

1. Introducción

En Septiembre del año 2010, y con el objetivo principal de conseguir una preparación integral para los futuros oficiales del EA, el nuevo modelo de formación militar comenzó a dar sus primeros pasos en la AGA y en el CUD de San Javier. Atendiendo a las necesidades del Ministerio de Defensa, y como consecuencia de las interacciones naturales del sector de Seguridad y Defensa con el sector Industrial y Empresarial, los alumnos del CUD de San Javier obtendrán el título oficial de GIOI por la UPCT. Esta titulación proporcionará a los futuros oficiales del Ejército del Aire la formación requerida para el desempeño del ejercicio profesional que llevé a las máximas cotas de eficiencia el cumplimiento de las obligaciones de la organización militar, de la preparación de sus unidades y de su empleo en las operaciones y misiones donde se requiera de este nivel de excelencia [1].

En el modelo de enseñanza actual, los Cadetes Alumnos (CA) del CUD en la AGA pasan a ser Alféreces Alumnos (AA) tras superar todas las asignaturas de su formación integral. Este momento es un hito muy importante en su vida militar y académica. Atendiendo al perfil exigente de un alumno de militar, la motivación entre los estudiantes es máxima y ejemplar durante todo su proceso formativo. Sin embargo, la necesidad de superar todas las asignaturas en segundo curso para pasar de CA a AA puede llegar provocar que una parte importante del trabajo del alumno se focalice principalmente en la superación de la asignatura en detrimento del conocimiento de sus aplicaciones prácticas para su futuro desempeño profesional. Por tanto, y no sólo en asignaturas de segundo curso, el profesorado del CUD de San Javier ha puesto en marcha diferentes iniciativas y metodologías innovadoras de carácter docente que garantizan la máxima motivación del alumnado militar.

El proceso de la enseñanza requiere que el conocimiento se transmita de una forma adecuada. La habilidad de transmitir el conocimiento se puede categorizar de dos formas: Una de ellas es mantener la enseñanza estándar; y la otra es satisfacer a los estudiantes [2]. Habitualmente el satisfacer a los estudiantes es muy complejo debido a la diversidad de intereses de los mismos [2], pero en nuestro caso, todos ellos tienen un interés muy homogéneo, que es convertirse en los mejores oficiales del ejército del Aire. Y cabe preguntarse: “¿Cómo se puede satisfacer a los estudiantes?”, y la respuesta muy simple: “Un estudiante está satisfecho cuando siente que lo que está aprendiendo es útil” [2].

En el primer cuatrimestre del 2º Curso se imparte la asignatura obligatoria “Automatización e Instrumentación Electrónica” (AIE) de 4,5 ECTS. En esta asignatura se introducen los conceptos teóricos y prácticos básicos que permiten al alumno conocer los sistemas electrónicos analógicos, digitales y los principios de la automatización. En particular, este artículo presenta una nueva y eficiente metodología de enseñanza donde los resultados de aprendizaje y las competencias adquiridas en la asignatura AIE se consiguen a través de la comprensión del funcionamiento de la electrónica del avión y del instrumental de vuelo, del caza a reacción C-101 y en menor medida de la Avioneta Tamiz. Además, en esta asignatura se realiza una práctica final en la que se visita a los talleres de mantenimiento de electrónica de la AGA para que los Cadetes Alumnos, puedan aplicar in situ los conocimientos adquiridos. Téngase en cuenta que muchos de los Cadetes iniciarán en tercer curso su formación en vuelo teniendo como vehículo precisamente la Avioneta Tamiz y en cuarto curso el avión a reacción C-101, por lo que se estimula su curiosidad por aspectos tecnológicos del avión.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

Un aspecto fundamental en cualquier asignatura es el sistema de evaluación aplicado. En ese caso para evaluar correctamente se estable un sistema de avaluación continua que tiene en cuenta el estudio y el trabajo realizado a lo largo del curso. En la **Tabla 1** se pueden ver las actividades de evaluación realizadas así como los criterios y la ponderación aplicada a cada parte [3].

Actividad	Sistema y Criterios de Evaluación	Peso (%) sobre la nota final
Prueba Escrita Individual	***Cuestiones tipo Test (30%):*** Estas cuestiones se orientan a: conceptos, definiciones, etc... Se evalúan principalmente los conocimientos teóricos ***Problemas y casos prácticos (70%):*** Se evalúa principalmente la capacidad de aplicar conocimientos a la práctica y la capacidad de análisis.	50%
Prueba de Evaluación Intermedia	***Cuestiones teóricas y prácticas (100%):*** Se evalúan los conocimientos adquiridos.	20%
Prácticas de Laboratorio	***Ejecución del trabajo en equipo en laboratorio (50%)***: Se evalúan destrezas y habilidades para el manejo del material del Laboratorio ***Cuestionario tipo test (50%)***: Se evalúan conocimientos adquiridos en prácticas.	30%

Tabla 1. Sistema de evaluación aplicado a la asignatura AIE.

Se debe tener en cuenta que se aplica una nota de corte de 4.5 puntos sobre 10 tanto al apartado de Prácticas de Laboratorio como a la Prueba escrita Individual de forma que si no se sobre pasa la nota de corte en alguno de los apartados no se supera la asignatura.

3.1. Metodología de Trabajo

La metodología seguida durante las horas de trabajo y estudio en clase es ilustrar los contenidos de forma que el alumno se sienta totalmente implicado en la adquisición del conocimiento. Para ello, se

sigue un sistema metódico de ejemplificación y orientación de ejercicios hacia entornos militares con especial atención a los aviones de instrucción utilizados en la AGA, ver la **Tabla 2**. Esto ha conllevado, que el profesor previamente haya realizado una labor de investigación localizando, identificando y seleccionando aquellos esquemáticos del manual del Avión a reacción C-101 más adecuados para la docencia. Se debe resaltar que el personal de mantenimiento del Taller de electrónica de la AGA previa autorización de sus responsables cortésmente ha facilitado toda la documentación que ha hecho posible este trabajo.

Contenidos	Ejemplificaciones
Bloque I. Electrónica Digital Algebra de Boole; Lógica combinacional. Simplificación; Lógica secuencial.	Puertas lógicas integradas en la circuitería electrónica del C-101; Codificadores/Decodificadores del sistema de presentación de información del C-101; Displays de 7 segmentos del C-101; Comparativa entre placas analógicas y digitales reemplazables y equivalentes en la circuitería del C-101; Ejemplos de máquinas de estados finitos aplicados a sistemas de vuelo.
Bloque II. Electrónica Analógica Diodos. Tipos y aplicaciones; Transistores; Amplificadores operacionales. Aplicaciones lineales y no lineales y campos de aplicación.	Fuentes de alimentación con estructura de puente de diodos en el C-101; Diferentes tipos de diodos y aplicaciones en el C-101;. Indicadores de información Avioneta Tamiz y C-101; Transistores polarizados para amplificación; Transistores en corte-saturación (C-101); Amplificadores Operacionales (AO) en configuración en lazo cerrado y abierto. AO como amplificadores inversores, AO integradores comparadores, seguidores de tensión en el C-101; AO y transistores en el control de instrumentación de vuelo (C-101).
Bloque III. Evaluación y modelado de sistemas Modelado de sistemas; Régimen transitorio y estacionario; Cálculo de Estabilidad y lugar delas raíces; Controladores	Ejemplificación mediante posibles efectos de inclusión de controladores en vehículos, en la avioneta Tamiz y en el avión a reacción C-101.

Tabla 2. Contenidos de la asignatura y ejemplificaciones empleadas para su aprendizaje.

3.12. Metodología de Trabajo en las prácticas

La asignatura AIE consta de 5 sesiones prácticas de las cuales 4 se realizan en los Laboratorios del CUD de San Javier. Las sesiones de trabajo en Laboratorio I. II y III que versan sobre los contenidos

de los bloques temáticos I y II (Sistemas digitales, Semiconductores y Transistores) se realizan usando la plataforma SIDILAB. Este software tiene la particularidad de que solo cuando el alumno ha sido capaz de superar la primera tarea práctica y contestar correctamente las cuestiones sobre la misma, el sistema le permite avanzar hacia la siguiente tarea. Para la práctica V (Automatización) se emplea el software Labview que es ampliamente en el mundo académico e industrial.

La práctica número IV se denomina Electrónica Aeronáutica y es llevada a cabo en el Taller de mantenimiento de Electrónica de la AGA. Esta requiere del desarrollo de unos trabajos previos y de la siempre eficiente y generosa colaboración del personal de mantenimiento del Taller que como trabajo previo, desmontan y presentan en dos bancos de trabajo un panel de una avioneta Tamiz y un panel de un C-101. Además desmontan los equipos de esos paneles de forma que la circuitería queda fácilmente accesible. Es muy importante destacar que se acompaña cada equipo con su esquemático electrónico correspondiente para el posterior análisis. Dentro dela preparación de la práctica los alumnos deben realizar un repaso de la teoría de los Bloques I y II de la asignatura.

Una vez en el Taller en un primer instante se les presenta al personal que allí trabaja y se les hace ver el incalculable valor que tiene el trabajo del personal a cargo del mantenimiento, además se les recuerda las normas a seguir durante la práctica. Seguidamente se subdividen en dos grupos, el primero de ellos se dirige a la zona de trabajo 1 donde junto con el responsable de mantenimiento de electrónica del avión C-101 se les presenta el panel del C-101, se les explica cuál es el esquema general de funcionamiento de los sistemas electrónicos del avión, la utilidad cada uno de ellos tiene y se pasan a analizar los equipos que conforman el panel. Se le presta especial atención al horizonte artificial y los alumnos deben analizar el esquemático y predecir el funcionamiento del mismo por ellos mismos, fomentando su autoconfianza en los conocimientos adquiridos. El segundo grupo mientras tanto está en el banco de trabajo 2 donde se les explican conceptos fundamentales de la avioneta Tamiz y se les muestra como calibran equipos. Entre otras actividades se les hace una demostración del uso de los giroscopios que tan útiles son para la navegación aérea y que son las señales base para el horizonte artificial. En la **Figura 1** se muestra una imagen de la práctica donde un alumno examina un esquemático junto a la instrumentación de vuelo.

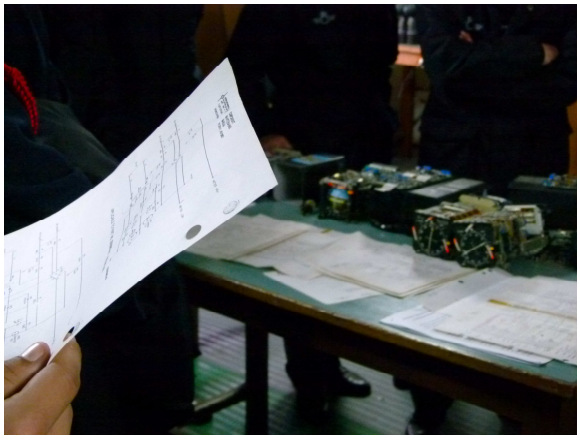


Figura 1. Sesión práctica de trabajo con la instrumentación de vuelo del Avión a reacción C-101.

Es importante destacar que en esta práctica se intenta generar un clima de confianza y colaboración más intenso delo normal y los CA disponen de tiempo para examinar los equipos que consideren más interesantes consultar las dudas que se les planteen, e incluso se les activan en el banco de pruebas aquellos que consideren más interesantes.

Para tener en cuenta el resultado de esta metodología de enseñanza, los CA en el mes de Diciembre tras realizar la práctica de Electrónica Aeronáutica se les entregó una encuesta cuyas preguntas se presentan en la **Tabla 3**.

Nº	**Preguntas realizadas**
1	Los contenidos de la asignatura Automatización e Instrumentación Electrónica están directamente relacionados con mi futuro profesional
2	La asignatura Automatización e Instrumentación Electrónica es muy complicada de aprobar
3	Las competencias adquiridas en la asignatura Automatización e Instrumentación Electrónica me van a permitir comprender el funcionamiento de los equipos electrónicos que utilizaré en mi futuro profesional
4	La asignatura Automatización e Instrumentación Electrónica me va a ayudar a entender el funcionamiento de la instrumentación del avión a reacción C-101
5	La asignatura Automatización e Instrumentación Electrónica me va a ayudar a entender el funcionamiento de la instrumentación de la avioneta Tamiz
6	Considero los contenidos de esta asignatura muy interesantes
7	En mi opinión esta asignatura debería tener más créditos
8	Considero que el estudio de esta asignatura es muy conveniente
9	Voy a aprobar la asignatura en primera convocatoria
10	Mi nivel de motivación con esta asignatura es muy alto

Tabla 3. Encuesta realizada a los alumnos.

Los CA debían contestar de forma voluntaria y anónima en un tiempo máximo de 10 minutos con una puntuación de 1 a 5 siento 1 “Nada de Acuerdo” y 5 “Totalmente de Acuerdo”.

3. Resultados y Discusión

Todos los alumnos que se encontraban en clase el día de realización de la encuesta anteriormente descrita (un total de 54 alumnos repartidos entre las secciones Alfa y Bravo) la rellenaron y entregaron. Los valores medios de los resultados obtenidos, se presentan en la **Tabla 4**.

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Resultados	3.70	2.83	3.68	3.64	3.72	3.68	2.85	3.25	4.24	3.79

Tabla 4. Valor medio de los resultados de la encuesta de percepción de la asignatura con puntuaciones de 1 a 5 puntos siendo 1 “Nada de Acuerdo” y 5 “Totalmente de Acuerdo”.

Se observa que la máxima puntuación es obtenida por la pregunta Nº 9 en la que el alumno está convencido de aprobar en primera convocatoria. Esta puntuación se ve reforzada por la pregunta Nº 10 en la que los CA califican su nivel de motivación con un 3.79. En el lado opuesto se observan las

preguntas 2 y 7 con puntuaciones de 2.83 y 2.85, en las que muestran que no perciben una especial dificultad en la materia y que no desean que el número de créditos aumente. En cuanto a los resultados obtenidos de las preguntas 1, 3, 4, 5, 6 y 8 con puntuaciones de 3.70, 3.68, 3.64, 3.72, 3.68, y 3,25, podemos ver indicios de que asumen la asignatura como parte de su formación integral, ven en ella una ayuda para poder entender el funcionamiento tanto de la Avioneta Tamiz como del avión a reacción C-101 y la consideran interesante.

4. Conclusiones

La asignatura Automatización e Instrumentación Electrónica que se imparte en el CUD de San Javier dentro del GOI, ha establecido una metodología de ejemplificación y enfoque de contenidos hacia la vida y el futuro militar de los CA de la AGA. Se ha intentado por parte del profesorado hacer lo más interesante posible, cercanos y útiles los contenidos de la misma a ojos de los CA. Finalmente se ha realizado una encuesta para poder conocer la percepción del alumno sobre el trabajo realizado. Si tenemos en cuenta que la motivación afecta al esfuerzo, el esfuerzo afecta a los resultados y los resultados positivos ayudan a incrementar las capacidades [4], la interpretación de los resultados de la encuesta es satisfactorio.

Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo de la AGA y muy especialmente de la sección de mantenimiento de Aeronaves y del Taller de mantenimiento de Electrónica de la AGA.

Referencias

1. http://www.cud.upct.es/index.php/estudios/presentacion-del-titulo
2. Hong Lin. Motivating and Stimulating Young Students. *IEEE Frontiers in Education conference* **1999**.
3. http://www.cud.upct.es/index.php/estudios/guias-docentes/.
4. M. Rost, Generating Student Motivation. *Worldview 2006* [Online]. Avalaible: http://www.longman.com/ae/worldview/motivation.pdf

Uso de cuadernos iPython en la creación de píldoras educativas sobre asignaturas STEM

Suárez García, Andrés [1,*], Arce Fariña, María Elena [1] , Rey González, Guillermo David [1], Álvarez Feijoo, Miguel Ángel [1] y Rodríguez Rodríguez, Francisco Javier [1]

[1] Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar de Marín; Emails: (asuarez), (elena.arce), (guillermo.rey), (alvarezfeijoo), (fjavierrrodriguez) @cud.uvigo.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: asuarez@cud.uvigo.es

---

Abstract: Las disciplinas académicas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM, por sus siglas en inglés) cobran cada vez más importancia, siendo consideradas fundamentales por las sociedades tecnológicamente avanzadas. La mayor parte de las asignaturas impartidas en el grado de Ingeniería Mecánica que se imparte en el Centro Universitario de la Defensa de la Escuela Naval de Marín son de índole STEM. En este tipo de enseñanzas, es importante la asociación de conceptos, aplicaciones y mundo real. Es por ello, que se debe animar al alumno a poner en juego dichos conceptos siempre y cuando sea posible. Una de las herramientas más novedosas procede del mundo de la investigación científica, donde se da prioridad a la transparencia y reproducibilidad de las investigaciones. Se trata de unos cuadernos de notas virtuales, cuadernos iPython, en los cuales se puede incrustar texto, vídeo o incluso gráficos interactivos donde se pueden aprender o revisar nuevos conceptos e interactuar con ellos. En el presente documento, se explica la creación de un cuaderno iPython para realizar una práctica relacionada con la asignatura Ingeniería de Fabricación y Calidad Dimensional. Se explicará el proceso de instalación, creación y uso de los cuadernos iPython.

Keywords: docencia; píldora; logística; optimización; STEM, CTIM, e-experimento

---

1 Introducción

El grado de Ingeniería Mecánica que se imparte en el Centro Universitario de la Defensa de la Escuela Naval de Marín (CUD-ENM) combina conocimientos y habilidades en las áreas de Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM, por sus siglas en inglés). En español, también se utiliza el acrónimo CTIM, aunque en este trabajo se ha decidido utilizar el acrónimo anglosajón por ser el más utilizado y reconocido. Este término es utilizado, sobre todo, en Estados Unidos y Europa para abordar temas relacionados con las áreas anteriormente mencionadas. En Europa, el portal más importante en la materia es Scientix (http://www.scientix.eu), disponible en español, en el cual se pueden encontrar recursos, iniciativas o proyectos puestos en marcha en relación a las disciplinas STEM.

En la enseñanza de las asignaturas STEM se debe enfatizar la asociación de los conceptos físico-matemáticos con el mundo real. Para facilitar este paso, se ha de utilizar todos los materiales disponibles, lo que dota a las tareas de cierta transversalidad. Dentro de este campo, una de las herramientas más innovadoras son los cuadernos de trabajo iPython. Los cuadernos de trabajo iPython pueden ser definidos como entornos de trabajo interactivos. En ellos, se puede combinar texto, ecuaciones matemáticas, gráficos y objetos multimedia, quedando almacenados en un fichero JSON [1]. Por ello, la principal herramienta para su creación o consulta es la de un navegador web. Además, son gratuitos y de código abierto con un fuerte desarrollo por parte de la comunidad científica. La finalidad de esta herramienta es convertirse en un método ágil para la divulgación científica y el desarrollo de nuevas ideas. Sin ir más lejos, Nature, una de las revistas científicas más prestigiosas a nivel mundial [2], ha empezado a recomendar su uso por su enorme comunidad de usuarios [3] y la transparencia en la reproducibilidad que conlleva su uso [4]. Entre sus beneficios, destaca la reproducibilidad de cualquier estudio realizado, puesto que los datos y resultados quedan almacenados o referenciados en el cuaderno iPython. Para hacerse una idea de la potencialidad de un cuaderno iPython como herramienta docente, se pueden visitar distintas galerías de cuadernos existentes en la web [5]–[7].

Además del encapsulamiento de contenido multimedia, los cuadernos iPython ofrece la creación de experimentos virtuales (e-experimentos) mediante el famoso lenguaje de programación Python [8]. Incluso en las mejores instituciones, hay experimentos cuya realización es prohibitiva debido al alto coste de los equipamientos necesarios o la imposibilidad de llevarla a cabo. La mejor alternativa es la creación de e-experimentos en los cuales el estudiante tenga la libertad de experimentar, permitiendo una experiencia didáctica más rica y creativa debido a la posibilidad de "tocar" el problema modificando simulaciones prescritas, sin miedo a dañar equipos costosos. Finalmente, destacar que un cuaderno iPython, una vez programado, puede ser utilizado y disfrutado sin necesidad de reprogramar una sola línea de código.

Por todo lo anteriormente expuesto, en el presente trabajo, se propone el uso de cuadernos de trabajo iPython para el desarrollo de contenidos aplicados en la asignatura Ingeniería de Fabricación y Calidad Dimensional, asignatura impartida en el cuarto curso del grado del CUD-ENM. Se utilizará un cuaderno iPython en una sesión práctica para resolver un problema de optimización relacionado con los procesos industriales mostrados en dicha asignatura.

2 Materiales y Métodos. Sección Experimental

2.1 Breve historia de iPython

Los cuadernos de notas de iPython comenzaron su andadura en el 2007. En aquel año, su función era la de servir de terminal de texto interactivo para el lenguaje de programación Python, sin capacidad de añadir imágenes, ni objetos multimedia, etc. Solamente era utilizado de forma profusa por los usuarios del popular lenguaje, estando alejado de su uso como cuaderno de notas científico actual. No se podía intuir la transformación que experimentaría a lo largo de los años venideros.

A día de hoy, iPython es un rico entorno de trabajo basado en tecnologías web que se puede utilizar como cuaderno de notas para cualquier fin (ver **Figura 1**). El hecho de poder utilizar un lenguaje de programación, eleva su interactividad pudiendo almacenar y ejecutar los algoritmos desarrollados a lo largo de la labor investigadora. En 2014, su creador, Fernando Pérez, creó el proyecto [9], un entorno de trabajo basado en los cuadernos iPython en el que poder utilizar cualquier lenguaje de programación. Actualmente, se pueden utilizar los lenguajes de programación Julia, Haskell, R, Ruby, Perl y Octave, entre otros. Su polivalencia ha hecho incrementar el interés de la comunidad por esta plataforma, tal y como refleja las continuas donaciones que está recibiendo este proyecto para su continuo desarrollo por parte de gigantes de la industria del software [10].

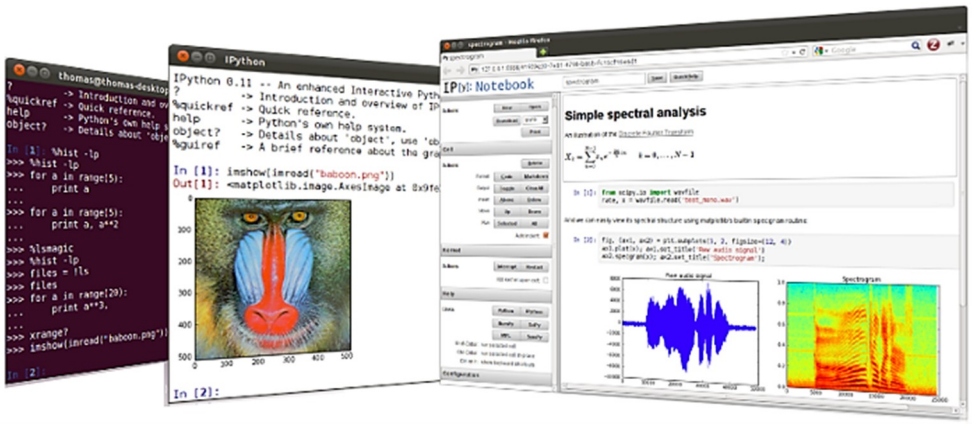


Figura 1 Evolución del entorno iPython (Recuperado de http://ipython.org/)

2.2 Instalación y uso

En esta sección, lejos de exponer en profundidad cada una de las funcionalidades de los cuadernos iPython o ser un tutorial completo de uso, se dará unas indicaciones sobre el mismo, así como las instrucciones para su instalación. Para profundizar en su uso, se recomienda visitar los recursos didácticos existentes en la web. A día de hoy, existe una amplia comunidad de usuarios hispanoparlantes y documentación en español [11], [12].

2.2.1 Instalación

Para facilitar la instalación, en vez de instalar las librerías mediante una consola de Python, se recomienda descargar e instalar software científico basado en Python. Estos softwares, además de traer de serie los cuadernos iPython, vienen con una serie de librerías científicas que las hacen más atractivas

para su uso. A día de hoy, dos de las más conocidas distribuciones son Anaconda [13] y Canopy [14]. Ambas gratuitas y con una amplia comunidad de usuarios. En el trabajo aquí presentado, se usará la distribución Anaconda.

2.2.2 Primeros pasos

Una vez instalado el software necesario, el trabajo con los cuadernos iPython se realiza a través de un navegador web, puesto que en su ejecución se crea un servidor Web que solamente verá el usuario de la computadora, el cual gestionará la sesión de trabajo. Para ejecutarlo, hay que situarse en el directorio de trabajo y ejecutar el comando indicado en la **Figura 2**.

```
ipython notebook
```

Figura 2 Comando de arranque de una sesión con cuadernos iPython

Una vez arranque la sesión de trabajo, pulsando el botón "New Notebook" se creará un documento dividido en una serie de celdas (ver **Figura 3**). Las celdas son las unidades básicas del cuaderno de trabajo en las cuales introducir texto, objetos multimedia y código de programación. Una vez introducido el programa, si queremos que se ejecute habría que darle al botón con forma de "play" en la barra superior o pulsar la combinación de teclas "Shift+Intro".



Figura 3 Celda de cuaderno de trabajo iPython

2.3 Planteamiento del problema

La asignatura Ingeniería de Fabricación y Calidad Dimensional tiene como objetivo desarrollar los conocimientos, habilidades y capacidades para clasificar y seleccionar los distintos procesos de fabricación que mejor se adecuen a cada sector productivo. El alumno adquirirá capacidades para identificar y planificar las diferentes etapas del proceso productivo a partir de las especificaciones de diseño de producto, seleccionando las distintas fases, máquinas, equipos, utillajes, herramientas y técnicas de verificación más convenientes. Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en la fabricación es la maximización de los beneficios.

El problema propuesto se encuentra descrito en la **Figura 4**. En él se habla de una empresa que quiere maximizar sus ganancias combinando óptimamente el número de unidades producidas en función de diferentes restricciones tales como costes de materia prima, fabricación,… El problema se formula matemáticamente como un problema de optimización lineal, cuya función a maximizar está descrita en

la Ecuación (1) y las restricciones de coste, horas de fabricación y unidades mínimas en el bloque de Ecuaciones (2). Las soluciones han de ser números enteros mayores que cero.

Encuentre la producción que maximice los beneficios semanales de una empresa familiar que depende principalmente de dos productos: X e Y. El producto X se vende por 27 €, usa materiales por un coste de 10 €, además de unos costes variables estimados en 14 €. El producto Y se vende por 21 €, siendo los costes de materiales y variables 9 € y 10 €, respectivamente. Para su realización se requieren dos operaciones: el corte y el pulido. El producto X requiere 2 h de corte y 1 h de pulido para su realización; mientras que, el producto Y, requiere 1 h de corte y otra de pulido. Cada mes, la maquinaria y operarios de la empresa pueden proporcionar un total de 100 h de corte y 80 h de pulido. Además, la máxima producción posible del producto X es de 80 unidades.

Figura 4 Enunciado del problema de optimización de beneficios [15].

$$\textit{maximizar} \quad 3x + 2y \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \textit{sujeto a} \quad & x + y \leq 80 \\ & 2x + y \leq 100 \\ & 0 \leq x \leq 80 \\ & 0 \leq y \\ & x, y \in \mathbb{Z} \end{aligned} \tag{2}$$

3 Resultados y Discusión

A continuación, se describe el cuaderno iPython desarrollado para resolver el problema. En Python existen múltiples librerías de optimización lineal y convexa tales como CVXOPT [16] , PuLP [17] y Pyomo [18], cada una con sus ventajas e inconvenientes. En este caso, se ha optado por la librería CVXOPT. Por ello, es necesario la instalación de la librería a utilizar para resolver el problema utilizando el comando indicado en la **Figura 5**.

```
conda install -chttps://conda.binstar.org/omnia cvxopt
```

Figura 5 Comando de instalación del paquete “cvxopt” de optimización convexa

En la **Figura 6** se encuentra el código desarrollado para resolver el problema previamente planteado en la Sección 2.3. En la primera celda, después de llamar las librerías necesarias, se han declarado las variables, las restricciones y la función objetivo del problema, para en último lugar proceder a su resolución. La sucesión de valores de forma sucesiva es un registro creado por el algoritmo de resolución cuya finalización se produce después de 6 iteraciones. En la segunda celda, se plasman la combinación óptima de unidades del producto X e Y para maximizar los beneficios semanales, 20 unidades y 60 unidades respectivamente. A partir de este punto, sería labor del docente el pedirle al alumno que

experimentase con nuevas restricciones o nuevos valores para las restricciones ya existentes, buscando la familiarización del estudiante con el proceso de planteamiento y solución de los problemas relacionados con la optimización.

In [1]:
```
import numpy
from cvxopt.modeling import *

# variables
x = variable()
y = variable()

# restricciones
r1 = x + y <= 80
r2 = 2*x + y <= 100
r3 = x >= 0
r4 = x <= 80
r5 = y >= 0

# función objetivo
fo = - (3*x + 2*y)

# optimización lineal
lp = op(fo, [r1, r2, r3, r4, r5])
lp.solve()
lp.status
```

```
     pcost       dcost       gap    pres   dres   k/t
 0: -1.6500e+02 -5.3333e+02  2e+02  9e-02  1e+00  1e+00
 1: -1.6418e+02 -2.3847e+02  4e+01  2e-02  3e-01  3e-01
 2: -1.7985e+02 -1.9779e+02  1e+01  5e-03  6e-02  8e-01
 3: -1.7997e+02 -1.8029e+02  2e-01  8e-05  1e-03  2e-02
 4: -1.8000e+02 -1.8000e+02  2e-03  8e-07  1e-05  2e-04
 5: -1.8000e+02 -1.8000e+02  2e-05  8e-09  1e-07  2e-06
 6: -1.8000e+02 -1.8000e+02  2e-07  8e-11  1e-09  2e-08
Optimal solution found.
```

Out[1]: 'optimal'

In [2]:
```
# valores óptimos de producción de X e Y
print(x.value)
print(y.value)
```

```
[ 2.00e+01]

[ 6.00e+01]
```

Figura 6 Cuaderno iPython – Planteamiento y resolución del problema de optimización

En la **Figura 7** se puede ver la representación gráfica, realizada con el cuaderno iPython, del problema estudiado. Cada recta representa la igualdad de las restricciones planteadas de tal forma que algunas veces nos interesará que sea menor o igual y otras mayor o igual. En la zona común a todas estas restricciones, se ha calculado la función objetivo especificada coloreándose los beneficios obtenidos según se cantidad. Puede apreciarse como se produce el máximo en la coordenada (20, 60), alcanzando los beneficios su valor máximo de 180 €.

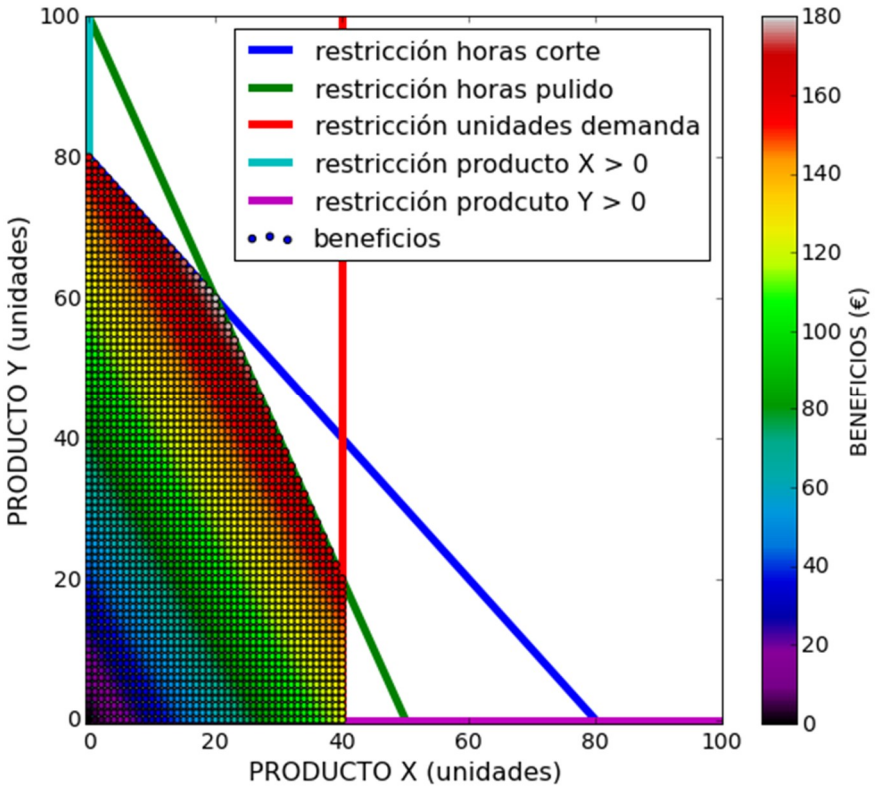


Figura 7 Representación gráfica de restricciones y función de coste

4 Conclusiones

En el momento de la redacción del presente trabajo, solamente se pueden extraer conclusiones acerca de la creación de los cuadernos iPython. Este entorno tiene una leve curvatura de aprendizaje si lo único que se desea es introducir contenido multimedia. Sin embargo, para aprovechar plenamente su potencial utilizándolo como laboratorio virtual e implementar e-experimentos, se requieren nociones de Python. Esto último puede parecer un escollo para quienes no estén familiarizados con la programación. Este obstáculo puede ser superado de dos maneras: aprendiendo a programar gracias a la enorme cantidad de recursos disponible en la Web y la comunidad de usuarios deseosos de ayudar, o reutilizando los cuadernos ya existentes con licencia de dominio público.

Después de la impartición de la asignatura Ingeniería de Fabricación y Calidad Dimensional, se podrán extraer más conclusiones de la utilidad de estas píldoras de conocimiento interactivas. Para ello, se pasará un cuestionario a los alumnos con la finalidad de contrastar el agrado de la herramienta, así como del nivel de asimilación de los conceptos expuestos. Se ha planteado el uso de los cuadernos sin nociones de programación que puedan enmascarar su objetivo primordial: el disfrute desde un primer momento de los e-experimentos por parte del alumno, poniendo toda su atención en las nociones relacionadas con la materia que debe asimilar.

Referencias

1 Python Development Team, The Jupyter Notebook Format — IPython 3.2.0 documentation. [Online]. Available: https://ipython.org/ipython-doc/3/notebook/nbformat.html. [Accessed: 26-Jul-**2015**].

2 Macmillan Publishers. Impact Factors for journals published by Nature Publishing Group. [Online]. Available: http://www.nature.com/npg_/company_info/impact_factors.html. [Accessed: 24-Jul-**2015**].

3 J. M. Perkel. Programming: Pick up Python, *Nature*, vol. 518, no. 7537, pp. 125–126, Feb. **2015.**

4 H. Shen. Interactive notebooks: Sharing the code, *Nature*, vol. 515, no. 7525, pp. 151–152, Nov. **2014.**

5 J. Wittenauer. A gallery of interesting IPython Notebooks. [Online]. Available: https://github.com/ipython/ipython/wiki/A-gallery-of-interesting-IPython-Notebooks. [Accessed: 26-Jul-**2015**].

6 nbviewer - A simple way to share Jupyter Notebooks. [Online]. Available: http://nbviewer.ipython.org/. [Accessed: 26-Jul-**2015**].

7 Notebook Gallery. [Online]. Available: http://nb.bianp.net/sort/views/. [Accessed: 26-Jul-**2015**].

8 IEEE Spectrum, The 2015 Top Ten Programming Languages. [Online]. Available: http://spectrum.ieee.org/computing/software/the-2015-top-ten-programming-languages/. [Accessed: 24-Jul-**2015**].

9 F. Pérez. Jupyter Project. [Online]. Available: https://jupyter.org/. [Accessed: 02-Aug-**2015**].

10 Python Development Team. Sponsors — IPython. [Online]. Available: http://ipython.org/sponsors.html. [Accessed: 26-Jul-**2015**].

11 Pybonacci | Python y Ciencia. [Online]. Available: http://pybonacci.org/. [Accessed: 27-Jul-**2015**].

12 CAChemE - Computer-aided chemical engineering. [Online]. Available: http://cacheme.org/. [Accessed: 27-Jul-**2015**].

13 Continuum Analytics. Download Anaconda Python Distribution. [Online]. Available: http://continuum.io/downloads. [Accessed: 27-Jul-**2015**].

14 Entought Scientific Computing Solutions. Python Distribution and Integrated Analysis Environment | Enthought Canopy. [Online]. Available: https://www.enthought.com/products/canopy/. [Accessed: 27-Jul-**2015**].

15 I. Slavitt. Using Python for linear optimization. [Online]. Available: http://isaacslavitt.com/2014/06/20/linear-optimization-in-python/.

16 S. Boyd and L. Vandenberghe. Convex Optimization. Cambridge: Cambridge University Press, **2004**.

17 S. Mitchell, S. M. Consulting, and I. Dunning. PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python. **2011**.

18 W. E. Hart, J.-P. Watson, and D. L. Woodruff. Pyomo: modeling and solving mathematical programs in Python. *Math. Program. Comput.*, vol. 3, no. 3, pp. 219–260, **2011**.

El factor humano como eslabón débil de la Ciberseguridad: Riesgos y formas de afrontarlos

Cerqueiro Pequeño, Jorge [1,*], Pérez Rodríguez, Belén [1] y Valiente Pérez, José [2]

[1] Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales de Vigo; Email: decano@coitivigo.es, belenpr@ingenierosvigo.com

[2] Centro de Ciberseguridad Industrial; Email: info@cci-es.org

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: decano@coitivigo.es

---

Abstract: De entre todos los elementos que componen el proceso de seguridad informática en una organización, la documentación existente y la experiencia indican que el eslabón más débil del mismo, y al que dirigen preferentemente sus esfuerzos los atacantes, es el factor humano. Si bien en los últimos años se ha producido un fuerte incremento de la fiabilidad y seguridad intrínseca de los protocolos de red y de los sistemas software y hardware, esto no ha llevado a un descenso comparable de las incidencias de seguridad observadas, debido en gran medida a los efectos de la componente humana que interactúa con estos sistemas. De forma consciente o inconsciente, intencionada o casual, las conductas inadecuadas o el incumplimiento o desvío respecto de las normas fijadas para desarrollar las distintas acciones previstas sobre los diversos sistemas pueden dar lugar a agujeros de seguridad, o en el peor de lo casos a verdaderos incidentes. En el presente trabajo se realiza un estudio sobre los riesgos derivados de la acción del factor humano en la organización y sus causas, para finalizar proponiendo un conjunto de las estrategias y técnicas más adecuadas para minimizar los citados riesgos.

Keywords: Factor Humano; Riesgo; Ciberseguridad; Estrategias; Organización

---

1. Introducción

La seguridad de la información es una necesidad de primer orden en cualquier organización moderna, en un contexto en que cada vez más las ventajas competitivas se apoyan en factores

intangibles, que son soportados y administrados por un conjunto de sistemas informáticos cada vez más complejo y conectado con otros sistemas externos a través de redes de acceso público.

Como punto de partida al abordar el estudio de los factores humanos sobre la seguridad de la información en las organizaciones, pueden considerarse en los sistemas de información corporativos tres etapas diferentes: la de su Diseño, la de su Instalación/Puesta en Marcha, y la de Producción. A los efectos de este trabajo se considerará únicamente la etapa de Producción, al ser esta la de mayor duración y en la que un mayor número de perfiles humanos diferentes están implicados en la misma, sin desdeñar que algunos de los posibles riesgos a considerar pudiesen ser contemplados y minimizados empleando buenas prácticas en las dos etapas anteriores.

A la hora de definir el concepto de "seguridad de la información" se ha considerado tradicionalmente un conjunto básico de seis atributos o principios clave [1], de los cuales los tres primeros son los más habitualmente mencionados:

- Confidencialidad: La información confidencial debe estar adecuadamente protegida.
- Integridad: La información deberá mantenerse intacta y válida.
- Disponibilidad: La información se mantendrá disponible y accesible.
- Autenticación: El origen/autoría de la información estará correctamente identificado.
- Control de Acceso: El acceso a la información está controlado/limitado a los autorizados.
- No Repudiación: Ni el emisor ni el receptor pueden negar la transacción de información.

Los atributos anteriores deben contemplarse en un contexto de "usabilidad", es decir, la seguridad debe ser efectiva sin obstaculizar la capacidad de los legítimos usuarios para trabajar y hacer uso de la información a la cual están autorizados a acceder.

Es de considerar que autores más recientes [2] consideran la lista anterior como insuficiente para definir la seguridad de la información, proponiendo un nuevo conjunto de seis factores esenciales a garantizar, que conservan tres de los atributos de la relación anterior: Disponibilidad, Integridad y Confidencialidad, a la vez que incorporan tres nuevos factores:

- Utilidad: La información es plenamente utilizable para los fines establecidos.
- Autenticidad: La información es conforme a la realidad en que se enmarca.
- Posesión: La información está en posesión y bajo el control de su(s) legítimo(s) propietario(s).

En la organización moderna, la gestión de la seguridad de la información es un proceso complejo e interdisciplinar, que se apoya en tres elementos fundamentales e interrelacionados: la Tecnología, los Procesos y las Personas o Factor Humano [3]. Cualquier intervención a realizar: evaluación de riesgos, elaboración del plan de seguridad, etc. deberá necesariamente abordar estos tres elementos de forma directa en el marco de la propia organización, así como sus interacciones y los contextos en que estas se producen.

2. El Factor Humano en la Seguridad de la Información

De entre los tres elementos citados en la sección anterior que componen el proceso de seguridad informática en una organización, el factor humano es considerado de forma persistente como el eslabón más débil del mismo, y al que dirigen a menudo sus esfuerzos los atacantes [4] [5] [6]. Estudios sectoriales recientes [7] [8] ponen de manifiesto que las organizaciones son conscientes del

riesgo que suponen las actitudes y comportamientos de los usuarios finales de cara a la seguridad de sus datos. Asimismo, en las conclusiones del análisis publicado de los datos correspondientes al año 2014 [8] se puede observar que, aunque la formación de los usuarios puede haber sido efectiva, los atacantes han podido adaptarse y ajustar sus técnicas más rápidamente de lo que los usuarios finales pueden ser formados para enfrentarse a estas amenazas.

Si bien en los últimos años se ha producido un fuerte incremento de la fiabilidad y seguridad intrínseca de los protocolos de red y de los sistemas software y hardware, esto no ha llevado a un descenso comparable de las incidencias de seguridad observadas, debido en gran medida a los efectos de la componente humana que interactúa con estos sistemas. De forma consciente o inconsciente, intencionada o casual, las conductas inadecuadas o el incumplimiento o desvío respecto de las normas fijadas para desarrollar las distintas acciones previstas sobre los diversos sistemas pueden dar lugar a agujeros de seguridad, o en el peor de los casos a verdaderos incidentes.

2.1. Tipos de Errores Humanos en la Seguridad de la Información

El estudio de los fallos de seguridad en la gestión de la información puede llevarse a cabo desde diferentes puntos de vista en función de los objetivos que se pretenden alcanzar. A los efectos de explicar las razones por las cuales se producen estos fallos, en la literatura se pueden encontrar cinco tipos genéricos de errores derivados de las acciones de los usuarios [9]:

- Omisión: No se lleva a cabo una acción necesaria.
- Consumación: Se realiza un procedimiento o acción incorrecto, o de forma incorrecta.
- Superfluo: Se lleva a cabo una acción innecesaria.
- Secuencial: Se llevan a cabo una serie de acciones en un orden inadecuado.
- Tiempo: La acción no se lleva a cabo en el instante temporal correcto.

Desde el punto de vista del tipo de amenaza que suponen los usuarios finales sobre la seguridad, en función de su actitud estos podrían clasificarse en las siguientes tres categorías [10]: Usuarios Maliciosos (*Malicious Insiders*, menos frecuentes pero con gran potencial de causar daño), Usuarios Utilizados (*Exploited Insiders*, engañados por terceros para realizar actos dañinos), y *Usuarios Descuidados* (*Careless Insiders*, pueden realizar acciones dañinas accidentalmente).

Un análisis más detallado apoyado en datos experimentales [11] utiliza una taxonomía de dos factores: la Intencionalidad (si el comportamiento descrito es intencionadamente malicioso, intencionadamente beneficial, o un punto entre ambos) y la Competencia Técnica (el grado de conocimiento y competencias TIC necesarias para llevar a cabo el comportamiento descrito). De las seis categorías de comportamientos de seguridad que resultan, dos de ellas, denominadas "Seguridad Consciente" (*Aware Assurance*) e "Higiene Básica" (*Basic Hygiene*) serían positivas al contribuir a incrementar la seguridad, mientras que otras cuatro podrían resultar en fallos y compromisos:

- Daño Intencionado (*Intentional Destruction*): Requiere competencia técnica junto con una fuerte intención de causar daño a la organización por parte del usuario.
- Mal Uso/Abuso Perjudicial (*Detrimental Misuse*): Requiere un mínimo de competencia técnica, y la intención de causar daño mediante la molestia, acoso, saltarse reglas, etc.
- Manipulación Peligrosa (*Dangerous Tinkering*): Requiere de competencia técnica, pero sin una clara intención de dañar los recursos TIC de la organización.

- Error Inocente (*Naïve Mistakes*): Requiere una competencia técnica mínima, sin intención clara de causar daño a la organización.

En este trabajo se consideran fundamentalmente las amenazas derivadas de este último comportamiento, al ser el más frecuente según los trabajos e informes publicados al respecto [7] [8] [9] [12] [13], en los que la mayor parte de las estrategias, técnicas y herramientas que se proponen para potenciar la seguridad buscan atajar los errores humanos accidentales, asociados con la manera en que los usuarios individuales interaccionan con el sistema.

Dentro de este ámbito se encontrarían las dificultades en la comprensión y la utilización de elementos de seguridad, los procedimientos que se apoyan en la capacidad de memorización del usuario, las operaciones de seguridad que requieren de la intervención urgente del usuario (que puede tener una fuerte carga de trabajo que requiera toda su atención en ese momento), los comportamientos rutinarios que llevan a fallos o errores cognitivos y los errores de completado de operaciones, estos dos últimos potenciados a menudo por el cansancio o la falta de atención del propio usuario.

Es necesario resaltar a este respecto la importancia de la usabilidad tanto de los sistemas y aplicaciones como de sus funciones y tecnologías de seguridad, ante la relación repetidamente documentada entre una pobre usabilidad y el deseo humano de buscar atajos para minimizar el esfuerzo mental mientras se mantiene un nivel de rendimiento aceptable, fenómeno que se acentúa con la falta de motivación o de formación específica hacia la seguridad. Por ello, el proceso de diseño de los productos de seguridad debe tener en cuenta al usuario de los mismos, aplicando los principios de interacción hombre-máquina a lo largo de todo ese proceso [9], y aliviándolos en la medida de lo posible de tareas de seguridad que puedan realizarse de forma centralizada y/o automatizada.

2.2. Sesgos en la Percepción del Riesgo y en el Procesado de la Información

Los seres humanos toman habitualmente decisiones sobre sus acciones en base a su estimación de los riesgos asociados con las opciones que tienen disponibles en ese momento. En el caso de los usuarios TIC, la forma en que perciben las amenazas influirá sobre su respuesta de comportamiento, y dado que el análisis de la información necesaria para una decisión racional sería poco práctico, se recurre a menudo a los atajos y la heurística en la toma de decisiones, estrategias ambas que adolecen de sesgos a la hora de la correcta percepción de los riesgos a la seguridad de la información. Existe nutrida investigación sobre la percepción de riesgos en general, aunque poca empírica relacionada con el ámbito de la seguridad, habiéndose propuesto distintos conjuntos de factores que afectan a la percepción de los riesgos de seguridad, de los cuales el que se ha considerado más completo contempla once factores [9], que se relacionan aplicados a este ámbito:

- Heurística de Disponibilidad: Los fallos de seguridad son raros, lo que probablemente lleve a que se subestime dicho riesgo.
- Sesgo de Optimismo: Los usuarios tienden a creer que los hackers no valoran la información en sus ordenadores, y por ello se ven como objetivos improbables.
- Nivel de Control: Al aumentar su competencia en las TIC, un usuario puede sobreestimar su capacidad para controlar la amenaza, y por tanto asumir más riesgos.
- Nivel de Conocimiento: Los usuarios necesitan disponer de conocimientos técnicos para comprender la magnitud o las implicaciones de los potenciales fallos de seguridad.

- Homeostasis o Compensación de Riesgos: La incorporación de elementos y sistemas de seguridad (firewall, antivirus, etc.) puede fomentar las conductas de riesgo de los usuarios.
- Acumulación de Riesgos: El riesgo de un pequeño fallo de procedimiento se multiplica al pasar el tiempo, o bien cuando se combina con los cometidos por otros usuarios.
- Sesgo de Omisión: Es generalmente menos cuestionable la omisión que la acción, lo que aumenta la posibilidad de errores de completado de operaciones (*logout*, etc.).
- Efectos de la Familiaridad: Los usuarios pueden volverse descuidados con las tareas que llevan a cabo a diario, lo que llevaría a un incremento en los comportamientos de riesgo.
- Efecto del Marco: Es más probable que los usuarios sigan las directrices de seguridad si el resultado se describe enfatizando los posibles beneficios que al contrario.
- Personalidad y Estilo Cognitivo: Los usuarios del tipo "en busca de sensaciones" son más propensos a asumir riesgos en sus actos que los del tipo "las reglas están para cumplirlas".
- Influencia de los Factores Sociales: En grupos grandes de usuarios, las personas pueden sentir una responsabilidad personal menor por la seguridad.

2.3. Influencia de la Cultura y las Políticas Corporativas

Teniendo en cuenta los factores citados en el apartado anterior, un estudio detallado sobre los riesgos derivados del factor humano no puede soslayar la cultura de la organización como un elemento adicional que influirá en la actitud de los usuarios, especialmente en lo que se refiere a la seguridad de sus conductas: el horizonte, la motivación, la misión, los valores, el control, la dimensión, las responsabilidades y la orientación, entre otras características de la organización, modulan las percepciones del personal en sus tareas diarias [9], y su inercia y carácter de largo plazo dificulta los cambios relativos a los mismos.

Adicionalmente, que se consiga alcanzar un nivel de resistencia elevado a amenazas a la seguridad dependerá en gran medida de las políticas existentes (a corto y medio plazo) en la organización, entre otras, acerca de la formación del personal, específicamente en temas de seguridad [8], la comunicación interna, especialmente entre la Dirección y el departamento TIC [12], la contratación de personal, especialmente el de corta duración [14], el uso de equipos propios del usuario (BYOD) [15], el recurso a almacenamientos *cloud* [13], y la movilidad geográfica de los usuarios [16], configurando así un mapa definido de riesgos para la seguridad de la información corporativa [10].

3. Estado Actual de las Amenazas a la Seguridad de la Información relacionadas con el Factor Humano

De acuerdo con las fuentes de información más actualizadas sobre seguridad en TIC, la complejidad de las amenazas a la seguridad de la información en las empresas está en constante aumento en todas las áreas geográficas del planeta y en todos los sectores económicos, de forma pareja a la evolución de los sistemas de protección que bloquean intrusiones de red, malware y correo basura instalados en las organizaciones. La respuesta de los agentes maliciosos ha sido aprovecharse de las debilidades de los usuarios mediante tácticas cada vez más refinadas y dirigidas, como el envío de peticiones falsas de cambio de clave, o mensajes maliciosos con ficheros adjuntos modificados para explotar vulnerabilidades del software de uso habitual [12].

La finalidad habitual de estas amenazas suelen ser alcanzar el control de uno o varios equipos dentro de la red corporativa, para su explotación mediante *ransomware*, *botnets*, o *trojans* para la obtención de información económica (cuentas bancarias, tarjetas de crédito, proveedores y clientes, etc.) que pueda ser utilizada para su uso fraudulento, bien directamente o en combinación con técnicas de ingeniería social.

Es de reseñar la creciente proliferación del *malware* denominado "amenaza persistente avanzada" (APT, *Advanced Persistent Threats*), con capacidades polimórficas y de ocultación (en base a los casos documentados, el tiempo medio para detectar una infección sería de 229 días) [17], diseñado para burlar a las herramientas de seguridad más habituales, y cuya presencia oculta podría detectarse mediante el análisis detallado de la actividad de los sistemas o de la propia red de comunicaciones.

Atendiendo a los informes sectoriales más recientes sobre el tema, en el pasado año 2014 las amenazas más frecuentes dirigidas a explotar las debilidades de los usuarios para comprometer la seguridad de la información de la organización han sido las siguientes [7] [8] [12] [13]:

- Correos *Phishing*: relativamente poco focalizados, designados a obtener información sensible de los usuarios (credenciales de acceso, información sobre tarjetas de crédito, etc.).
- Correos *Spear Phishing*: más enfocados al perfil de la potencial víctima, simulando proceder de una fuente reputada mediante el uso de logos, tipografía, URLs similares, etc.
- *Ransomware*: malware habitualmente disimulado como adjunto de correo que encripta los ficheros del usuario y exige una recompensa para desencriptarlos (CryptoLocker, etc.)
- Errores del usuario: claves débiles o reutilizadas, instalación inadvertida de *malware* o código comprometido en el equipo simulando complementos o actualizaciones, etc.
- *Scareware*: avisos falsos de virus o malware, con la intención de dirigir al usuario hacia la descarga de supuestas herramientas de limpieza o bloqueo que incluyen *malware*.
- *Clickjacking*: código embebido o *script* en un sitio Web que se ejecuta sin el conocimiento del usuario, por ejemplo, aparentando ser un botón para realizar otra función.
- *Malvertising*: anuncios maliciosos en páginas Web dirigidos a distribuir *malware* mediante la acción del usuario sobre dichos anuncios.
- *Malware* para dispositivos móviles: se aprovecha del creciente uso de *smartphones* y tabletas, especialmente los del usuario y que este usa también dentro de la red corporativa.
- Aplicaciones móviles simuladas: imitan a una aplicación real, pero contienen elementos *malware* que infectan el dispositivo en el que se instalan.
- Contaminación de búsquedas Web: secuestro de búsquedas Web válidas para distribuir *malware*, mostrando páginas que inducen a la descarga de aplicaciones maliciosas.
- *Watering hole*: dirigidos contra sitios Web frecuentados por individuos o grupos a los que buscan infiltrar (por ejemplo, desarrolladores de aplicaciones móviles).
- Herramientas del usuario para sincronizar y compartir archivos: al situar la información fuera del entorno de la organización, está más expuesta al *malware* y al acceso indebido.
- Usuarios remotos accediendo a recursos corporativos: interferir el acceso remoto sin VPN, o la infección de un equipo portátil que posteriormente se conectará a la red corporativa, agravado con el uso mixto de elementos como tabletas y *smartphones* propiedad del usuario.
- Ingeniería Social: permite obtener información corporativa sensible mediante el contacto personal, telefónico, a través de redes sociales, etc., con el usuario, sin que este se aperciba.

Cualquier estrategia de mitigación de los riesgos producidos por los usuarios deberá tener en cuenta especialmente estas amenazas anteriores, por cuanto marcan la línea a seguir por los atacantes en el futuro inmediato para comprometer la seguridad de la información en las organizaciones.

4. Mitigación de los Riesgos Derivados del Factor Humano

La elaboración de un plan de seguridad de información para una organización es un proceso laborioso y complejo, cuyos objetivos exceden los de este trabajo, y que comenzará con una detallada evaluación holística de los riesgos que tenga en cuenta las exigencias que le impone la legislación de aplicación (Ley Orgánica de Protección de Datos, Ley de Infraestructuras Críticas, Ley de Seguridad Nacional, Codigo Penal, etc.) y las circunstancias particulares de la propia empresa (las PyME por su dimensión estarán muy limitadas en la aplicación intensiva de la seguridad de la información). Esta evaluación de riesgos puede hacerse utilizando, por ejemplo, la metodología MAGERIT del Consejo Superior de Administración Electrónica [18], para a continuación definir los procedimientos y técnicas de gestión de cada uno de los riesgos considerados como relevantes. Dentro de estos procedimientos y técnicas se incluirían las medidas de mitigación de los riesgos derivados de las acciones de los usuarios que se proponen en esta apartado, y que se basan en las conclusiones y recomendaciones de las publicaciones relevantes al respecto de la seguridad de la información en los sistemas TIC:

- Formación y concienciación de los usuarios: Los usuarios deben ser conscientes de los riesgos existentes y conocer las medidas para minimizarlos para alcanzar una gobernanza efectiva de la seguridad de la información en la organización. La formación deberá ser teórico-práctica, dirigida a todos los niveles de la organización, adaptada a los perfiles de los usuarios, y con acciones periódicas de refuerzo [19], prestando especial atención a los riesgos de la ingeniería social [20]. Se medirán sus efectos, por ejemplo mediante cuestionarios antes y después de las actividades, y en función de las características de la organización se realizarán simulacros de ataque por parte del personal TIC, o bien auditorías externas, para verificar que la respuesta de los usuarios es coherente con el nivel de seguridad buscado. Los resultados de estas pruebas se harán públicos y se realizarán reuniones para analizarlos y proponer medidas de mejora.
- Contratación: La política de contratación tendrá en cuenta el perfil de riesgo de los potenciales candidatos, en base a sus competencias en TIC y a su actitud psicológica ante el riesgo. Conjuntamente con su contrato, los candidatos firmarán documentos de adhesión a la política de seguridad corporativa (Código de Conducta, Política de Uso Aceptable, etc.) [21], en los que se establecerán claramente sus obligaciones, así como las consecuencias que se podrían derivar de ignorarlas, con los procedimientos sancionadores que se aplicarían en su caso.
- Departamento TIC: El departamento responsable de las TIC en la organización deben ser conscientes del riesgo real que supone el factor humano de la empresa [22], teniéndolo en cuenta en sus planes de seguridad y en los programas de auditoría, y considerando especialmente los efectos maliciosos de las acciones inocentes de los usuarios, así como la amenaza que suponen las técnicas de ingeniería social. Deben establecerse canales claros de comunicación entre este departamento, los usuarios y la dirección de la empresa, que

permitan detectar fallos de seguridad, diagnosticar sus efectos, y establecer medidas de contingencia con eficiencia y agilidad, de forma coordinada a lo largo de todos los niveles del escalafón corporativo.

- Control de la información: La información deberá estar clasificada según niveles de seguridad, y aquella perteneciente a los niveles más altos estará controlada, por ejemplo según un mapa de cuatro estados [10]: Datos en Acceso, intentando ser accedidos por personas en el rol inadecuado, Datos en Uso, manejados en un equipo local por personal autorizado, Datos en Movimiento, comunicados sobre la red, y Datos en Reposo, almacenados en repositorios como bases de datos, servidores de ficheros, etc. Esto requiere de una adecuada estratificación de los niveles de acceso en base a los roles de los usuarios, y de políticas corporativas que impulsen el control sobre la detección del acceso o utilización inapropiados de los datos, así como la adopción de medidas de contingencia si se producen estas circunstancias.
- Control de la Infraestructura: La infraestructura tecnológica dispondrá de herramientas adecuadas para realizar copias de seguridad de la información considerada de valor, y estará configurada de manera que disponga de herramientas automatizadas para el despliegue de actualizaciones y parches de seguridad críticos (antivirus, sistemas operativos, etc.) sobre todos los equipos afectados por las vulnerabilidades a atajar [23]. Se implementarán controles para bloquear el acceso de aplicaciones y equipos no autorizados a la red corporativa, siguiendo por defecto estrategias *deny-all*. Se establecerán métodos de autentificación avanzados adaptados al nivel de riesgo de los diferentes roles, especialmente en los accesos remotos, que se permitirán únicamente a través de VPN corporativas. En los casos de riesgo elevado, se utilizarán herramientas de virtualización que bloqueen el acceso directo a los datos manteniendo su utilidad por parte de los usuarios en función del contexto operativo concreto. Se instalarán herramientas de seguridad avanzadas con capacidad de acción predictiva al detectar URLs maliciosos en páginas Web y correos electrónicos bloqueando la acción del usuario que pueda causar una brecha de seguridad [8], y con capacidad de detección de *malware* y APT presente en la organización en base a líneas base de utilización de equipos y del tráfico de datos en la red de comunicaciones.

5. Conclusiones

La conexión global mediante Internet de los sistemas computerizados organizacionales, y las posibilidades de acceder a los diferentes servicios de la organización, desde el interior o remotamente, suponen un riesgo muy elevado para la seguridad de la información corporativa, que en caso de materializarse puede afectar seriamente a la organización al derivarse efectos legales con sus correspondientes responsabilidades.

Dentro de la tríada de los componentes de la seguridad de la información: la Tecnología, los Procesos y las Personas o Factor Humano, este último resulta ser el más vulnerable. Esta circunstancia es corroborada por los informes sectoriales de incidentes de seguridad en las organizaciones, que muestran a los usuarios como principales objetivos de los ataques que buscan comprometer la infraestructura TIC corporativa.

Los factores que intervienen en el comportamiento de los usuarios son muy complejos, y de carácter tanto psicológico, social y organizacional, lo que dificulta las labores para su protección contra amenazas malintencionadas que intentan utilizarlos de forma inconsciente para comprometer los sistemas de seguridad de la información en la organización. La formación específica ha demostrado no ser suficiente, al existir sesgos que afectan al proceso de evaluación de riesgos en la toma de decisiones relacionadas con la seguridad de las acciones a realizar.

El primer paso para la elaboración de un plan de seguridad corporativo debe ser siempre la realización de una evaluación de riesgos exhaustiva, con una metodología reconocida y auditable, y en la que el estudio de los riesgos del factor humano, tanto de forma aislada como en su relación con los demás elementos de seguridad, debe ocupar un lugar principal.

La mitigación de los riesgos derivados del factor humano exige de un esfuerzo transversal y coordinado dentro de la organización, dentro de sus capacidades y limitaciones, que implicará, al menos: Acciones intensas de formación y concienciación de la totalidad de los usuarios; Definición de políticas de contratación adecuadas a las circunstancias de la empresa y sus exigencias de seguridad; Configuración del departamento TIC para la plena efectividad de los recursos antes, durante y después de un fallo de seguridad; Control de la información para su clasificación en niveles de seguridad, y la detección y corrección de accesos inapropiados a la misma; y Control de la infraestructura que permita a los usuarios realizar sus funciones ordinarias sin el temor de que con sus acciones puedan causar daño a la infraestructura de información corporativa.

Referencias

1. Brooks, R.R. *Introduction to Computer and Network Security: Navigating Shades of Gray*. 1ª ed. CRC Press (2013)
2. Parker, D.B. Toward a new framework for information security. En *Computer Security Handbook*, 6ª ed.; Bosworth, S. (Ed.); Kabay, M.E. (Ed.); Wynne, E. (Ed.); John Wiley & Sons (2014)
3. Ashenden, D. Information Security management: A human challenge?. *Information Security Technical Report*, 2008, 13 (4), 195-201
4. Schneier, B. *Secrets and Lies: Digital Security in a Networked World*. 1ª ed. Wiley Publishing (2000)
5. Huang, D.; Rau, P.P.; Salvendy, G. A survey of factors influencing people's perception of information security. En *Human-Computer Interaction, Part IV*. 1ª ed.; Jacko, J. (Ed.); Springer International (2007)
6. Nohlberg, M. Why Humans are the Weakest Link. En *Social and Human Elements of Information Security: Emerging Trends and Countermeasures*, 1ª ed.; Gupta, G. (Ed.); Sharman, R. (Ed.); Information Science Reference (2009)
7. Ponemon Institute LLC. *2015 State of the Endpoint Report: User-Centric Risk* (2015). Disponible en: http://www.ponemon.org/local/upload/file/2015%20State%20of%20Endpoint%20Risk%20FINAL.pdf
8. Proofpoint, Inc. *The Human Factor 2015: A Proofpoint Research Report* (2015). Disponible en: www.proofpoint.com/humanfactor

9. Parsons, K.; McCormac, A.; Butavicius, M; Ferguson, L. *Human Factors and Information Security: Individual, Culture and Security Environment.* Command, Control, Communications and Intelligence Division - Department of Defence of the Australian Government (2010). Disponible en: www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA535944
10. Miller, R.; Maxim, M. *I have to Trust Someone. … Don't I? Dealing with insider threats to cyber-security*. *CA Technologies White Paper* (2015). Disponible en: http://www.ca.com/us/~/media/Files/whitepapers/dealing-with-insider-threats-to-cyber-security.pdf
11. Stanton, J.M.; Stam, K.R.; Mastrangelo, P.; Jolton, J. Analysis of end user security behaviours. *Computers and Security*, 2005, 24, 124-133.
12. Cisco Systems Inc. *2015 Annual Security Report* (2015). Disponible en: https://www.cisco.com/web/offer/gist_ty2_asset/Cisco_2015_ASR.pdf
13. Osterman Research, Inc. *Best Practices for Dealing with Phishing and Next Generation Malware. Osterman Research White Paper* (2015). Disponible en: http://www.mcafee.com/us/resources/white-papers/wp-osterman-best-practices-phishing-nextgen-malware.pdf
14. Recurso Web: *5 reasons why newer hires are the company's biggest data security risk*. Disponible en: http://www.cio.com/article/2945201/security0/5-reasons-why-newer-hires-are-the-companys-biggest-data-security-risk.html
15. Baick, S. Security Implications of Bring Your Own Device, IT Consumerization, and Managing User Choices. En *Information Security Management Handbook, 6th Edition, Volume 7*. 1ª ed.; O'Hanley, R. (Ed.); Tiller, J.S. (Ed.); CRC Press (2014)
16. Recurso Web: *8 backup and security tips for frequent fliers*. Disponible en: http://www.computerworld.com/article/2942469/security0/8-backup-and-security-tips-for-frequent-fliers.html
17. Verizon. *2014 Data Breach Investigations Report* (2014). Disponible en: http://www.verizonenterprise.com/DBIR/2014/reports/rp_dbir-2014-executive-summary_en_xg.pdf
18. Dirección General de Modernización Administrativa, Procedimientos e Impulso de la Administración Electrónica *MAGERIT v.3: Metodología de Análisis y Gestión de Riesgos de los Sistemas de Información.* Centro de Publicaciones del Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas (2012). Disponible en: http://administracionelectronica.gob.es/pae_Home/pae_Documentacion/pae_Metodolog/pae_Magerit.html
19. Lacey, D. *Managing the Human Factor in Information Security*. 1ª ed. John Wiley and Sons (2009)
20. LeClair, J.; Keeley, G. *Cybersecurity in Our Digital Lives (Protecting Our Future Book 2).* 1ª ed. Hudson Whitman/ Excelsior College Press (2015)
21. Lincke, S. *Security Planning*. 1ª ed. Springer International (2015)
22. Marble, J.L.; Lawless, W.F.; Mittu, R.; Coyne, J.; Abramson, M.; Sibley, C. The Human Factor in Cybersecurity: Robust & Intelligent Defense. En *Cyber Warfare: Building the Scientific Foundation*. 1ª ed.; Jajodia, S. (Ed.); Shakarian, P. (Ed.); Subrahmanian, V.S. (Ed.); Swarup V. (Ed.); Wang, C. (Ed.); Springer International (2015)
23. ThreatTrack Security. *The People Problem: Cyber Threats Aren't Just a Technology Challenge (2015)*. Disponible en: http://www.threattracksecurity.com/resources/the-people-problem.aspx

Sesión IV-F

Sociedad, Economía y Humanidades

Aspectos del Agua como recurso estratégico: fuente de tensiones y oportunidad de colaboración en cuencas compartidas.

Del Valle Melendo Javier[1]

[1] Profesor Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza. delvalle@unizar.es

Resumen: El agua es un recurso abundante, pero su distribución es irregular. Es esencial para muchos usos, por lo que los Estados necesitan asegurar su disponibilidad. En el mundo hay muchas cuencas hidrográficas compartidas en las que viven más de 2000 millones de personas. Esta realidad es una potencial fuente de tensiones, pero la cooperación en gestión de agua también es un instrumento de cooperación internacional si se respetan los principios generales de la denominada "Geohídrica".

Palabras clave: agua, recurso estratégico, cooperación internacional, tensión en torno al agua.

1. Introducción

El agua es un recurso muy abundante en el conjunto del planeta, y además de carácter renovable, pero su distribución temporal y espacial es irregular. Es imprescindible para muchas actividades socioeconómicas (abastecimiento de población, industria, regadío, etc.) y por lo tanto esencial para permitir el desarrollo. El contexto actual es de aumento de la demanda, por lo que van creciendo las incertidumbres sobre la garantía de abastecimiento en muchas zonas del planeta. Estas incertidumbres quedan agravadas por hechos como la degradación ambiental y de la calidad de las aguas producida en muchos ecosistemas fluviales, el posible cambio climático y la consecuente mayor variabilidad de las precipitaciones, etc.

Por ello, el agua se ha convertido en un recurso estratégico que los estados procuran asegurar mediante políticas variadas que pueden incluir desaladoras, transvases, obras hidráulicas etc. Muchos de los grandes ríos del mundo tienen sus cuencas hidrográficas repartidas entre varios estados, por lo que las políticas de éstos pueden repercutir en los otros. Por ello, se pueden producir roces entre estados con intereses contrapuestos en la explotación de los recursos hídricos de estas cuencas compartidas, pero el agua también se define como un potente elemento de cooperación internacional.

2. Cuantificación del agua dulce

El agua es un recurso muy abundante en el planeta. Se calcula que asciende a 35.2 millones de km^3 (Unesco 2006). De ellos el 2.5% es agua dulce, unos 880.000 Km^3 repartidos en atmósfera, glaciares y agua helada (que no consideramos disponible), ríos, lagos y agua subterránea. Lo que consideramos directamente disponible por el ser humano (situada en ríos lagos o en forma de agua subterránea) asciende a la cantidad de 383.000 km^3.

Si dividimos estos 383.000 km^3 entre los aproximadamente 6.500 millones de habitantes del planeta resulta una disponibilidad de algo más de 58.900 m^3 por habitante y año. Si consideramos que las necesidades medias de una persona son de 200 l/habitante/día, el resultado es que la necesidad anual de recurso hídrico asciende a unos 73 m^3 por habitante y año.

Es decir, estamos hablando de un recurso absolutamente imprescindible con las siguientes características:

-Disponibilidad por habitante y año: 58.900 m^3.

-Necesidad por habitante y año: 73 m^3.

Es cierto que en las cifras aportadas de necesidad por habitante y año solamente se consideran los usos personales directos (bebida, higiene personal, lavado, cocina, etc.) y que el agua se utiliza para muchas otras cosas como regadío (el uso que demanda más cantidad de agua), uso industrial, ocio, etc.

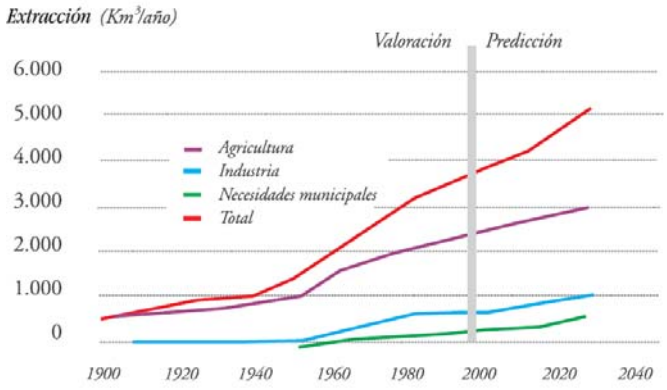


Figura 1. Extracción de agua para diferentes usos durante siglo XX y proyección a principios del XXI. Fuente: Fernández Jáuregui C. (2000).

Pero si se observa la figura 1 en la que se proyectan las demandas de agua totales para las primeras décadas del presente siglo, se aprecia que la cantidad total está muy lejos de la cifra de 383.000 km^3, por lo que la conclusión es sencilla: el agua es un recurso que a escala planetaria es muy abundante y a corto plazo la demanda está todavía muy lejos de aproximarse a la disponibilidad natural de agua dulce en forma de ríos, lagos o agua subterránea.

Entonces ¿qué es lo que justifica términos como crisis del agua, escasez, incertidumbre sobre abastecimientos, etc.? Son muchas las razones que lo explican, pero podemos destacar las siguientes:

-El agua es un recurso insustituible. En una situación de escasez, aunque sea temporal, no hay alternativa y los daños producidos a la población afectada o a la estructura económica pueden ser

enormes (muerte, enfermedades por falta de higiene, escasez de alimentos por imposibilidad de regar, paralización o ralentización de la industria, empeoramiento de la calidad de las aguas circulantes…)

-La evolución de las sociedades hacia niveles más altos de desarrollo es paralela a un aumento de la demanda de agua: el consumo medio por persona aumenta, es necesario aumentar las garantías de abastecimiento a la población, la industria, el regadío, actividades turísticas o de ocio. Este proceso puede llevar a situaciones puntuales o estructurales de escasez en lugares en los que el recurso es escaso.

-El aumento de la demanda de agua no siempre va acompañado de adecuados sistemas de gestión del recurso, tanto técnicos (conocimiento del recurso superficial y subterráneo disponible, evolución temporal, niveles de calidad…) como sociales (modelos de participación en la toma de decisiones), especialmente en los países de menor nivel de desarrollo.

-El aumento de la presión sobre el recurso puede conducir a pérdidas de calidad de los ecosistemas fluviales si no se realiza una adecuada gestión, empeorando así la situación al dejar parte del recurso inutilizable para ciertos usos, sobre todo para los más exigentes en calidad (abastecimiento a la población principalmente). Esta pérdida de calidad redunda también en daños ambientales por disminución de biodiversidad, deterioro, disminución de las funciones sociales como el ocio, etc.

-Aunque a escala planetaria el agua dulce es un recurso muy abundante, su distribución es enormemente irregular temporal y espacialmente. Hay grandes zonas de la Tierra que sufren una escasez casi permanente, que en muchos casos coincide con población en rápido crecimiento y desarrollos de ciertos sectores económicos demandantes de agua (regadío, turismo, industria). La FAO elabora el Índice Total Actual de Recursos Hídricos Renovables(TARHR)que estima los recursos hídricos totales disponibles por persona y país,que demuestra las enormes diferencias entre estados (tabla 1)

Estado	**Volumen Tarhr (Km^3 año)**	**Tarhr per cápita (m^3/año)**
España	112	2710
Suecia	174	19580
Israel	2	250
China	2830	2140
Argelia	14	440
R.D.Congo	832	217920
Estados Unidos	5051	10270
Brasil	8233	45570
Australia	492	24710

Tabla 1. Índice Total Actual de Recursos Hídricos Renovables en volumen y per cápita en algunos estados para 2005. Fuente: Unesco 2006. Elaboración propia.

En cuanto a la irregular distribución temporal podemos destacar el caso de algunos climas, como el tropical de estación seca y húmeda, o el mediterráneo, en los que las precipitaciones caen muy concentradas en una época del año, siendo muy escasas en las restantes. En el caso del clima mediterráneo el periodo de precipitaciones más escasas (verano) coincide con el de mayor temperatura

y por lo tanto mayor evaporación y más elevadas demandas para abastecimiento de población, ocio y especialmente regadío. La mayor escasez natural de agua coincide, por lo tanto con la mayor demanda.

3. Concepto de cuenca hidrográfica y cuenca hidrográfica compartida

Una cuenca hidrográfica está compuesta por todo el territorio cuyas aguas superficiales drenan a un río principal, y que por lo tanto tiene salida de las aguas de drenaje por un único punto hacia el mar o un lago. No existen cuencas sin ríos (permanentes o no), ni ríos sin cuenca, pues todo territorio tiene su red de drenaje, aunque en algunos casos no esté bien organizada y termine perdiéndose en zonas áridas del interior de los continentes o en lagos interiores, denominándose en esos casos cuencas endorreicas.

Toda cuenca hidrográfica es una unidad natural de dinámica del agua, pues en ella se produce la precipitación, la infiltración y alimentación de acuíferos, la escorrentía superficial y la organización de redes de drenaje hasta su salida al mar o a un lago. Sus límites son naturales, en ningún caso establecidos por el ser humano, por lo que pueden o no coincidir con los límites administrativos (regiones o naciones) delimitados con posterioridad a la existencia de cualquier cuenca. En la mayor parte de los casos los límites de las cuencas no coinciden con los límites administrativos políticos. Si este territorio pertenece a dos o más estados, se habla de cuenca hidrográfica compartida. El caso del Danubio es paradigmático, pues en su cuenca hidrográfica hay territorio de 19 estados.

El concepto de cuenca se adoptó en el ámbito de las relaciones internacionales en la Declaración de Nueva York de 1958, y en la Conferencia de Helsinki (1966) se incluyó en las Reglas sobre el Uso de las Aguas de los Ríos Internacionales. Posteriormente en la Convención sobre el Derecho de los Usos de los Cursos de Agua Internacionales para Fines distintos a la Navegación de 1997 se incorporó el concepto de curso de agua internacional (NN.UU. 1997).

4. Algunas estrategias de los Estados para garantizar sus necesidades de agua.

Consecuencia de lo expuesto anteriormente, los estados desarrollan diferentes estrategias encaminadas a cubrir con las mayores garantías posibles las demandas de agua presentes en sus territorios, haciendo proyecciones a diferentes horizontes futuros sobre éstas para así prever la disponibilidad de agua necesaria.

España, por ejemplo, tradicionalmente ha tenido una marcada política de construcción de embalses para regular los ríos, almacenar agua de los periodos de abundancia para los de escasez y mayor demanda (verano), complementada con otras infraestructuras como desaladoras en las islas y en alguna zona de la costa mediterránea, o transvases entre cuencas con diferente balance hídrico.

Israel, estado con escasa disponibilidad de recurso, tal y como se ha señalado en la tabla 1, ha desarrollado una avanzada tecnología en depuración de aguas ya utilizadas, lo que le permite tener un elevado porcentaje de uso de aguas previamente empleadas para otros usos. Igualmente ha desarrollado un ambicioso plan de desalación, aprovechando su posición litoral.

China desarrolla ambiciosos proyectos hidráulicos que incluyen la construcción de grandes embalses en los ríos más caudalosos y transvases de abundantes caudales del S al N para garantizar el abastecimiento de algunas grandes ciudades y centros industriales.

Rusia ha desarrollado barcos móviles movidos con energía nuclear para desalar el agua del mar e incorporarla a sistemas urbanos.

5. Principios del Derecho Internacional para cuencas compartidas.

El Derecho Internacional de aguas reposa en el principio fundamental de que la pertenencia de un Estado a la comunidad internacional trae como consecuencia la renuncia al ejercicio ilimitado de su soberanía territorial, como también a la invocación de la integridad absoluta de su territorio(Aguilar G, Iza A. 2009). Sin este prerrequisito no sería posible pensar en una convivencia pacífica. Según ese principio, la capacidad del Estado para gestionar sus propios recursos sufre una restricción, ya que debe abstenerse de llevar a cabo actividades que puedan causar un perjuicio a otros estados. Por ello, debe tolerar las consecuencias o efectos de poca importancia de actos realizados por los Estados Vecinos, en tanto y cuanto tales efectos provengan del uso lícito de la propiedad y no afecten intereses de una cierta magnitud.

Los principios fundamentales que rigen en esta materia y que han dado lugar a la definición de las facultades y los deberes de los Estados en el uso de las aguas de una cuenca compartida son los siguientes(Aguilar G, Iza A 2009):

-Cooperación: El deber de cooperar deriva de la idea de unidad de la cuenca hidrográfica y de la comunidad de intereses que existe entre los Estados parte de una cuenca compartida. Solamente mediante la cooperación entre todos los Estados parte de una cuenca compartida se puede lograr un desarrollo sostenible de la misma y mantener su integridad ecológica. Se trata de un deber general que no especifica qué instituciones y hasta qué grado tienen que cooperar.

-Gestión integrada: se manifiesta de dos maneras:

·Integración en la gestión de las diferentes fases del agua. Así, los Estados deberán hacer esfuerzos por alcanzar una gestión unificada de las aguas superficiales, subterráneas y otras aguas que se estime necesario.

·Incorporación de otros recursos naturales. En virtud de ello, los Estados deberán hacer esfuerzos por integrar, en forma adecuada, la gestión de las aguas con la gestión de otros recursos naturales.

-Sostenibilidad: en el contexto actual de creciente presión sobre el recurso hídrico, la sostenibilidad es un principio esencial para lograr un equilibrio entre desarrollo y conservación de los valores naturales. Se relaciona estrechamente con el principio de precaución, que implica que los Estados deben adoptar todas las medidas necesarias para prevenir, reducir o controlar un daño al medio hídrico.

-Prevención del daño: supone que cada Estado que forma parte de una cuenca compartida tiene el derecho de aprovechar la parte de la misma que se encuentra bajo su jurisdicción siempre que no afecte en forma significativa al derecho de los otros Estados que forman parte de ella. De ahí se deriva la obligación de prever y minimizar el daño ambiental. Guarda estrecha relación con el principio de sostenibilidad: sólo es posible asegura la continuidad de los ecosistemas y, en general, la vida en el planeta si las aguas son utilizadas de forma que se mantenga la integridad de las fuentes.

-Participación, con dos aspectos fundamentales:

·Participación equitativa de los Estados de la cuenca. Significa que los Estados que son parte de una cuenca compartida tienen el derecho a participar en la gestión de las aguas de la misma en forma equitativa, razonable y sostenible.

·Participación pública. Significa que los Estados deben tomar las medidas necesarias para asegurar que las personas que puedan verse afectadas tengan la posibilidad de participar en el proceso de toma de decisiones respecto de la gestión de las aguas.

6. Facultades y deberes de los Estados

La Convención de las Naciones Unidas sobre el derecho de los usos de los cursos de agua internacionales para fines distintos de la navegación, de 1997 (NN.UU, 1997), establece una serie de facultades y deberes para los Estados que tienen parte o todo su territorio en cuencas compartidas. Entre ellos:

-Utilización equitativa. La Convención de 1997 establece en su artículo 5 que "Los Estados del curso de agua utilizarán en sus territorios respectivos un curso de agua internacional de manera equitativa y razonable. En particular, los Estados del curso de agua utilizarán y aprovecharán un curso de agua internacional con el propósito de lograr la utilización óptima y sostenible y el disfrute máximo compatibles con la protección adecuada del curso de agua, teniendo en cuenta los intereses de los Estados del curso de agua de que se trate". Como el concepto de utilización equitativa es ambiguo, la Convención de 1997 establece una serie de factores (geográficos, necesidades de los Estados ribereños, población, efectos de los usos, etc.) para la determinación de la misma.

Para determinar lo que constituye una utilización equitativa y razonable, se examinarán conjuntamente todos los factores pertinentes y se llegará a una conclusión sobre la base del conjunto de esos factores. Un posible conflicto entre los diferentes usos del agua en un curso internacional se ha de resolver teniendo en cuenta la satisfacción de las necesidades humanas vitales.

- Deber de no causar daño. No existe en Derecho Internacional una prohibición absoluta de no contaminar, pero el artículo 7 de la Convención de 1997 (NN.UU. 1997) establece que "los Estados del curso de agua, al utilizar un curso de agua internacional en sus territorios, adoptarán todas las medidas apropiadas para impedir que se causen daños sensibles a otros Estados del curso de agua". Es una obligación derivada del "principio de buena vecindad". Según él los Estados parte de una cuenca compartida deben abstenerse de realizar, dentro de sus respectivas jurisdicciones, cambios en el régimen existente que puedan afectar en forma adversa al aprovechamiento de la cuenca que pueda hacer otro Estado parte de la misma.

- Deberes procesales. Los Estados tienen un deber de intercambiar información sobre el estado de la cuenca, particularmente aquellos de carácter hidrológico, meteorológico, ecológico y de calidad de las aguas. Antes de la ejecución de una medida que pueda causar un efecto perjudicial sensible a otros Estados del curso de agua, el Estado que la proyecte deberá notificarla oportunamente a otros Estados.

- Protección de los ecosistemas. Los Estados protegerán y preservarán individualmente, y cuando proceda en forma conjunta, los ecosistemas de los cursos de agua internacionales.

Las medidas proyectadas no serán ejecutadas sin el consentimiento de los Estados a los que se haga la notificación. Sin perjuicio de los plazos mencionados y, teniendo en cuenta las disposiciones sobre uso equitativo y el deber de no causar un daño significativo, las medidas proyectadas podrán ser

inmediatamente ejecutadas en aquellos casos en los cuales ello sea necesario para proteger la salud y la seguridad públicas u otros intereses igualmente importantes.

No queda muy claro en la Convención de 1997 a qué se refiere cuando habla de ecosistemas, si a los ribereños de cada país o al ecosistema fluvial en conjunto, pero teniendo en cuenta la necesidad de aplicar un enfoque por ecosistemas, recogido en la propia Convención, la lectura más adecuada que puede darse a los interrogantes es que se refiere al ecosistema del curso de agua en su totalidad.

Una parte esencial en la protección de los ecosistemas es la *necesidad de mantener caudales ambientales*, que está siendo aceptada de manera creciente como un componente esencial de la gestión integrada del agua. El concepto de caudal ambiental (en ocasiones denominado ecológico) ha evolucionado mucho y está sujeto a múltiples interpretaciones y sistemas de cálculo, pero en general se refiere al caudal mínimo que hay que respetar en los cuerpos de agua naturales para que se mantengan los valores naturales de los mismos y los bienes y servicios que aportan (agua potable, recarga de acuíferos, usos recreativos, pesquerías, valores estéticos, etc.).

No obstante, consideramos muy importante señalar que el mero reconocimiento del medio ambiente como "usuario del agua" no es suficiente si no va acompañado de medidas para asegurar su cumplimiento, como por ejemplo: organizativas, preventivas, disuasorias, de participación, etc.

7. Solución de conflictos y colaboración en gestión de recursos hídricos.

El agua es fuente de tensión en muchos lugares del mundo, especialmente en aquellos en los que se dan ciertas circunstancias, como escasez, progresiva presión para su aprovechamiento o la existencia de algún estado que desarrolle políticas de gestión o aprovechamiento que causen perjuicio a otros estados (o éstos perciban que lo hace).

Según la Comisión de Derecho Internacional de las Naciones Unidas principios generales que pueden ayudar a prevenir conflictos asociados a los recursos hídricos e incluso a resolverlos son los siguientes:

·Utilización equitativa. Implica que los estados de una cuenca tienen derecho a una porción razonable y equitativa del uso beneficioso del agua compartida.

·Prevención de perjuicios importantes a otros estados: obligación de no causar daños importantes a otros estados mediante acciones que afecten a cursos de agua internacionales.

·Obligación de notificar e informar a otras naciones sobre acciones o actividades que puedan afectarles.

·Obligación de compartir datos. Es un principio en el que se ha avanzado mucho, a lo que ha contribuido la facilidad para acceso y puesta en común de información, pero en algunas zonas del mundo todavía la información sobre recursos hidráulicos se considera clasificada y se niega a los vecinos.

·Gestión cooperativa de los ríos internacionales. Derecho de todos los estados de una cuenca a tomar parte en el desarrollo, uso y protección de los recursos hídricos compartidos.

·Obligación de resolver las disputas de modo pacífico.

Se ha denominado "Geohídrica" a estos principios generales que afectan a 276 cuencas hidrográficas compartidas en el mundo, en las que vive el 40% de la población mundial. Por lo tanto más de dos mil millones de personas dependen de una colaboración todavía escasa que les asegure el abastecimiento con garantías de este bien imprescindible. Se trata de un enorme potencial de

colaboración internacional en el que se ha avanzado, especialmente en algunas zonas del mundo, pero no lo suficiente. Por el contrario, si la gestión de las cuencas de ríos internacionales queda supeditada a intereses nacionalistas o de grupos de poder, el potencial de generación de carencias, disputas y conflictos es enorme.

4. Conclusiones

-El agua a escala planetaria es muy abundante, su disponibilidad es muy superior a las demandas, pero al ser un recurso de reparto irregular e imprescindible para la vida, la salud y muchas actividades económicas los estados desarrollan estrategias y políticas encaminadas a garantizar su disponibilidad presente y futura. Algunas de estas estrategias, especialmente las desarrolladas en cuencas hidrográficas compartidas, pueden provocar tensiones con otros estados de las mismas.

-Son muchas las cuencas hidrográficas compartidas entre dos o más estados, en las que viven más de 2.000 millones de personas, en ellas el Derecho Internacional establece unos principios generales que rigen las facultades y deberes de los estados.

-Hay mucha tensión potencial en el uso del recurso hídrico en cuencas compartidas, pero si los Estados respetan los principios generales de prevención de conflictos y colaboración, éstas son un potente instrumento de cooperación internacional basada en la utilización equitativa, la comunicación de decisiones, la obligación de compartir datos, la gestión cooperativa de los ríos internacionales y la obligación de resolver disputas de forma pacífica.

Agradecimientos

Proyecto CUD 2013-18 como financiador.

Referencias

1. Aguilar G, Iza A. *Gobernanza de aguas compartidas. Aspectos jurídicos e institucionales*. UICN, serie de política y derecho ambiental Nº 58, Bonn. 2009, p. y 26-27
2. Fernández Jáuregui C. *El agua como fuente de conflictos. Repaso de los focos de conflictos en el mundo*. Programa Hidrológico Internacional. Unesco. 2000, p 14.
3. Naciones Unidas. Resolución 51/229 aprobada por la Asamblea General de NN.UU. Convención sobre el derecho de los usos de los cursos de agua internacionales para fines distintos de la navegación. 1997.
4. Unesco. *El Agua una responsabilidad compartida*. Oxford Ed. Zaragoza, 2006, p. 121.

El inmigrante en el Mediterráneo, ¿víctima o delincuente?

Flores Lecha, Óscar Manuel [1,*]

[1] Centro Universitario de la Guardia Civil (CUGC), Área de Investigación/Calidad, Paseo de la Princesa s/n, 28.300, Aranjuez (Madrid). E-Mail: oflores@guardiacivil.es (OMFL)

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: oflores@guardiacivil.es (OMFL)

Abstract: La inmigración es, sin duda alguna, una de las cuestiones que más preocupa a Europa actualmente. En este sentido, la "Estrategia de Seguridad Nacional: un proyecto compartido" contempla doce riesgos y amenazas para la Seguridad Nacional, incluidos los flujos migratorios irregulares. Reducir o eliminar la inmigración irregular se convierte en un objetivo deseable, para lo cual es necesario identificar todas las caras del problema.

Keywords: Frontex; Guardia Civil; inmigración ilegal; inmigración irregular; inmigración legal; inmigración regular; Mediterráneo; Ministerio del Interior; migrante.

1. Introducción

Con el título se ha pretendido ser provocador, animando al lector a que tome posicionamiento en uno u en otro sentido, esté el lector de acuerdo o en desacuerdo con la opinión que el autor reflejará a lo largo del presente artículo de comunicación.

2. Materiales y Métodos. Sección Experimental

En este artículo se ha seguido una metodología de investigación correlacional, donde se ha detectado un problema principal de estudio relacionado con la *seguridad pública* como es el hecho de que la inmigración irregular en la zona del Mediterráneo va en aumento, así como un problema secundario de *ámbito humanitario*[1] derivado del primero, como es el incremento de inmigrantes fallecidos que intentan acceder a las costas de la Unión Europea (en adelante UE).

A la pregunta de cómo se puede reducir o eliminar (lo deseable) la inmigración irregular y, por consiguiente, los fallecidos en el Mediterráneo derivados de la misma, se ha formulado la siguiente

[1]En este sentido no se está insinuando que las vidas humanas sean menos importantes que la seguridad en la vigilancia de las fronteras de la UE.

hipótesis de trabajo: la identificación de todos los factores que pueden incidir en la inmigración irregular tendría una influencia positiva en la lucha contra la inmigración irregular reduciendo la misma, y, por ende, los fallecidos que también provoca.

Para intentar verificar la anterior hipótesis planteada, se van a seguir ocho diferentes líneas de investigación que vienen a coincidir con lo que el autor denomina "la inmigración irregular: ocho caras diferentes para un mismo problema" (Figura 1). La manipulación de cualquiera de estas variables independientes tiene una incidencia positiva o negativa en el tratamiento de la cuestión de los flujos migratorios y en particular en la inmigración irregular.



Figura 1. La inmigración irregular: 8 caras diferentes para un mismo problema[2].

3. Resultados y Discusión

Aunque los flujos migratorios son procesos que han tenido lugar en todos los períodos históricos, las dinámicas que han experimentado en las últimas décadas, así como su volumen los han transformado en un fenómeno con implicaciones para la política de seguridad[1].

3.1. Marco normativo y política común europea

El marco normativo que afecta a la inmigración irregular es la lógica consecuencia de las políticas de inmigración de la UE y de sus Estados miembros. El derecho de extranjería es una cuestión básicamente nacional[3] por lo que cada país es soberano para regular los requisitos necesarios para el derecho de acceso de los inmigrantes a través de sus fronteras. Sin embargo, las legislaciones de los Estados miembros de la UE son cada vez más parecidas, ya que lo que legisla Europa tiene influencia en los distintos Estados miembros.

Uno de los objetivos fundamentales de la UE es contar con una *política de migración europea* completa, con visión de futuro y basada en la solidaridad. La política de migración tiene por objeto establecer un enfoque equilibrado para abordar tanto la migración regular como la irregular.

[2]Elaboración propia con diseño gráfico de Aranda León. F.M.

[3]En el caso de España el Derecho de extranjería se articula en torno a dos regímenes distintos aunque influidos ambos por la normativa de la UE. El primero, aplicable a los nacionales de los Estados miembros de la UE (actualmente 28 países) y sus familiares, a los ciudadanos de los Estados parte en el Espacio Económico Europeo (Islandia, Liechtenstein y Noruega) y sus familiares, así como a los ciudadanos de la Confederación Suiza y sus familiares, regulado por el Real Decreto 240/2007. El segundo, referido al resto de los extranjeros, regulado por la Ley Orgánica 4/2000 sobre derechos y libertades de los extranjeros en España y su integración social, sus posteriores reformas, así como el Real Decreto 557/2011 que aprueba el reglamento de la citada Ley, tras ser reformado por la Ley Orgánica 2/2009.

Hasta la presentación por parte de la Comisión Europea, el pasado mes de mayo, de una Agenda Europea de Migración, la UE había adoptado dos marcos legislativos fundamentales para luchar contra la migración irregular: la Directiva 2008/115/CE sobre el retorno que contempla normas y procedimientos comunes de la UE para el retorno de los nacionales de terceros países en situación irregular y la Directiva 2009/52/CE que especifica las sanciones y medidas aplicables en los Estados miembros a los empleadores que no respeten la prohibición del empleo de nacionales de terceros países en situación irregular[2].

Con la presentación de esta Agenda[3] se esbozan tanto las medidas inmediatas que se adoptarán a fin de responder a la situación de crisis que existe en el Mediterráneo como los diversos pasos que deben darse en los próximos años para gestionar mejor la migración en todos sus aspectos.

Como medidas concretas e inmediatas que se deben adoptar se recogen: el triplicar las capacidades y los activos para las operaciones conjuntas de *Frontex* (Tritón y Poseidón) en 2015 y 2016; proponer por primera vez la activación del mecanismo de emergencia (en virtud del artículo 78, apartado 3, del Tratado de Funcionamiento de la UE) para ayudar a los Estados miembros que se vean enfrentados a afluencias repentinas de migrantes; a finales de mayo la Comisión propondrá un mecanismo de distribución temporal para las personas en clara situación de necesidad de protección internacional dentro de la UE; a finales del 2015 seguirá una propuesta relativa a un sistema permanente de la UE de reubicación en situaciones de emergencia provocadas por influjos masivos; proponer un programa de reasentamiento en toda la UE para ofrecer 20.000 plazas distribuidas entre todos los Estados miembros; y, finalmente, trabajar en una posible operación en el Mediterráneo para desmantelar las redes de traficantes y combatir el tráfico de personas.

Como medidas que se deben adoptar en los próximos años estarían los cuatro pilares de la nueva Agenda de Migración para una mejor gestión de la misma: la reducción de los incentivos para la migración irregular, salvar vidas y asegurar las fronteras exteriores, ofrecer un buen sistema común de asilo y establecer una nueva política en materia de migración legal[4].

La política de la UE en materia de asilo tiene por objeto armonizar los procedimientos de asilo de los Estados miembros mediante la instauración de un sistema común de asilo.

Los objetivos consisten en desarrollar una política común en materia de asilo, protección subsidiaria y protección temporal destinada a ofrecer un estatuto apropiado a todo nacional de un tercer país que necesite protección internacional y a garantizar el respeto del principio de no devolución. Esta política deberá ajustarse a la Convención de Ginebra de 1951 y a su Protocolo de 1967. Ni el Tratado de Funcionamiento de la UE ni la Carta de los derechos fundamentales proporcionan una definición de los términos «asilo» y «refugiado». Ambos instrumentos se refieren específicamente a la Convención de Ginebra de 28 de julio de 1951 y a su Protocolo de 31 de enero de 1967.

El Tratado de Lisboa[5] supone una innovación ya que transforma en política común las medidas en materia de asilo. Su objetivo no es solo el establecimiento de normas mínimas, sino también la creación de un sistema común[6] que incluya estatutos y procedimientos uniformes[4].

[4]Como quedará reflejado en páginas siguientes, el autor de este artículo no está de acuerdo con emplear la denominación de "migración legal".

[5]El Tratado de Lisboa introduce modificaciones importantes, siendo detallada su aplicación en el Programa de Estocolmo.

[6]Este sistema debe comprender los siguientes elementos: un estatuto uniforme de asilo; un estatuto uniforme de protección subsidiaria; un sistema común de protección temporal; procedimientos comunes para conceder o retirar el estatuto uniforme

3.2. La inmigración económica/la pobreza

Los flujos migratorios han acompañado al ser humano a lo largo de su existencia. La desigualdad y la pobreza, o simplemente las expectativas por alcanzar un nivel económico de vida mejor hacen que la UE siga siendo un destino atractivo y un lugar de acogida para personas llegadas de las más diversas procedencias. El fenómeno de la inmigración internacional incluye la llegada, tanto a España como a Europa en su conjunto, de inmigrantes regulares e irregulares[5].

Llegado este momento es prudente acotar la definición del término "inmigración irregular". Se está de acuerdo con PEÑA PÉREZ[6] cuando afirma que "es conocido por todos los profesionales de las diferentes ramas que se relacionan dentro del fenómeno de las migraciones ese principio que reza, *grosso modo*, que «ningún inmigrante es ilegal. Las personas no pueden ser consideradas ilegales, solamente sus actos pueden ser calificados como ilegales». Por tanto, la afirmación de que existen personas legales y personas ilegales no puede tener otro calificativo que el de aberración jurídica[7]".

La actual Ley de Extranjería[8] dispone en su artículo 53.1.a) que se considera infracción grave "Encontrarse irregularmente en territorio español, por no haber obtenido la prórroga de estancia, carecer de autorización de residencia o tener caducada más de tres meses la mencionada autorización, y siempre que el interesado no hubiere solicitado la renovación de la misma en el plazo previsto reglamentariamente".

Por lo tanto se hablará de inmigración irregular por oposición a inmigración regular, ya que hablar de inmigración legal sería reconocer implícitamente que existe una inmigración ilegal. En el caso español, el perfil del inmigrante irregular que accede o pretende acceder a nuestro país es el "económico".

3.1.1. El caso particular de Ceuta y Melilla

Ceuta y Melilla son la Puerta Sur de Europa y constituyen la única frontera terrestre de la UE con el continente africano. En el año 2014 llegaron a las costas españolas por medio de embarcaciones 4.552 inmigrantes irregulares, un 40,6 % más que en el año 2013, si bien es cierto que comparando estos datos con los del año 2006 donde accedieron a las costas españolas a través de embarcaciones 39.180 inmigrantes irregulares, es un resultado mucho menor (88 % menos). En el mismo año, los inmigrantes irregulares llegados a Ceuta y Melilla fueron 7.485, de los cuales eso sí, 3.305 procedentes de Siria y por lo tanto potenciales refugiados. Se registraron cerca de 19.000 intentos de asalto al vallado de

---

de asilo o la protección subsidiaria; criterios y mecanismos para determinar el Estado miembro responsable de examinar una solicitud; normas relativas a las condiciones de acogida; y, por último, asociación y cooperación con terceros países.

[7]Términos como sin papeles, indocumentados, clandestinos, ilegales, etc., son cada vez más comunes para referirse a estas personas que un día decidieron dejar su país en busca de un futuro mejor. Con estos conceptos, en especial el de inmigrantes ilegales, en los últimos años se ha asentado una tendencia que incide en la criminalización de los inmigrantes en situación de irregularidad administrativa, y que fomentan la deshumanización de la persona y su humillación y deshonra como persona inmigrante. Viendo este panorama, la consecuencia más inmediata en el tratamiento de los inmigrantes como ilegales es su criminalización directa. No cabe otra conclusión cuando se usa un concepto que sitúa al inmigrante como responsable en la vulneración del ordenamiento jurídico. Una vulneración que se ve más como un delito, como un fraude al ordenamiento jurídico y a la sociedad, que como lo que realmente es, una simple infracción administrativa. Y es eso y simplemente eso, una infracción que viene reconocida como transgresión administrativa por la Ley de Extranjería, y que no tiene cabida, ni deberá tenerla jamás, en el Código Penal.

[8]Vid. Ley Orgánica 4/2000, de 11 de Enero, sobre Derechos y Libertades de los Extranjeros en España y su Integración Social, dada su última redacción conforme a la Ley Orgánica 2/2009, de 11 de diciembre.

Melilla (un 350% más que 2013). Gracias a las medidas disuasorias y a la labor de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado, el 90% de los asaltantes no accedieron a Ceuta y Melilla. Hoy en día, persiste una fuerte presión migratoria hacia España, especialmente en las fronteras terrestres de Ceuta y Melilla. A la fuerte presión migratoria africana hacia España se suma ahora la ejercida por el flujo creciente de los ciudadanos procedentes de Siria[7].

Los datos revelan que actualmente en nuestro país el mayor flujo de inmigrantes irregulares sigue siendo las fronteras terrestres de Ceuta y Melilla. Iñigo MORÉ pone un ejemplo muy gráfico: "El PIB de España, con 47 millones de habitantes, es superior al agregado de los 53 países africanos con sus 1.300 millones de habitantes. Nuestro país tiene el récord mundial de desigualdad con respecto a sus vecinos"[8].

3.3. La protección internacional

A diferencia de los inmigrantes irregulares "económicos", los inmigrantes que solicitan protección internacional no deberían ser en principio considerados inmigrantes irregulares. Efectivamente, los desplazados que huyen de los conflictos bélicos, de los riesgos medioambientales, de las dictaduras no son inmigrantes irregulares y se benefician de la protección que proporciona el Derecho de Asilo.

Puede reconocerse a un refugiado como tal de forma colectiva y a primera vista (*prima facie*) o de forma individual. A la gran mayoría de los refugiados del mundo se les considera como tales al valorar a primera vista las condiciones que se dan en su país de origen y que dieron pie a la huida.

El procedimiento RSD[9] individual se utiliza sobre todo en casos de flujos mixtos, en los que es necesario distinguir a los refugiados de otros migrantes. Pueden llevarlo a cabo los Estados o ACNUR. Sin embargo, es preferible que lo realicen los primeros, puesto que son los gobiernos los responsables de garantizar que los refugiados reciban en su territorio un trato acorde con las normas internacionales, con la supervisión de ACNUR[9].

Los países del norte de Europa son los principales receptores de solicitudes de asilo[10]. En la actual crisis del Mediterráneo Central provocada por la llegada masiva de inmigrantes, podría ser el gran error de la ciudadanía europea el considerar a estas personas inmigrantes irregulares y no realmente lo que son: personas solicitantes de protección internacional que huyen de sus países de origen por diversos motivos y, por lo tanto, beneficiarias potenciales del Derecho de Asilo y de la Protección Subsidiaria.

3.4. Cooperación internacional

"Sin la implicación de los países de origen y tránsito es imposible la lucha contra la inmigración irregular"[11]. Si bien es cierto que se deben frenar o al menos intentar reducir las oleadas de llegadas masivas de inmigrantes irregulares[10] a las fronteras de la UE[11], no es menos cierto que la cuestión de fondo es mucho más compleja donde se precisa de la implicación y colaboración de los países de origen, tránsito y destino de la inmigración irregular.

[9]Refugee Status Determination, por sus siglas en inglés.
[10]Como ya se ha expuesto anteriormente, el inmigrante que solicita protección internacional o posible beneficiario potencial del Derecho de Asilo no debería ser considerado un inmigrante irregular.
[11]El universo de estudio en este artículo de comunicación es principalmente las costas del Mar Mediterráneo.

Ejemplo de buenas prácticas y un caso de éxito en lo que a la colaboración entre países en la lucha contra la inmigración irregular se refiere, lo tenemos en España y en los países con los que se han firmado acuerdos de colaboración[12] para controlar la inmigración irregular desde el origen y el tránsito a nuestras fronteras, lo que ha permitido que se cerrara en 2006 la conocida como ruta atlántico-africana[12] de la inmigración irregular. Esta colaboración exitosa ha sido posible gracias a que son países con gobiernos estables e interlocutores reconocidos. No es el caso, en cambio, en la ruta del "Mediterráneo Central". En el año 2014, las detecciones en esta zona alcanzaron un nivel asombroso. Más de 170.000 inmigrantes llegaron sólo en Italia, lo que representa la mayor afluencia en un solo país en la historia de la UE. Muchos migrantes partieron de Libia, donde la falta de Estado de Derecho y del orden público básico fomenta la aparición de redes de contrabando. Sirios y eritreos fueron las dos principales nacionalidades, pero numerosos africanos procedentes de regiones subsaharianas también utilizan esta ruta[13].

3.5. Tráfico ilícito de migrantes

La desesperación del inmigrante le hace que no desista en su empeño por llegar a las costas de la UE, lo que es aprovechado por la delincuencia organizada para lucrarse a costa de la desesperación del inmigrante y sus familias. Según *The Migrants Files*[13], haciendo una estimación conservadora, los traficantes de personas se han embolsado más de 1.000 millones de euros al año por "ayudar" a los migrantes a alcanzar Europa[14]. Un negocio lucrativo para las mafias que funcionan como auténticas "agencias de viajes" facilitando a los inmigrantes la llegada a las costas de la UE con tarifas diferentes según los tipos de servicios que están dispuestos a contratar.

Tráfico de inmigrantes, organización o grupo criminal, delincuencia organizada, mafias… Aclaremos estos términos. A nivel internacional la "Convención de las Naciones Unidas contra la delincuencia organizada transnacional y sus protocolos[15]" en su artículo 2 del anexo I entiende por "grupo delictivo organizado" un grupo estructurado de tres o más personas que exista durante cierto tiempo y que actúe concertadamente con el propósito de cometer uno o más delitos graves o delitos tipificados con arreglo a la presente Convención con miras a obtener, directa o indirectamente, un beneficio económico u otro beneficio de orden material. En ese mismo artículo se define al "grupo estructurado" como un grupo no formado fortuitamente para la comisión inmediata de un delito y en el que no necesariamente se haya asignado a sus miembros funciones formalmente definidas ni haya continuidad en la condición de miembro o exista una estructura desarrollada.

El Protocolo contra el tráfico ilícito de migrantes por tierra, mar y aire que complementa la Convención de las Naciones Unidas contra la Delincuencia Organizada Transnacional entiende por "tráfico ilícito de migrantes" la facilitación de la entrada ilegal de una persona en un Estado Parte del cual dicha persona no sea nacional o residente permanente con el fin de obtener, directa o indirectamente, un beneficio financiero u otro beneficio de orden material. En su artículo 5 se dice que: "Los migrantes no estarán sujetos a enjuiciamiento penal con arreglo al presente Protocolo…"

A nivel nacional, y a los efectos del vigente Código Penal, en su artículo 570 bis se dice que: "se entiende por *organización criminal* la agrupación formada por más de dos personas con carácter

[12]Senegal, Mauritania, Cabo Verde, Guinea Bissau, Guinea Conakry, Marruecos y Gambia.
[13]Proyecto transfronterizo llevado a cabo por quince periodistas y programadores.

estable o por tiempo indefinido, que de manera concertada y coordinada se repartan diversas tareas o funciones con el fin de cometer delitos".

En el artículo 318 bis en su apartado 1 se dice que: "El que intencionadamente ayude a una persona que no sea nacional de un Estado miembro de la UE a entrar en territorio español o a transitar a través del mismo de un modo que vulnere la legislación sobre entrada o tránsito de extranjeros, será castigado… Los hechos no serán punibles cuando el objetivo perseguido por el autor fuere únicamente prestar ayuda humanitaria a la persona de que se trate".

El apartado 2 del mismo artículo dice: "El que intencionadamente ayude, con ánimo de lucro, a una persona que no sea nacional de un Estado miembro de la UE a permanecer en España, vulnerando la legislación sobre estancia de extranjeros será castigado…".

No se deben confundir las anteriores prácticas con las desarrolladas por personas (funcionarios principalmente) que sin escrúpulos y aprovechando la posición que ocupan, exigen pagos al inmigrante para facilitarle el paso, agilizarle la documentación o proporcionarle documentos de viaje falsos.

3.6. Solidaridad

"*No nos dejéis solos*[16]". Así se expresaba el primer ministro italiano, Matteo Renzi, el pasado mes de abril en una rueda de prensa tras un consejo de ministros extraordinario con motivo del naufragio de un pesquero en aguas del Canal de Sicilia, entre las costas de Italia y Libia, y que provocó la mayor catástrofe ocurrida en el Mediterráneo en los últimos años.

Parece oportuno recordar el considerando 5 del Reglamento (CE) número 2007/2004 del Consejo de 26 de octubre de 2004 por el que se crea una Agencia Europea para la gestión operativa en las fronteras exteriores de los Estados miembros de la UE: "La eficacia del control y la vigilancia de las fronteras exteriores es una cuestión de máxima importancia para los Estados miembros, independientemente de su situación geográfica. Por esta razón, es necesario promover la *solidaridad* entre los Estados miembros en el ámbito de la gestión de las fronteras exteriores"

Igualmente el considerando 2 del Reglamento (UE) número 656/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de mayo de 2014 por el que se establecen normas para la vigilancia de las fronteras marítimas exteriores en el marco de la cooperación operativa coordinada por la Agencia Europea para la Gestión de la Cooperación Operativa en las Fronteras Exteriores de los Estados Miembros de la Unión Europea dice que "las políticas de la Unión en materia de gestión de fronteras, asilo e inmigración y su aplicación deben regirse por el *principio de solidaridad* y de reparto equitativo de la responsabilidad entre los Estados miembros,…"

Pero la solidaridad no solo debe ser predicada entre los países miembros de la UE, también debe ser exigida para con los propios inmigrantes, verdaderas "víctimas" de este drama social. Así el considerando 1 del Reglamento (UE) número 656/2014 indica que "el objetivo de la política de la Unión en el ámbito de las fronteras exteriores de la Unión es garantizar el control eficaz del cruce de las fronteras exteriores, inclusive mediante la vigilancia de fronteras, *contribuyendo al mismo tiempo a proteger y a salvar vidas*".

3.7. Medios tecnológicos y humanos

Según el Código de Fronteras Schengen[14] el *control fronterizo* es "la actividad realizada en las fronteras,… que… obedezca a la intención de cruzar la frontera o en el propio acto de cruzarla y que consista en la realización de inspecciones fronterizas y de actividades de vigilancia de fronteras". Por *vigilancia de fronteras* se entiende, según el mismo Código, como la vigilancia que se ejerce entre los pasos fronterizos y la vigilancia de estos últimos fuera de los horarios de apertura establecidos, con el fin de impedir que las personas se sustraigan a las inspecciones fronterizas. Por su parte, el Considerando 1 del Reglamento (UE) número 656/2014 especifica que la vigilancia de fronteras tiene por objeto impedir el cruce no autorizado de las fronteras, luchar contra la delincuencia transfronteriza y detener a las personas que cruzan ilegalmente las fronteras o adoptar contra ellas otro tipo de medidas.

Este artículo de comunicación se centra en la actividad de vigilancia de fronteras y en concreto en la vigilancia de fronteras marítimas. El despliegue de medios tecnológicos y humanos en dicha vigilancia debe realizarse bajo los principios de coordinación y eficiencia.

3.7.1. España: un caso de éxito y modelo a exportar

En España principalmente la vigilancia de fronteras la realiza la Guardia Civil. El Sistema Integral de Vigilancia Exterior (SIVE) nace en el año 1999 para dar solución a los problemas de la zona del Estrecho (inmigración irregular y tráfico de drogas principalmente) ante la imposibilidad de cubrir toda la costa. Actualmente cuenta con un despliegue de 75 estaciones distribuidas a lo largo de toda la costa española, a excepción del mar Cantábrico. Las cuatro funciones básicas de este sistema son: detección, identificación, comunicación Centro de Mando – Análisis, e intervención (rescate e interceptación).

España también participa en la *Red Eurosur*[15] y en diversos proyectos[16] relacionados con el control fronterizo y en particular sobre la vigilancia marítima[17].

Igualmente participa en Operaciones Conjuntas de *Frontex*, destacando la EPN-INDALO liderada y coordinada por la Guardia Civil y cuyo propósito principal es la detección de los flujos migratorios irregulares procedentes de Marruecos y Argelia[18].

Pero este modelo no hubiera obtenido unos resultados tan positivos sin la labor sorda, y a veces no comprendida, de todos los agentes que se dedican de una u otra manera a la vigilancia de fronteras.

No obstante, el éxito es relativo. En las entrevistas llevadas a cabo a inmigrantes llegados a varios países europeos emerge el mismo patrón: todos lo intentan más de una vez. El cierre de una vía no les echa para atrás. Es una cuestión lógica de vasos comunicantes: si cierras un lado, se hace más presión por el otro[19].

[14]Vid. Reglamento (CE) número 562/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo de 2006, por el que se establece un Código comunitario de normas para el cruce de personas por las fronteras (Código de Fronteras Schengen).

[15]La Red Eurosur permite a los Estados miembros compartir imágenes en tiempo real y datos sobre la situación en las fronteras exteriores de la UE. Recuperado de la página web http://www.europarl.europa.eu/news/es/news-room/content/20131007IPR21624/html/Eurosur-el-PE-adopta-un-nuevo-sistema-de-vigilancia-de-las-fronteras-exteriores

[16] SEAHORSE, BLUEMASSMED, COOPERATION PROJECT, WIMAAS, ARIADNA, DOLPHIN, OPARUS, SEABILLA, PERSEUS, CLOSEYE, AEROCEPTOR, EWISA y EUCISE 2020.

3.8. Análisis de riesgos

El análisis de riesgos es el punto de partida para todas las actividades de *Frontex*, desde las operaciones conjuntas, pasando por la formación, hasta los estudios de investigación. Con el fin de identificar las tendencias a corto, medio y largo plazo, se necesita recopilar y analizar una ingente cantidad de datos. Para ello *Frontex* supervisa el entorno de seguridad global, especialmente los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, legales y ambientales que podrían afectar a la seguridad fronteriza.

La agencia recopila datos de los Estados miembros, los órganos de la UE, así como de los medios de comunicación públicos y otras fuentes dentro y fuera de las fronteras de Europa. Pero el trabajo analítico de la agencia es más que la identificación de riesgos. Se trata de maximizar la eficacia en la prevención de la delincuencia transfronteriza y garantizar la seguridad de las fronteras exteriores de la UE mediante la predicción de las tendencias futuras y proponer remedios.

Para analizar todos los datos, *Frontex* ha desarrollado su propio modelo de análisis de riesgos, llamado CIRAM[17].

En el año 2014, la UE detectó el mayor número de cruces ilegales de la frontera desde la recogida de datos que *Frontex* comenzó hace 8 años. El número récord de 280.000 detecciones fue impulsado principalmente por los combates en curso en Siria[18]. Las tendencias de las organizaciones criminales es utilizar cada vez más embarcaciones inseguras, poniendo a los migrantes en mayor peligro, también el empleo de buques de carga, o el aumento del número de intentos deliberados para involucrar a los buques mercantes en el rescate de migrantes[20].

Y, sin embargo, parece que algo ha fallado en el análisis de riesgos y prospectiva que se ha llevado a cabo, pues no se ha previsto o no se ha querido prever (me niego a pensar en esto último) las sucesivas catástrofes que han acontecido últimamente en el Mediterráneo central. *Frontex* y el resto de agencias que cuentan entre sus cometidos con el análisis de riesgos y prospectivas deberían tomar buena nota.

4. Conclusiones

Marco normativo y política común europea: con las medidas que se han llevado a cabo últimamente, la UE debe demostrar que está preparada para asumir el reto de gestionar correctamente la llegada masiva de flujos migratorios.

La inmigración económica/la pobreza: es inevitable el hecho de que el inmigrante ejerza su derecho por alcanzar un nivel económico de vida mejor, como lo es también el que la UE ejerza su derecho a vigilar sus fronteras y garantizar que se accede a las mismas en condiciones de regularidad.

Protección internacional: las personas solicitantes de protección internacional que huyen de sus países de origen por diversos motivos son beneficiarias potenciales del Derecho de Asilo y de la Protección Subsidiaria y por lo tanto no deberían ser consideradas inmigrantes irregulares.

[17]Modelo de Análisis Integrado de Riesgos Comunes. CIRAM se basa en un modelo de control de acceso de cuatro niveles que implica la recopilación de información y la difusión de análisis de riesgos para una amplia gama de socios, ofreciendo a Frontex una base de coordinación de las operaciones conjuntas en las fronteras exteriores y permitiendo la evaluación de los riesgos planteados por diferentes amenazas.

[18]Más del 60% (170.000) de todos los cruces fronterizos ilegales se detectaron en el Mediterráneo central.

Cooperación internacional: la implicación de los países de origen y tránsito es indispensable para luchar contra la inmigración irregular, ayudando a crear fronteras adelantadas, con una vigilancia igualmente adelantada.

Tráfico ilícito de migrantes: mientras los beneficios que reporta para las mafias el tráfico de inmigración irregular les sea sustancioso, ésta no disminuirá.

Solidaridad: la inmigración irregular no puede ser vista exclusivamente como un problema de los países que la padecen.

Medios tecnológicos y humanos: ayudan a combatir la inmigración irregular, pero no la eliminan, más bien la hacen trasladar a otras zonas (teoría de los vasos comunicantes).

Análisis de riesgos: los análisis de riesgos y de prospectiva han fallado pues no se ha anticipado lo que estaba por venir, teniéndose que actuar a posteriori.

Agradecimientos

Al Centro Universitario de la Guardia Civil por el apoyo y confianza que han depositado en el autor y a la organización del DESEi+D 2015 por brindar esta oportunidad de transferencia de conocimientos.

Referencias

1. España, Consejo de Ministros. *Estrategia de Seguridad Nacional 2013*, p. 32. Recuperado de http://www.lamoncloa.gob.es/documents/seguridad_1406connavegacionfinalaccesiblebpdf.pdf
2. European Union. *La política de inmigración*, 2015, p. 1-5. Recuperado de http://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/es/FTU_5.12.3.pdf
3. European Union. *Gestionar mejor la migración en todos sus aspectos: una Agenda Europea de Migración*. Recuperado de http://europa.eu/rapid/press-release_IP-15-4956_es.htm
4. European Union. *La política de asilo,* 2015, p. 1-2. Recuperado de http://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/es/FTU_5.12.2.pdf
5. España, Consejo de Ministros. *Estrategia de Seguridad Nacional 2013*, p. 32. Información recuperada del sitio web http://www.lamoncloa.gob.es/documents/seguridad_1406connavegacionfinalaccesiblebpdf.pdf
6. Peña Pérez, A.; *Inmigrantes ilegales: Concepto infame. Responsables y Deshonrados,* 2012. Recuperado de http://portaljuridico.lexnova.es/articulo/JURIDICO/134593/iv-inmigrantes-ilegales-concepto-infame-responsables-y-deshonrados-pena-perez-alejandro-revi
7. España, Ministerio del Interior. *Balance 2014. Lucha contra la inmigración irregular*. Recuperado de http://www.interior.gob.es/documents/10180/3066430/Balance+2014+de+la+lucha+contra+la+inmigraci%C3%B3n+irregular/4a33ce71-3834-44fc-9fbf-7983ace6cec4
8. Moré, I.; *Borders of inequality: Where Wealth and Poverty Collide*, Universidad de Arizona, EEUU, 2011. Información recuperada de OTERO, J.; *Ceuta y Melilla, la frontera entre ricos y pobres más desigual del mundo.* Recuperado de http://www.publico.es/actualidad/ceuta-y-melilla-frontera-ricos.html

9. Stainsby, R.; *ACNUR y la determinación individual de la condición de refugiado*. Recuperado de http://www.fmreview.org/es/pdf/RMF32/24.pdf
10. España, Presidencia del Gobierno. *Informe anual de seguridad nacional 2014*. p.111. Recuperado de http://www.lamoncloa.gob.es/serviciosdeprensa/notasprensa/presidenciadelgobierno/Documents/150424_Informe%20Anual%20de%20Seguridad%20Nacional_14.pdf
11. Instituto Universitario de Investigación sobre Seguridad Interior (IUISI), *II Taller de operaciones Conjuntas*, Málaga. 16 - 18 junio 2015, ponencia de LOBO ESPINOSA, E.
12. España, Ministerio del Interior. *Informe Anual de Seguridad Nacional 2014*, p. 7. Recuperado de http://www.interior.gob.es/documents/10180/3066430/Balance+2014+de+la+lucha+contra+la+inmigraci%C3%B3n+irregular/4a33ce71-3834-44fc-9fbf-7983ace6cec4
13. European Union, FRONTEX. *Tendencias y rutas*: *Ruta del Mediterráneo Central*, 2015. Recuperado de http://frontex.europa.eu/trends-and-routes/central-mediterranean-route/
14. Grasso, D.; *Europa gasta 13.000 millones para frenar la inmigración, los traficantes ganan 16.000*. Recuperado de http://www.elconfidencial.com/mundo/2015-06-18/europa-gasta-13-000-millones-para-frenar-la-inmigracion-los-traficantes-ganan-16-000_888641/
15. Naciones Unidas. *Resolución 55/25 de la Asamblea General de las Naciones Unidas*, de 15 de noviembre de 2000.
16. Periódico digital. "Europapress". *Renzi recuerda que han muerto "personas, no números" y pide cumbre de la UE,* 2015. Recuperado de http://www.europapress.es/internacional/noticia-renzi-recuerda-muerto-personas-no-numeros-pide-cumbre-ue-20150419195746.html
17. Instituto Universitario de Investigación sobre Seguridad Interior (IUISI), *II Taller de operaciones Conjuntas*, Málaga. 16 - 18 junio 2015, ponencia de Borjas Astorga, J.
18. Instituto Universitario de Investigación sobre Seguridad Interior (IUISI), *II Taller de operaciones Conjuntas*, Málaga. 16 - 18 junio 2015, ponencia de Acosta Díaz, F.J.
19. Periódico digital."El confidencial". *Ante el cierre de fronteras, los inmigrantes se vuelcan hacia rutas más peligrosas*, 2014. Recuperado de http://www.elconfidencial.com/mundo/2014-03-31/ante-el-cierre-de-fronteras-los-inmigrantes-se-vuelcan-hacia-rutas-mas-peligrosas_109006/
20. European Union, FRONTEX. *Frontex publica el Análisis Anual de Riesgos 2015*. Recuperado de http://frontex.europa.eu/news/frontex-publishes-annual-risk-analysis-2015-lA1x1g

Mali como ejemplo de desafío en materia de seguridad para España y sus aliados.

Real, Bénédicte[1,*].

[1] Profesora Ayudante, Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza. breal@unizar.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo; breal@unizar.es

Abstract: La degradación de la situación en Malí debido a la intrusión de grupos terroristas al Norte del país hizo saltar las alarmas de la Comunidad Internacional. Numerosos actores decidieron llevar a cabo determinadas acciones para apoyar al gobierno de Bamako. Este paper tratará de la intervención de dos actores cuyo papel es esencial: Naciones Unidas la Unión Europea. Se mencionaran las estrategias que están llevando a cabo estas dos Organizaciones Internacionales, haciendo hincapié sobre las cuestiones vinculadas con la seguridad y la defensa, para ayudar a Malí.

Keywords: Malí; Sahel; Terrorismo; Desarrollo; Unión Europea; Naciones Unidas; EUTM Malí; MINUSMA. Fuerzas Armadas.

1. A modo de introducción: Malí, país de una región debilitada.

El Sahel es hoy en día una de las zonas que más preocupa a la Comunidad Internacional, en particular su zona occidental (Mauritania, Malí, Argelia y Níger). De hecho, el riesgo de implantación

del terrorismo, que podría perjudicar a los países del Magreb y más allá, a los europeos como España[1], ha hecho saltar todas las alarmas[2].

La situación de los países de esta zona es de por sí muy compleja y vulnerable. Si con los esfuerzos de la Comunidad Internacional se ha intentado reducir las distancias entre los países desarrollados y los en vía de desarrollo (por ejemplo, el Índice de Desarrollo Humano -IDH- en Mali se ha duplicado entre 1990 y 2010, pasando de 0.17 a 0.37 [3]), cabe lamentar una situación global muy deficiente y con progresos demasiado tímidos. De los cuatro países antes mencionados, sólo Argelia tiene una situación relativamente aceptable en comparación con Mauritania, Malí y Níger según los datos del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo[4], siendo así esta zona una de las más pobres del mundo.

Varios factores pueden explicar la debilidad de la zona: se trata de una región tradicionalmente sometida a fricciones étnico-religiosas[5], con fronteras delimitadas sin tener en consideración las poblaciones, un pueblo tuareg sin territorio atribuido[6], una población joven sin expectativas de futuro[7], que sufre las consecuencias del cambio climático[8]… Sin embargo, es sin lugar a dudas la falta de protagonismo del Estado en el cumplimiento de su obligación de controlar el territorio donde la debilidad de la zona es la más problemática[9].

Por una parte, cabe lamentar la porosidad de las fronteras. En efecto, la carencia de control efectivo en las fronteras de los países de la zona de Sahel permite la multiplicación de actividades delictivas como el tráfico ilícito de drogas o de personas. Por otra parte, la caída del régimen de Gadafi en 2011 ha acentuado otros fenómenos como el tráfico de armas, pero sobre todo la vuelta de mercenarios que ya no tenían la protección del antiguo líder libio[10]. Malí fue, de hecho uno de los países más afectados por este acontecimiento ya que la falta de presencia del Estado en la parte Norte

[1] Ballesteros, M. A.: "Diagnóstico geoestratégico del conflicto en Malí", Documento de análisis 14/2013 in *Instituto Español de Estudios Estratégicos*, http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_analisis/2013/DIEEEA142013_DiagnosticoEstrategicoSAHEL_GB.Ballesteros.pdf. (consultado el 15 de julio de 2015.)

[2] En este sentido, se ha llegado a comparar Malí a "un Afganistán en el patio europeo". Sorroza, A.: "La guerra en Malí y las responsabilidades europeas". Comentario Elcano 11/2013. In Real Instituto Elcano; http://www.elcano/es. (consultado el 15 de julio de 2015.)

[3] PNUD: "L'avancée des populations », in *Rapport sur le développement Humain 2010, La vraie richesse des Nations. Le développement humain.* PNUD, New York, p.37.

[4] En efecto, según los informes del PNUD de 2013 y 2014, Níger ocupa la última posición de los 187 analizados en la clasificación según el IDH, Mauritania baja de la 155 a la 161ª posición y Argelia se mantiene a la 93ª posición. En relación con Malí, las consecuencias del conflicto armado se han notado en la clasificación de 2013 (182ª posición), pero en el informe de 2014, había ascendido a la 173ª posición. No obstante, el valor IDH, independientemente del "ranking", demuestra en su globalidad, una mejoría muy leve.

[5] En este sentido, Calduch Cervera, R.: "Impacto estratégico de la crisis del Sahel", in *Panorama Estratégico 2013,* CESEDEN, Madrid, 2013, pp. 119-120

[6] Ballesteros, M. A.: "Diagnóstico…", *op. cit.* p. 2.

[7] Op. cit. p. 3.

[8] Crawford, A.: "Climate Change and state fragiliy", in FRIDE, Policy Brief nº 205. June 2015. http://fride.org/publication/1265/climate-change-and-state-fragility-in-the-sahel (consultado el 15 de julio de 2015)

[9] Volveremos más adelante sobre otras consecuencias de la carencia de gobernanza, como por ejemplo las dificultades existentes para distribuir a las poblaciones las necesidades básicas.

[10] Bello, O. ": La implantación de la estrategia de la UE para el Sahel: entre arenas movedizas". Documento de trabajo, núm. 114, noviembre de 2012. (consultado el 15 de julio de 2015), recuperado de *http://www.fride.org*

del país permitió la instalación de grupos islamistas que se mezclaron con otros rebeldes al régimen de Bamako. A finales de 2012 se deterioró tanto la situación que se tuvo que intervenir militarmente para permitir el restablecimiento del orden (relativo) en el país. Pero el país no disponía de recursos suficiente y diferentes actores internacionales tuvieron que intervenir.

Basándonos principalmente sobre las cuestiones vinculadas con la seguridad, analizaremos la intervención de dos principales actores: las Naciones Unidas y la Unión Europea (UE), con las diferentes misiones establecidas. En particular, nos detendremos sobre la Misión de la UE para Adiestramiento Militar (EUTM) en la que España tiene un papel destacable.

2. La Estrategia integrada de las Naciones Unidas.

Rara vez se ha podido observar un número tan elevado de iniciativas unilaterales o multilaterales para restablecer la seguridad en la zona del Sahel[11]. De hecho, la Estrategia aprobada por Naciones Unidas en junio de 2013[12] demuestra en este sentido la inquietud de la Comunidad internacional y la voluntad de intervenir si fuera necesario. Se basa en tres ejes de intervención (gobernanza, seguridad y humanitario), y subraya que las amenazas no conocen fronteras, se recomienda la participación de numerosas agencias de la ONU, de Organizaciones Internacionales regionales (UA, CEDEAO) o de países de la misma zona del Sahel.

Sin embargo, y a pesar de que no se mencione en dicho Estrategia la posible intervención de cascos azules, el Consejo de Seguridad había creado, en aplicación del Capítulo VII de la Carta, la Misión Multidimensional Integrada de Estabilización de Naciones Unidas en Malí (MINUSMA)[13]. En el momento de la adopción de la resolución 2100, la situación en Malí era preocupante, pero se consideraba que los cascos azules podían, como el nombre de la misión lo precisa, estabilizar la zona (dando a entender que la zona no estaba sometida a combates). Sin embargo, rápidamente, las fuerzas regulares en la zona no pudieron controlar los movimientos terroristas y se tuvo que lamentar la baja de muchos cascos azules[14]. El mandato inicial de ayudar a las autoridad a controlar las grandes aglomeraciones, prestarles asistencia técnica o sensibilizarlas a la protección de los derechos humanos no podía ser suficiente.

Por ello, se adoptaron nuevas resoluciones, siendo la última la 2227 (2015) del 29 de junio, en la que se puede apreciar la modificación del mandato[15]. En efecto, el mero hecho de autorizar a la

[11] Helly, D. Théroux-Bénoni L. A.; Galeassi, G. ; Maïga, I. Ouedraogo, F. : "Stratégies Sahel: L'impératif de la coordination", note d'analyse 76, mars 2015 *Institut d'études de sécurité, European Centre for Development policy Management,* http://ecdpm.org/publications/strategies-sahel-limperatif-de-la-coordination/ (consultado el 15 de julio de 2015).
[12] Rapport du Secrétaire Général sur la situation dans la région du Sahel. S /2013/354. 14 juin 2013.
[13] Resolución 2100 de 25 de abril de 2013 de 25 de abril de 2013.
[14] De hecho, hoy en día, la MINUSMA es la segunda misión (tras ONUSOM II en Somalia) en número de bajas (43 a fecha de 30 de junio de 2015.)
[15] De hecho, el cambio ya se introdujo con la resolución intermedia 2164 (2014) de junio)

MINUSMA a "utilizar todos los medios necesarios" para cumplir con su misión implica el posible uso de la fuerza, lo que ya había hecho en enero de 2015[16].

Sin lugar a duda, seguir llamando a la MINUSMA una misión de "estabilización" no puede ser considerado como adecuado, ya que claramente el mandato autorizado va más allá y el objetivo de estabilización no corresponde con la realidad en el terreno. Si en el futuro se degrada aún más la situación, con el riesgo de poner en jaque el conjunto del proceso que se lleva a cabo en Malí, el Consejo tendrá que tomar sus responsabilidad o se arriesgará a perder (una vez más) credibilidad.

3. El papel de la UE: la seguridad como eje principal de la acción europea.

Ya lo hemos mencionado: la seguridad en el Sahel es una preocupación para Europa por la proximidad geográfica de la zona y las consecuencias nefastas que podría conllevar para los europeos la existencia de Estados fallidos en el Norte de África. Por ello, la UE adoptó en septiembre de 2011 *La Estrategia para la Seguridad y el Desarrollo en la Región de Sahel*[17], vinculando el desarrollo[18] a la seguridad y enfocando sus primeros esfuerzos hacia Mauritania, Malí y Níger, donde se ubicaba principalmente la red terrorista de Al Qaeda[19]. Sin embargo, la degradación de la situación hizo que se extendiera la *Estrategia* a Chad y Burkina Faso en marzo de 2014. En esa línea, en abril de 2015[20] se adoptó, con el fin de precisar la acción de la Unión en la zona el *Plan de Acción 2015-2020* correspondiendo al texto mencionado anteriormente.[21].

Dicho texto pretende reforzar cuatro ejes de actuación de la UE, dos de ellos directamente vinculados a cuestiones de seguridad[22]: prevenir y contrarrestar la radicalización de las poblaciones (fenómeno acentuado por la situación extrema de pobreza y de falta de perspectivas de futuro) por una parte y el control de las fronteras (en particular para luchar contra el tráfico ilícito y el crimen organizado transnacional) por otra[23]. La acción de la UE, como la de Naciones Unidas, no pretende ser

[16] Boutellis, A. : "Can the UE Stabilize Mali? Toward a UN Stabilization Doctrine" in *Stability: International Journal of Security and Development* 4(1), p. 2.

[17] Council Conclusions on a European Union Strategy for Security and Development in the Sahel 2076th Foreign Affairs Council Meeting Brussels, 21 March 2011. Joint Staff working Paper, Joint Paper European Strategy for Security and Development in the Sahel, SEC(2011)331 final. Recuperado de *http://eeeas.europa.eu/africa/docs/sahel/sahel_sahel_strategy_en.pdf* . De hecho, desde varios meses, el Consejo de la UE, en su formación relaciones exteriores subrayaba la peligrosidad de la zona, que se acentuaba por culpa de los acontecimientos conocidos como La Primavera Árabe", en particular el Libia. Keenan, J.: "El reto de la seguridad en el Sahel: las perspectivas argelinas, marroquí y libia" in *Anuario IEmed* 2011, pp. 166-169.

[18] Tal como lo precisa el Plan de acción adoptado en abril de 2015, hoy en día, más de 20 millones de personas están en situación de inseguridad alimentaria de los cuales 4 millones en una situación de urgencia.

[19] De hecho, en el mapa de la zona de Sahel incluido en la Estrategia Europea, queda patente el control de Al Qaeda en la zona norte de Malí.

[20] Conclusions du Conseil sur le plan d'action régionale en faveur du Sahel pour la période 2015-2020 . http://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2015/04/20-council-conclusions-sahel-regional-plan/ (consultado el 15 de julio de 2015.)

[21] Council Conclusions on the Sahel Regional Action Plan 2015-2020. Brussels, 20 April 2015. 7823/15.

[22] Subrayamos la existencia de dos otros programas temáticos que se aplican en la zona del Sahel, como El *Instrumento para la Estabilidad*, remplazado por el *Instrumento para la Estabilidad y la Paz* y la posibilidad de acciones dentro del ámbito de la Política de Vecindad.

[23] Los dos otros ejes de acción se centran sobre la juventud de un lado y la migración /movilidad de otro.

unilateral. De hecho, se quiere trabajar con numerosos otros actores como la ONU, la Unión Africana o la Comunidad Económica de Estados de África occidental, siendo particularmente interesante de remarcar el G5 (reunión de los jefes de Estado de Burkina Faso, Chad, Malí, Mauritania y Níger en febrero de 2014 con ocasión de una mini Cumbre en Nuakchot) .

A la vista de la acción de la UE en la zona del Sahel, no sorprende comprobar que la Comisión Europea tenga un papel importante, a través de sus Direcciones Generales especializadas, que intervienen en materia de Desarrollo o de Ayuda Humanitaria. Pero lo que más llama la atención es la multiplicidad de las misiones civiles y militares, en aplicación de la Política Común de Seguridad y Defensa, lo que más llama la atención. En efecto, a día de hoy, podemos destacar tres misiones directamente vinculadas a la región de Sahel: la EUCAP[24] Sahel Níger, activa desde 2012; la EUTM Malí establecida en 2013 y la EUCAP Sahel Malí, de 2014.

Si dos de estas misiones (las EUCAP) son civiles y sólo una militar, la EUTM Malí, las tres trabajan para mejorar las cuestiones vinculadas con la seguridad en la zona del Sahel. La primera de ellas, la EUCAP Sahel Níger[25], tiene como objetivo apoyar a las instituciones de ese país en la definición y puesta en marcha de sus propias metas en relación con su seguridad nacional por una parte y desarrollar una estrategia integrada, multidisciplinar, coherente y enfocada sobre los Derechos Humanos en materia de lucha contra el terrorismo y la criminalidad organizada. Cabe remarcar la ligera modificación del mandato en 2014, pues se ha pretendido hacer más hincapié sobre Níger. De hecho, el primer mandato de la misión acentuaba la vertiente regional de la misión, seguramente por la inexistencia en aquel momento de las demás misiones. Por otra parte, se ha añadido la definición de una estrategia nacional en materia de seguridad. A fecha de junio de 2015, han recibido formación más de 3000 miembros de las fuerzas de seguridad del Estado, de las fuerzas armadas y de la judicatura.

La segunda misión civil de la UE, desplegada en Malí, se creó a principio de 2014[26] y tenía como objetivo el de apoyar a las autoridades malienses en la formación de fuerzas de seguridad nacional (policía, *gendarmerie* y guardias nacionales). Tras varios meses necesarios para su instalación, dicha misión fue declarada operativa el 15 de enero de 2015[27] con el objetivo de formar 600 oficiales y suboficiales en 2015 hasta llegar a un tercio de los mandos intermedios o superiores al final de la misión. Con ella se pretende fomentar la formación de personal maliense en diferentes aspectos: policía judicial o técnica y científica, Derechos Humanos, lucha contra el terrorismo y crimen organizado.

[24] EUCAP : EUropean CAPapacity Building Mission. Se trata del nombre genérico que reciben las misiones civiles de la UE cuando de trata de ayudar a un Estado sobre cuestiones relativas a la gobernanza, el Estado de Derecho….
[25] Décision 2014/482/PESC du Conseil du 22 juillet 2014 modifiant la décision 2012/392/PESC concernant la mission PSCD de l'Union Européenne au Niger (EUCAP Sahel Niger), JOUE L. 217/31 du 23/07/2014.
[26] Décision 204/219/PESC du Conseil du 15 avril 2014 relative à la mission PSDC de l'Union européenne au Mali (EUCAP Sahel Malí).
[27] Décision (PESC) 2015/76 du Conseil du 19 de janvier de 2015 relative au lancement de la mission PSDC de l'Union Européenne au Mali (EUCAP Sahel Malí) et modifiant la décision 2014/219/PESC. JOUE L 13/5 du 20/1/2015.

Sin embargo, la EUCAP Sahel Malí no tendría razón de ser sin la existencia de la misión militar EUTM Malí, sin lugar a duda la clave de bóveda de la reconstrucción del sistema de la seguridad y la defensa del país. Esta misión de asesoramiento y de entrenamiento de las fuerzas armadas malienses se adoptó de conformidad con la legalidad internacional, en particular tras la petición de Bamako y la adopción de la Resolución 2085 (2012) del Consejo de Seguridad de Naciones Unidas. Ya hemos mencionado la carencia de los países del Sahel de fuerzas militares y de seguridad para controlar su territorio y sus fronteras. Pero cabe subrayar que, además de la escasez de éstas, en el caso de Malí, antes de la intervención de la Comunidad internacional, se veían afectadas por cuestiones de corrupción, falta de lealtad hacia el gobierno u otras lacras incompatibles con los valores que debe representar y cumplir[28].

Esta misión[29] tiene así la ardua tarea de reforzar el sistema de defensa maliense, ayudando a la reorganización del ejercito maliense por una parte y formando tropas y oficiales malienses para que puedan restablecer el orden constitucional y democrático de su país, ejercer plenamente su soberanía en el conjunto del territorio nacional y neutralizar la criminalidad organizada y la amenaza terrorista. Sin embargo, en ningún momento, las tropas de la UE tienen mandato para participar en los combates. De hecho, es significativo que el campo de entrenamiento de la misión militar europea se sitúe al Sur del país (a unos 60 kilómetros de Bamako, donde se establece el Cuartel General y en particular el *Advisory Task Force*), cuando las acciones bélicas tienen lugar al norte del país. Por ejemplo, Kidal, capital de la región del mismo nombre, y en la que sigue habiendo enfrentamientos armados, está a más de 1500 kilómetros de Bamako, centro político de toma de decisión. En esta zona se sitúa una base de la MINUSMA y es a la que fue enviado el primer grupo táctico formado por la EUTM Malí.

La misión de la UE tiene como objetivo la formación de unidades tipo batallón de unos 700 efectivos, utilizando las lecciones aprendidas del pasado. A título de ejemplo, se pretende mezclar en las unidades tuaregs –evitando la creación de grupos disidentes o deserciones múltiples- o la incorporación de boinas rojas, paracaidistas de la guardia presidencial que habían luchado para derrotar al general Amadou Sanogo, instigador de un golpe de Estado en 2012 [30].

En un primer momento, se preveía el adiestramiento de cuatro Grupos Tácticos Interarmas (GTIAs), así como el establecimiento de una cadena de mando y control eficiente en todas las funciones (personal, inteligencia, operaciones y logística), un batallón logístico y el entrenamiento especializados en TACP (*Tactical Air Control Party*), ingenieros, morteros y apoyos de fuego. Hoy en día, tras una revisión del mandato, se ha doblado el número de GTIAs a formar. A fecha de junio de 2015, la EUTM había entrenado a 4.200 militares malienses.

[28] Castilla Barea, J. C.: "Reforma de las Fuerzas Armadas de Malí y el futuro de la EUTM" Documento de opinión 93/2013. *Instituto Español de Estudios Estratégicos*, http://www.ieee.es (consultado el 15 de julio de 2015).
[29] Council Decision 2013/87/CFSP of 18 February 2013 of the launch of a European Union military mission to contribute to the training of the Malian Armed Forces (EUTM Malí). OJEU, L 46/27. 19/02/2013.
[30] Castilla Barea, J. C. : "Reforma….", *op. cit*,. pp. 13-14.

Debido a que la EUTM Malí no tiene mandato para entrar en combate, una vez superadas la formación de diez semanas, las tropas malienses se despliegan en el norte del país para luchar contra la amenaza terrorista, tomando el relevo de los GTIAs adiestrados anteriormente. Determinados elementos del batallón replegado participan entonces en la formación de nuevas unidades. De esta manera, de forma progresiva, las fuerzas armadas malienses irán ganando autonomía, permitiendo a la misión europea finalizar su tarea inicial, siguiendo el concepto de "train the trainers".

Si tuviéramos que subrayar el papel proactivo de determinadas naciones, tendríamos que subrayar el de Francia y de España, a pesar de que haya que remarcar que numerosos países de la UE (22) participan en la misión militar y que también se han integrado países terceros (Montenegro, Serbia y Suiza). La tradicional cercanía de Francia con determinados países africanos hizo que desde Bamako, a finales de 2012, se pidiera la ayuda francesa para luchar contra la rebelión instalada en el Norte. Esta se componía principalmente de rebeldes tuaregs perteneciente al Movimiento Nacional para la Liberación de la *Azawad* (nombre de la región) y de grupos terroristas, principalmente de la organización *Ansar Dine,* salafistas tuaregs, cuyo objetivo era la separación de Malí de tres provincias del Norte para instaurar una república islámica dónde prevaleciera la *Sharia.*

La operación *Serval* francesa, en apoyo a las tropas malienses regulares, desplegó en enero de 2013 y tenía mandato para intervenir con la fuerza para recuperar el control del Norte del país. Por ello, no fue sorprendente la proactividad francesa en el momento de llevar a cabo la misión militar europea, plenamente desplegada en marzo de 2013. En octubre de 2014, el traspaso de poderes en el seno de la EUTM Malí se hizo a favor de un oficial español, el general de brigada Alfonso García-Vaquero. Recientemente, en junio de 2015, el mando pasó a un general alemán[31] jefe de Operaciones en el Estado Mayor del Eurocuerpo[32], dando por finalizado por el momento el liderazgo español.

No es de sorprender tampoco la participación española. De hecho, la *Estrategia Nacional de Seguridad Nacional* aprobada por la Moncloa en mayo de 2013[33] menciona expresamente que "para los intereses españoles, tres zonas serán vitales en las próximas décadas: el Sahel, el Cuerno de África y el Golfo de Guinea[34]". Además, se hace especial mención a Malí, para subrayar los esfuerzos desplegados en la zona para luchar contra el terrorismo, el tráfico ilícito de armas y otros flagelos de este país. El interés español por contribuir a mejorar la estabilidad del Sahel se puso también de manifiesto con la aportación del destacamento aéreo "Marfil", que desde Senegal proporciona apoyo de transporte aéreo a las diferentes misiones desplegadas en la zona, con objetivo de apoyar a los países africanos a mejorar su seguridad.

[31] http://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2015/06/16-eutm-new-mission-commander-appointed/

[32] "El Eurocuerpo participarán en la misión de la Unión Europea en Mali (EUTM Malí) http://www.emad.mde.es/EMAD/novemad/noticias/2015/02/listado/20150206-Eurocuerpo.html. (consultado el 25 de julio de 2015)

[33]*Estrategia Nacional de Seguridad*. Mayo de 2013, consultado en http://www.lamoncloa.gob.es/ (consultada el 15 de julio de 2015).

[34] *Estrategia de Seguridad Nacional 2013*., pp. 17-18.

A pesar de la multiplicidad de las misiones en Malí/Sahel y de los numerosos actores involucrados, es importante no perder de vista la peculiaridad de la zona y de los adversarios. La porosidad de las fronteras es un elemento que implica una multiplicación de los esfuerzos. En efecto, cualquier debilidad podría ser aprovechada por traficantes o grupos terroristas para seguir desestabilizado la región. Durante la operación *Serval,* a finales de octubre de 2013, se llevó a cabo la operación *Hydre* (conjunta entre las fuerzas francesas de *Serval*, la MINUSMA y las fuerzas armadas malienses) para controlar la zona Gao-Gossi. La propia operación *Barkhane* (creada en agosto 2014 como substitución a la *Serval*) cuenta con una fuerza bajo mando francés pero que trabaja a nivel regional y global en la lucha contra el terrorismo, en la que participan las fuerzas armadas de cinco países del Sahel (Mauritania, Malí, Burkina Faso, Níger y Chad).

Es esencial que los esfuerzos de colaboración entre las diferentes misiones perduren y se consoliden, tanto a través de oficiales de enlace y de operaciones conjuntas en el terreno como de buenas relaciones institucionales a nivel diplomático entre los países de la zona en cuestión.

Mientras los diferentes actores procuran apoyar a Malí en su lucha contra el terrorismo islámico, a nivel político interno se ha llevado a cabo, tras varios meses de preparación, la adopción en enero de 2015 de una nueva Ley de Organización y de Programación militar 2015-2020[35]. Considerando la seguridad de las personas y de los bienes como uno de los puntos esenciales del gobierno del presidente Ibrahim Boubacar Keïta, investido en septiembre de 2014[36], este texto legislativo prevé una restructuración ambiciosa del aparato de la Defensa nacional maliense y es el resultado de meses de estudios con el asesoramiento de la EUTM. Con un presupuesto que representa más del 12 % del PIB nacional, se elabora un organigrama (incluyendo incluso las futuras escuelas militares), se presupuestan los gastos en material y en personal, teniendo en consideración que se evalúa una necesidad de 20 000 hombres (implicando, a fecha de enero de 2015, la contratación y formación de 10 000 personas).

7. Conclusiones.

La carencia de un control efectivo del territorio, añadido a varias dificultades como la ausencia de coexistencia pacífica entre diferentes grupos sociales, la pobreza, las desigualdades, ha transformado el Sahel, y más particularmente Malí en una zona donde los grupos terroristas pueden encontrar santuarios, poniendo en jaque la estabilidad de la región a una distancia no tan lejana de nuestro continente europeo. La Comunidad Internacional no podía quedarse los brazos cruzados y se están llevando a cabo numerosas iniciativas, en particular el envío de cascos azules y la creación de misiones civiles y militares de la UE. Hoy en día, aunque ya se pueda celebrar la reorganización de las fuerzas armadas malienses, con el objetivo final de otorgarles plena autonomía para el control de su territorio, la situación aún es delicada. En efecto, en el norte del país, los combates son aún importantes

[35] Loi d'Orientation et de programmation militaire 2015-2019. Para consultarlo : http://www.depechesdumali.com/6262-loi-d-orientation-et-de-programmation-militaire-un-investissement-de-plus-1-230-milliard-fcfa-en-5-ans.html

[36] Diez Alcalde, J.: "Malí: construir defensa con el respaldo de la Unión Europea", Documento de Análisis, *Instituto Español de Estudios Estratégicos*. http:///wwww.ieee.es (consultado el 15 de julio de 2015).

y la Comunidad Internacional no puede limitar sus esfuerzos ya que ello sería sin lugar a dudas aprovechado por grupos rebeldes o terroristas. Sin embargo, no podemos creer que se vayan a resolver las dificultades de la zona actuando únicamente en las cuestiones vinculadas con la seguridad, ya que una posible solución sólo sería provisional. Más que nunca una doctrina integrada, teniendo en cuenta factores como la pobreza o la debilidad de la gobernanza tiene que completar los esfuerzos en materia de seguridad.

Cartografía de modelos de combustible mediante combinación de imágenes LiDAR, SAR y ópticas en el Centro de Adiestramiento "San Gregorio"

Montealegre Gracia, Antonio Luis [1,3,*], Lamelas Gracia, María Teresa [2,3], García-Martín, Alberto [2,3], de la Riva Fernández, Juan [1,3] y Escribano Bernal, Francisco [2]

[1] Departamento de Geografía y O.T., Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España; E-Mail: delariva@unizar.es (J.)

[2] Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, Ctra. de Huesca s/n, 50090, Zaragoza, España; E-Mail: tlamelas@unizar.es (M.T.), algarcia@unizar.es (A.), fescrib@unizar.es (F.)

[3] GEOFOREST-IUCA, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España.

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: monteale@unizar.es (A.L)

Abstract: La cartografía de los tipos de combustible forestal de un territorio es fundamental para la estimación tanto de la ignición como de las condiciones de propagación del fuego en caso de incendio, con lo que es indispensable para la gestión forestal, cobrando aún mayor importancia en los campos de maniobras militares, dado que las actividades desarrolladas en éstos suponen un incremento del riesgo de incendio. En este contexto, el objetivo de esta investigación ha sido el desarrollo de una metodología operativa para obtener una cartografía detallada de tipos de combustible basada en el modelo *Prometheus*, mediante la integración de información de teledetección óptica multiespectral, LiDAR, SAR y datos de 108 parcelas de campo usados como "verdad-terreno". La selección de las variables independientes susceptibles de ser utilizadas en el proceso de clasificación digital se ha realizado mediante la prueba estadística de contraste de *Kruskal-Wallis*. La clasificación digital supervisada del área de estudio llevada a cabo, revela que la combinación de fuentes de información óptica y LiDAR produce el mejor resultado, con un 72,7% de acierto global en la identificación de las tipologías de combustibles y un índice *kappa* de 0,7.

Keywords: Modelo *Prometheus*; tipos de combustible; teledetección; imagen multiespectral; LiDAR; SAR; Clasificación digital

---

1. Introducción

España sufre cada año las consecuencias de los incendios forestales, a pesar de que se ha observado una reducción en el número durante la década 2001-2010. Sin embargo, la ocurrencia de grandes incendios, superiores a 100 ha, ha aumentado debido a tres causas fundamentales [1]: i) el incremento de la combustibilidad como consecuencia de la transformación de los sistemas productivos y de los usos de suelo; ii) las condiciones meteorológicas extremas, con periodos prolongados de sequía, relacionadas con el cambio climático; y iii) la actividad humana que tiene lugar en el territorio, que cada vez es más intensa e implica en numerosas ocasiones un alto riesgo de incendio.

Más concretamente, los campos de tiro y maniobras del Ministerio de Defensa tienen un factor adicional en la ocurrencia de incendios forestales, ya que en ellos convergen una serie de condicionantes que entrañan un riesgo directo de ignición, por un lado ligado a las actividades desarrolladas, como son las prácticas de tiro con fuego real y la caída de proyectiles, entre otras, y por otro a la presencia de amplias superficies forestales dentro y en su entorno próximo. Por todo ello, es necesario disponer de un Subsistema de Prevención y Extinción de Incendios Forestales (SPEIF) en el ámbito de los campos de maniobra o propiedades similares del Ministerio de Defensa, tal y como se recoge en la Directiva 42/2010, de 12 de julio, de la Ministra de Defensa [2] como desarrollo de la disposición adicional octava de la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes, modificada por la Ley 21/2015, de 20 de julio de 2015 [3]. Esto es fundamental para velar por la integridad del patrimonio forestal y natural en general, por las infraestructuras propias de este tipo de instalaciones y por las personas que desempeñan sus actividades en ese entorno.

En este sentido, la evaluación del riesgo de incendio, que es clave para la prevención y la planificación previa a la extinción, integra la estimación de: i) la ignición (humedad del combustible, factores humanos y naturales); ii) la propagación (propiedades físicas del combustible y condiciones topográficas y meteorológicas); y iii) la vulnerabilidad (socioeconómica y ecológica). Sin embargo, la gran diversidad de características que influyen en la combustibilidad de la vegetación obliga a desarrollar tipologías de combustibles caracterizados por una serie de parámetros cualitativos y/o cuantitativos que determinan unas condiciones concretas para la propagación del fuego [4]. En la actualidad la mayoría de los países ha desarrollado clasificaciones basadas en las ecuaciones de propagación de Rothermel [5], como el sistema de Estados Unidos (*National Fire Danger Rating System*, NFDRS), pero, en el entorno mediterráneo, una clasificación de especial interés por su adaptación a las condiciones regionales es la propuesta por el proyecto europeo *Prometheus* [6]. Este modelo presenta un marcado carácter estructural a la hora de modelizar el comportamiento del fuego, ya que tiene en cuenta la altura y la densidad de los elementos propagadores [4].

Las imágenes ópticas multiespectrales han sido habitualmente utilizadas en la cartografía de tipos de combustible a escala local y regional como un procedimiento alternativo frente a los costosos métodos de identificación a partir de fotografías aéreas o directamente en campo, aunque los sistemas de teledetección pasiva presentan ciertas limitaciones, dada su incapacidad para detectar el combustible localizado bajo el dosel vegetal. Además, la reflectividad que es captada por estos sensores no puede relacionarse con variables dasométricas como la altura de la vegetación, que es un parámetro imprescindible en la clasificación de tipos de combustible [7]. Este inconveniente puede ser solucionado con el uso de sensores activos LiDAR (*Light Detection And Ranging*) y SAR (*Synthetic*

Aperture Radar), que proporcionan información de la estructura vertical de la vegetación. Los estudios orientados a la cartografía de combustibles basados en técnicas de clasificación digital de imágenes han demostrado cómo la combinación de información proveniente de sensores pasivos y activos mejora los resultados que se obtienen con cada uno de estos tipos de datos separadamente [8,9].

En este contexto, el objetivo general de este trabajo es establecer una metodología operativa que permita identificar los tipos de combustible según el modelo *Prometheus* a partir de información óptica multiespectral, LiDAR y SAR, junto con trabajo de campo como apoyo al plan de prevención de incendios forestales del Centro de Adiestramiento "San Gregorio". Los objetivos específicos de este trabajo son: (1) determinar cuál es la mejor combinación de fuentes de información para identificar los combustibles; y (2) producir una cartografía digital de combustibles de alta resolución.

2. Materiales y Métodos

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio corresponde al Centro de Adiestramiento (CENAD) "San Gregorio" (Figura 1), que ocupa 33.839 ha en el sector central de la Depresión del Ebro (provincia de Zaragoza). Este territorio tiene un clima mediterráneo con rasgos continentales y ambiente semi-árido y unos suelos yesíferos pobres. Dominan los terrenos cubiertos por pastos de gramíneas y arbustos de hoja perenne de *Quercus coccifera* L., *Juniperus oxycedrus* L. subsp. macrocarpa (Sibth. y Sm.) Ball., y *Rosmarinus officinalis* L. Existen también masas arboladas de *Pinus halepensis* Mill. en el extremo norte y en rodales discontinuos de diverso tamaño siguiendo el límite este-sureste.

2.2. Datos de teledetección y trabajo de campo

Con respecto a los datos de teledetección, se manejaron tres tipos de informaciones (Tabla 1): i) una imagen multiespectral del satélite SPOT-5 proporcionada por el Plan Nacional de Teledetección (PNT); ii) las nubes de puntos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA); y iii) tres imágenes SAR captadas por los satélites ENVISAT-1 y ERS-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA).

Tipo de datos	Plataforma	Fecha de adquisición	Descripción y características
Imagen óptica multiespectral	Satélite SPOT-5	29-08-2010	Banda 1: Verde (0,50 - 0,59 µm) Banda 2: Rojo (0,61 - 0,68 µm) Banda 3: Infrarrojo cercano (0,78 - 0,89 µm) Banda 4: Infrarrojo medio (1,58 - 1,75 µm)
Nubes de puntos LiDAR	Escáner láser aeroportado Leica ALS60	23-01-2011 y 02-01-2011	Densidad nominal: 0,5 puntos/m^2. Hasta 4 retornos por pulso sin clasificar. Precisión altimétrica superior a 0,20 m.
3 imágenes SAR	Satélites ENVISAT-1 / ERS-2	29-01-2011 / 17-02-2011 09-12-2010	Banda C: 5,6 cm

Tabla 1. Descripción de los datos de teledetección utilizados en el estudio.

Entre julio y septiembre de 2014 se llevó a cabo una campaña de trabajo de campo con la finalidad de identificar *in situ* las siete tipologías de combustibles existentes según la clasificación de *Prometheus* (Tabla 2). Los datos fueron obtenidos en 108 parcelas de 15 m de radio (Figura 1), distribuidas mediante un muestreo aleatorio estratificado, tratando de lograr una muestra representativa de la variabilidad de la cobertura vegetal, su altura, la fracción de cabida cubierta y las pendientes topográficas de la zona de estudio. Las coordenadas del centro de cada parcela fueron tomadas con un GPS-GNSS modelo GS15 de Leica, alcanzando una precisión en planimetría de 0,33 m.

Tipo	Descripción del combustible y rangos de altura	Cobertura
T1	Pastizales agrícolas y vegetación herbácea.	Pasto >60%
T2	Pastizales y arbustos de 0,3-0,6 m con un 30-40% de herbáceas.	Matorral >60%; Arbolado <50%
T3	Arbustos de 0,6-2,0 m, así como árboles jóvenes resultantes de una regeneración natural o una reforestación.	
T4	Arbustos de 2,0-4,0 m y árboles regenerados.	
T5	Arbolado de más de 4 m sin sotobosque.	Arbolado >50%; Matorral <30%.
T6	Arbolado de más de 4 m con sotobosque donde la distancia de éste con la base del dosel arbóreo es superior a 0,5 m.	Arbolado >50%; Matorral >30%.
T7	Arbolado de más de 4 m con sotobosque alto y muy denso, donde la distancia de éste con la base del dosel arbóreo es inferior a 0,5 m.	

Tabla 2. Clasificación de tipos de combustible según *Prometheus*.

2.3. Procesamiento de las imágenes

En relación a las nubes de puntos LiDAR, fueron filtradas para separar los retornos del terreno del resto de información, utilizando el algoritmo de curvatura multiescala implementado en el software MCC 2.1 [10]. Los puntos clasificados como suelo fueron interpolados con el método "*Point-TIN-Raster*" para crear un modelo digital de elevaciones (MDE), con una resolución de 1 m, que permitiera normalizar la nube de puntos. Un conjunto de 29 métricas derivadas de los retornos láser, que presentan relación con la estructura forestal, fueron obtenidas utilizando el software FUSION LDV 3.30. Además, para lograr una mejor caracterización vertical de los combustibles, de acuerdo con Mutlu et al. [8], se generó una serie de bandas con información sobre el porcentaje de retornos LiDAR dentro de un rango específico de altura. Para la estimación de estos porcentajes se agruparon los puntos en las bandas que van de 0-0,5 m (BL1), 0,5-1 m (BL2), 1-2 m (BL3), 2-4 m (BL4), >4 m (BL5), 3-3,5 m (BL6), 3,5-4 m (BL7) y 1-4 m (BL8).

Por lo que respecta a la imagen óptica, fue procesada para obtener los valores de reflectividad y se calcularon los índices de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y NDII (*Normalized Difference Infrared Index*) [11]. Las imágenes SAR fueron georreferenciadas utilizando un MDE remuestreado a 20 m a partir de los MDEs de 5 m disponibles en el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Posteriormente, fueron calibradas radiométricamente de forma absoluta normalizando la retrodispersión con respecto a la unidad de superficie en la geometría terreno considerando el ángulo de incidencia local de cada píxel [11].

Finalmente, se adoptó un tamaño de píxel común de 10 m, dado que corresponde con la resolución original de la imagen óptica y se consideró adecuado por la disponibilidad de suficientes retornos láser para calcular las métricas y bandas LiDAR. Además, los valores de todas las bandas susceptibles de ser utilizadas en el proceso de clasificación fueron reescaladas de 0 a 100.

2.4. Selección de la muestra de entrenamiento-validación y de las bandas originales

A partir de la localización de los centroides de las parcelas de campo, con apoyo en las ortofotografías del PNOA, se seleccionó un total de 2314 píxeles a los que se asignó el tipo de combustible. Asimismo, se seleccionaron 392 píxeles correspondientes a suelo desnudo. Posteriormente, el 10 % de esta muestra inicial, 267 píxeles, se tomaron aleatoriamente para la fase de validación y el resto se utilizó en la fase de entrenamiento.

Con el objeto de seleccionar las bandas más idóneas para la clasificación digital de tipos de combustible, se aplicó la prueba estadística no paramétrica de contraste de *Kruskal-Wallis*, que es adecuada cuando no es posible asumir la normalidad de la muestra.

2.5. Combinación de datos y clasificación digital

Se utilizaron dos métodos de combinación de información antes de llevar a cabo la posterior fase de clasificación [8]: i) análisis de componentes principales (ACP); y ii) fracción de ruido mínimo (MNF). Estos métodos permiten reducir la dimensionalidad o el número de bandas originales, derivándose nuevos factores (bandas) que explican la mayor cantidad de la variabilidad existente en las originales.

En cuanto a la clasificación digital multiespectral, se utilizó el método paramétrico supervisado de máxima probabilidad empleando los píxeles de entrenamiento [11]. Finalmente, para verificar las imágenes clasificadas, se generaron las correspondientes matrices de confusión y porcentajes de acierto global (relación entre el número de píxeles correctamente asignados y el total), utilizando los píxeles de validación seleccionados previamente. Además se calculó el estadístico *kappa*, que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar [11].

3. Resultados y Discusión

Como se puede observar en la Tabla 3, las mejores bandas según el análisis *Kruskal-Wallis* fueron: i) el índice NDVI, que proporciona información sobre la cantidad, estado y desarrollo de la vegetación; ii) las bandas ópticas originales de la imagen SPOT-5; iii) todas las bandas LiDAR (BL) a excepción de aquellas cuyos rangos van de 0,5-1 m (BL2) y 1-2 m (BL3); y iv) las métricas derivadas de la nube de puntos relacionadas con la elevación media del dosel vegetal, el valor del percentil 75, la varianza o variabilidad de las alturas de la vegetación y el porcentaje de primeros retornos sobre la altura media, que expresaría el grado de cobertura vegetal. Por otro lado, las imágenes SAR presentaron valores muy bajos de *Chi*-cuadrado en comparación con el resto de bandas de información.

Tras realizar diversas combinaciones de bandas, tanto originales como transformadas, se presentan en la Tabla 4 los mejores resultados obtenidos, los cuales ponen de manifiesto, a través de la fiabilidad global de la clasificación supervisada, que la combinación de bandas ópticas con bandas LiDAR supera la precisión alcanzada utilizando únicamente las bandas de SPOT-5.

Origen de la información	Bandas	*Chi*-cuadrado
Imagen óptica SPOT-5	NDVI	2000,8
Nube de puntos LiDAR	BL1	1993,1
	Elevación media de las alturas de los puntos (EM)	1993,0
	Percentil 75 (P_{75})	1974,9
	Varianza de las alturas de los puntos (V)	1949,2
Imagen óptica SPOT-5	Banda 4	1948,2
	Banda 2	1925,2
	Banda 1	1854,4
Nube de puntos LiDAR	BL5	1731,9
	BL8	1595,1
	BL4	1570,9
	BL7	1363,8
Imagen óptica SPOT-5	Banda 3	1318,6
Nube de puntos LiDAR	BL6	1317,7
	Porcentaje de primeros retornos sobre la altura media (%Ret)	1316,4
Imagen SAR ENVISAT-1	29-01-2011	441,5

Tabla 3. Selección de las mejores bandas de acuerdo con los valores de *Chi*-cuadrado resultantes de la prueba de *Kruskal-Wallis* con un nivel de significación estadística *P-valor* ≤ 0,01.

Los resultados obtenidos están en la línea de los de otros autores [8,9], demostrando la idoneidad de la metodología aplicada para identificar tipos de combustible. Por otro lado, los métodos de reducción (ACP y MNF) no lograron superar el nivel de acierto alcanzado por el multibanda integrado por las bandas originales de SPOT-5, las bandas y métricas LiDAR (BL1,4,5,6,7,8; EM, P_{75}, V, %Ret) y el NDVI. La fiabilidad global de la clasificación fue del 72,7%, mientras que por tipo de combustible los porcentajes de acierto fueron: T1 75,0%, T2 70,0%, T3 50,0%, T4 88,9%, T5 71,4%, T6 55,6%, y T7 75,9%. El combustible T3 tiende a confundirse con el T2, al igual que ocurre entre el T6 y el T5. Esto puede ser debido a la baja densidad de puntos LiDAR, en comparación con estudios previos, que impide caracterizar con precisión las formaciones vegetales de menor porte (diferencias entre combustibles T2 y T3), e influye en la capacidad de penetración a través del dosel para detectar la presencia de sotobosque (diferencias entre combustibles T5 y T6).

Multibanda	Acierto global	*k*
Bandas SPOT-5	59,2 %	0,5
Bandas SPOT-5 + NDVI + BL1,4,5,6,7,8 + EM, P_{75}, V, %Ret	72,7 %	0,7
ACP componentes 1 a 9 (bandas SPOT-5 + NDVI + BL1,4,5,6,7,8 + EM, P_{75}, V, %Ret)	61,4 %	0,6
MNF componentes 1 a 8 (bandas SPOT-5 + BL1,4,5,6,7,8+ EM, P_{75}, V, %Ret) + NDVI	72,3 %	0,7

Tabla 4. Comparación de los mejores resultados derivados de la clasificación digital. Coeficiente *kappa* (*k*) con un nivel de significación estadística *P-valor*≤ 0,01.

En la Figura 1 se muestra el mapa resultante de la clasificación supervisada. Si se analiza con detalle, existen píxeles localizados en zonas de escarpe y barrancos encajados (sector suroeste del mapa) que, siendo en la realidad combustible T1 o T2, han sido clasificados como combustibles con más de un 50% de arbolado. Este efecto, susceptible de ser analizado con más detalle en el futuro,

parece producirse como consecuencia de los cambios bruscos de gradiente topográfico, que afectan tanto a la precisión de la nube de puntos, como a la respuesta espectral captada por el sensor.

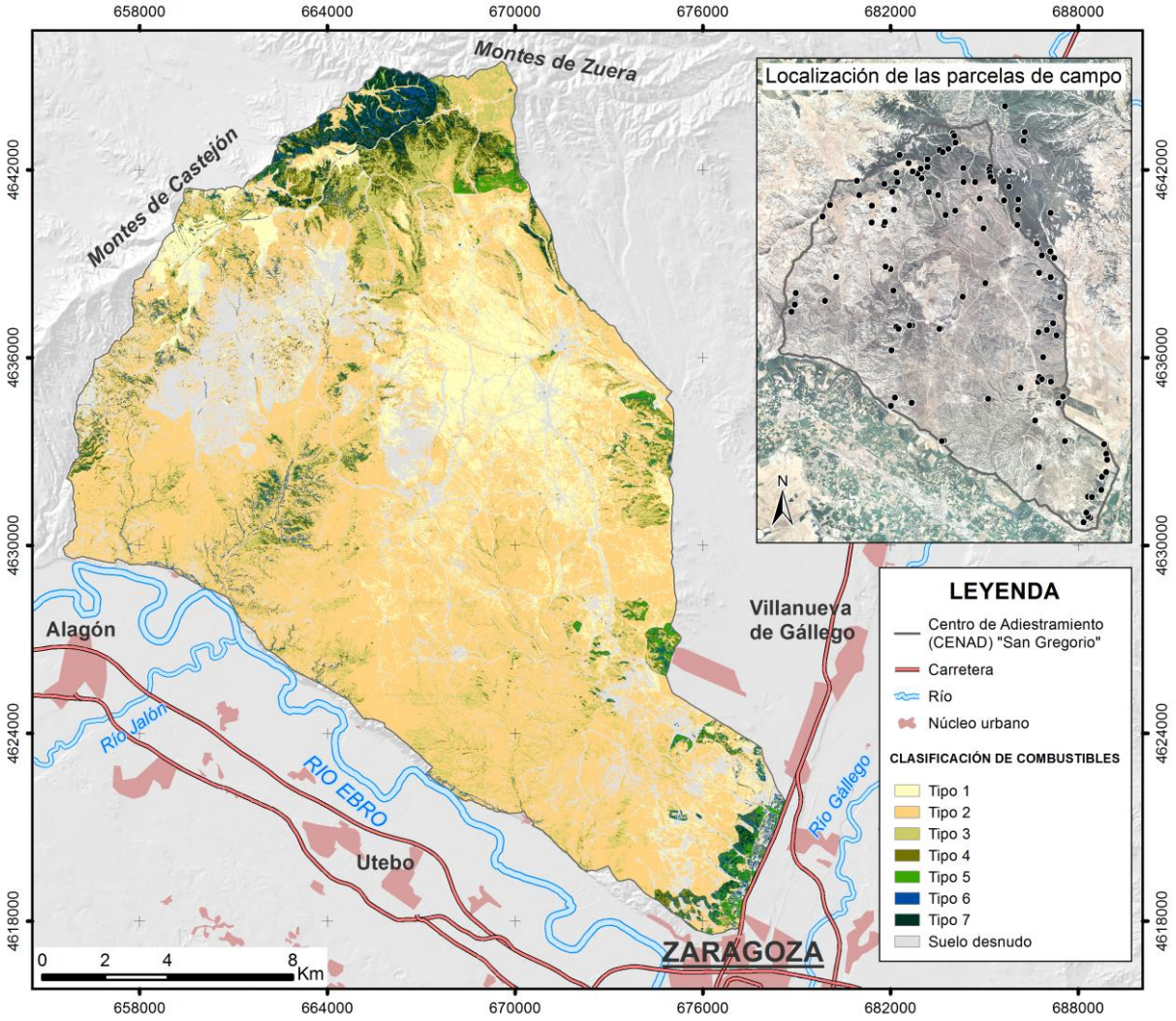


Figura 1. Mapa de combustibles del CENAD "San Gregorio".

4. Conclusiones

Este estudio demuestra cómo se puede mejorar la clasificación de combustibles combinando datos de teledetección pasiva y activa. La fiabilidad global de la cartografía presentada es aceptable, aunque es necesario seguir investigando sobre la incorporación de imágenes ópticas de mayor resolución o nuevas informaciones, por ejemplo relacionadas con la topografía de la superficie, con objeto de corregir los problemas derivados de una mala identificación del combustible en zonas de grandes cambios de pendiente. Asimismo, existen otros métodos de clasificación más novedosos, tales como los árboles de decisión (*random forest*) que pueden mejorar estos resultados. La obtención de una cartografía digital de alta resolución (10 m) de modelos de combustible permite su utilización en simuladores de incendio, facilitando en gran medida las posibles tareas de extinción y prevención en el CENAD.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto de Investigación del Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza (Proyecto Nº 2013-04) y la beca predoctoral (FPI BOA 30, 11/02/2011) del Gobierno de Aragón. Los autores agradecen al CNIG y al Centro de Información Territorial de Aragón por facilitar los datos LiDAR-PNOA y las imágenes SPOT-5, así como a la ESA por proporcionar los datos SAR (Proyecto Nº 18850). Asimismo agradecen al CENAD "San Gregorio" su inestimable asistencia en los trabajos de campo.

Referencias

1. Montealegre, A.L.; Lamelas, M.T.; Tanase, M.; de la Riva, J. Forest Fire Severity Assessment Using ALS Data in a Mediterranean Environment. *Remote Sensing* **2014**, *6*, 4240-4265.
2. Ministerio de Defensa. Directiva 42/2010, de 12 de julio, de la Ministra de Defensa para la prevención y extinción de incendios forestales en los campos de maniobras y tiro. Disponible en: http://www.defensa.gob.es/Galerias/areasTematicas/medioAmbiente/fichero/DGN-Directiva-42-sobre-Incendios-Forestales.pdf (consultado 6 julio 2015).
3. BOE. Ley 21/2015, de 20 de julio, por la que se modifica la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes. Boletín Oficial del Estado, 21 de julio de 2015, núm. 173, pp. 60234-60272.
4. Ramírez, J.; Blanco, J.; Cerrillo, A.; Marqués, G.; Valcarce, R.; Llordén, J.M.. Generación de cartografía de modelos de combustible a partir de datos LiDAR y análisis de imágenes orientado a objetos para su integración en Wildfire Analyst. En *Montes: Servicios y desarrollo rural. 6º Congreso Forestal Español*; Sociedad Española de ciencias forestales: Vitoria-Gasteiz, España, 2013; pp. 2–14.
5. Rothermel, R.C. A mathematical model for fire spread predictions in wildland fires. *USDA Forest Service Research Paper* **1972**, *INT-115*, 1-40.
6. PROMETHEUS S.V. Project. 2000. Management techniques for optimization of suppression and minimization of wildfire effects.
7. Riaño, D.; Chuvieco, E.; Salas, J.; Palacios-Orueta, A.; Bastarrika, A. Generation of fuel map type from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Resources* **2002**, *32*, 1301-1315.
8. Mutlu, M.; Popescu, S.C.; Stripling, C.; Spencer, T. Mapping surface fuel models using lidar data and multispectral data fusion for fire behavior. *Remote Sensing of Environment* **2008**, 112, 274-285.
9. Jakubowski, M.K.; Guo Q.; Collins, B.; Stephens, S.; Kelly, M. Predicting surface fuel models and fuel metrics using Lidar and CIR imagery in a dense, mountainous forest. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **2013**, *79*, 37–49.
10. Montealegre, A.L.; Lamelas, M.T.; de la Riva, J. A comparison of open source LiDAR filtering algorithms in a Mediterranean forest environment. *IEEE Trans. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens*. **2015**. En prensa doi:10.1109/JSTARS.2015.2436974.
11. Chuvieco, E. *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*; Ariel: Barcelona, España, 2010; p. 592.

Evaluación de la prioridad de actuación en espacios de la Red Natura 2000 gestionados por el Ministerio de Defensa mediante la combinación GIS-MCDM. Caso de estudio en la comarca Cartagena-Mar Menor

Sánchez-Lozano, Juan Miguel[1,*] Bernal Conesa, Juan Andrés[2], De Nieves Nieto, Carmen[3] y Roca-González, José Luis[4]

[1] Departamento de Ciencias e Informática, Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), C/ Coronel López Peña,s/n, 30720, Santiago de la Ribera, Murcia, SPAIN. Email: juanmi.sanchez@cud.upct.es

[2] Departamento de Ciencias Económicas y Jurídicas, Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), C/ Coronel López Peña,s/n, 30720, Santiago de la Ribera, Murcia, SPAIN. Email: jandres.bernal@cud.upct.es

[3] Departamento de Ciencias Económicas y Jurídicas, Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), C/ Coronel López Peña,s/n, 30720, Santiago de la Ribera, Murcia, SPAIN. Email: carmen.denieves@upct.es

[4] Departamento de Ingeniería y Técnicas Aplicadas, Centro Universitario de la Defensa (CUD) de San Javier, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), C/ Coronel López Peña,s/n, 30720, Santiago de la Ribera, Murcia, SPAIN. Email: jluis.roca@cud.upct.es

***** Autor Principal y responsable del trabajo; E-Mail: juanmi.sanchez@cud.upct.es;

Abstract:

La profesionalización de las Fuerzas Armadas (FFAA) y su vínculo con las organizaciones políticas y sociales ha motivado un acercamiento hacia los ciudadanos, por ello el Ministerio de Defensa (MINISDEF)se ha sumado a la corriente de la Responsabilidad Social Corporativa (RSC). Más de la cuarta parte del patrimonio natural adscrito al MINISDEF pertenece a la Red Natura 2000 ya sea clasificado como LICs (Lugares de Importancia Comunitaria) y/o ZEPAs (Zonas de Especial Protección para Aves), así que efectuar un análisis en profundidad en estas zonas con el objetivo de realizar actuaciones medioambientales es de notable interés. Por todo ello, en el presente trabajo se propone combinar los GIS (Geographical Information Systems) con métodos MCDM (Multi-Criteria Decision Making) con la finalidad de evaluar y priorizar actuaciones medioambientales en dichas localizaciones. Para obtener el peso de los criterios que influyen en la decisión (accesibilidad, orografía, etc.) se recurrirá al método AHP (Analytic Hierarchy Process), mientras que las diferentes localizaciones objeto de análisis se evaluarán mediante el método TOPSIS (Technique for Order of

Preference by Similarity to Ideal Solution). La zona de estudio escogida para abordar este análisis es la Comarca Cartagena-Mar Menor situada en la Región de Murcia.

Keywords: Actuación Medioambiental; Geographical Information Systems(GIS); Multi-Criteria Decision Making (MCDM); Analytic Hierarchy Process(AHP); Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

1. Introducción

La política ambiental europea hace cada día más hincapié en la necesidad de integrar el medio ambiente en el conjunto de las políticas públicas. En este sentido el Ministerio de Defensa (MINISDEF) ha realizado un gran esfuerzo en plasmar y llevar a cabo esa necesidad. De hecho, la inquietud del MINISDEF en materia de medio ambiente data de la década de los 80 [1]. Estos primeros contactos con el entorno del medio ambiente sirvieron de base para elaborar, de forma pionera en el sector público, una política ambiental sólida y eficaz, plasmada en la Directiva 107/1997 del MINISDEF, que ha permitido que germine en el ámbito de las Fuerzas Armadas un compromiso firme y decidido de respeto y cuidado del medio ambiente [2].

El 27% del patrimonio natural adscrito al MINISDEF pertenece a la Red Natura 2000 [3]. El MINISDEF dispone de 140.000 hectáreas, en las que viven 275 especies amenazadas, de las cuales 20 están en peligro de extinción, 5 son sensibles a la alteración de su hábitat, 22 son vulnerables y 228 de especial interés. Por tanto, efectuar un análisis en profundidad en estas zonas con el objetivo de priorizar actuaciones medioambientales es de notable interés.

Es obvio que herramientas informáticas de representación espacial como los GIS (Geographical Information Systems) permiten facilitar esta tarea, localizando y seleccionando las zonas de actuación. No obstante la principal habilidad de los GIS es la facilidad para combinarlos con herramientas de decisión multicriterio con la finalidad de resolver problemas complejos de decisión [4, 5].

Por todo ello, en el presente estudio se propone combinar un GIS con métodos MCDM (Multi-Criteria Decision Making) con la finalidad de evaluar alternativas (en este caso concreto priorizar actuaciones medioambientales). Este problema de decisión será resuelto aplicando el método AHP (Analytic Hierarchy Process) para obtener el peso de los criterios que influyen en la decisión y el método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) para evaluar o priorizar las diferentes alternativas. La zona de estudio en este análisis será la Región de Murcia, concretamente la Comarca Cartagena-Mar Menor.

El presente artículo se estructura de la forma siguiente; en la sección 2 se definirá la zona de estudio y las metodologías utilizadas (herramientas GIS y métodos MCDM) para resolver el problema de decisión planteado. En la sección 3 se mostrarán los resultados obtenidos y finalmente, la sección 4 indicará las conclusiones alcanzadas tras este estudio.

2. Evaluación de la prioridad de actuación en espacios de la Red Natura 2000 gestionados por el Ministerio de Defensa mediante la combinación GIS-MCDM.

2.1. Zona de estudio: Comarca Cartagena-Mar Menor

La comarca Cartagena-Mar Menor está situada en el sector suroriental de la Comunidad Autónoma de Murcia, dicha comarca está compuesta por siete municipios (Cartagena, Fuente-Álamo, Torre-Pacheco, La Unión, Los Alcázares, San Javier y San Pedro del Pinatar) abarcando una extensión de 1.163,2 km^2. En dicho territorio coexisten espacios protegidos clasificados según la Red Natura 2000 como Lugares de Importancia Comunitaria (LICs) y/o Zonas de Especial Protección para Aves (ZEPAs). Cinco de dichos espacios pertenecen al MINISDEF y serán precisamente éstos los que constituirán las alternativas a priorizar para realizar actuaciones ambientales (figura 1).

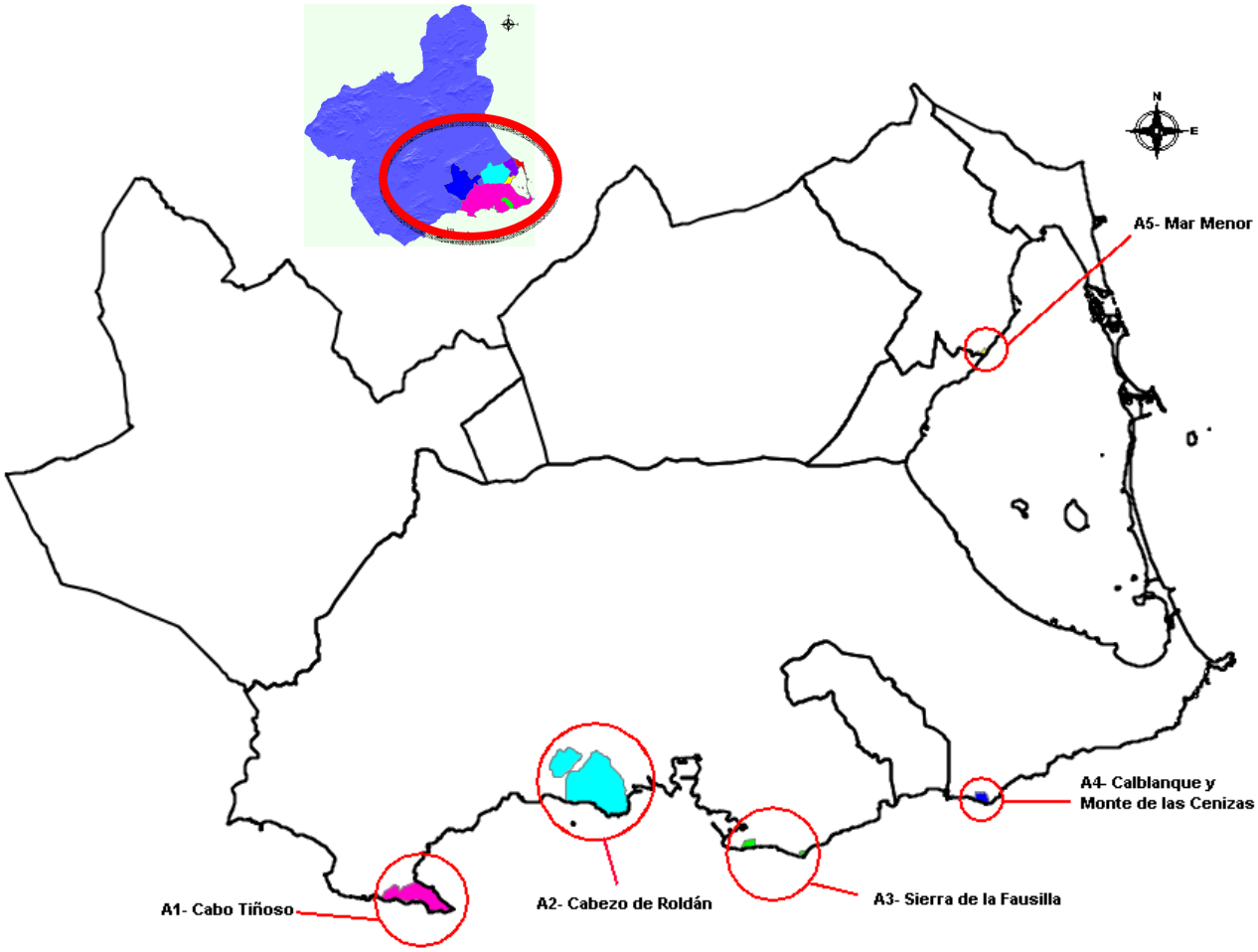


Figura 1. Alternativas a evaluar (zonas del MINISDEF definidas como LICs y/o ZEPAs)

2.2 Metodología

2.2.1. Las herramientas GIS

Los GIS son herramientas informáticas de visualización espacial que permiten representar la realidad de forma digital. Son capaces de editar y generar colecciones de datos georreferenciados que actúan como modelo de la realidad, tales datos, al introducirlos en un GIS reciben el nombre de capas

temáticas [6]. Para abordar el problema propuesto se recurrirá al uso de un GIS denominado gvSIG, en él se introducirán las capas temáticas de los criterios (consensuados previamente a través de un grupo de expertos) que influyen en el proceso de priorización de alternativas. Las capas temáticas de criterios (figura 2) se han obtenido a través de servidores de cartografía de ámbito nacional y autonómico; a nivel autonómico los organismos y servidores de cartografía digital han sido la Dirección General del Medio Ambiente (Criterios 1, 6 y 7), la Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio (Criterios 2, 3 y 4) y la Consejería de Agua, Agricultura y Medioambiente (Criterios 9 y 10) de la Región de Murcia. El criterio restante (criterio 5) se ha obtenido a través de los Modelos Digitales del Terreno (MDT) del Instituto Geográfico Nacional. Exceptuando la capa temática de este último criterio, la cual presenta formato tipo ráster (imagen georreferenciada), el resto presentan formato vectorial o shapefile (SHP).

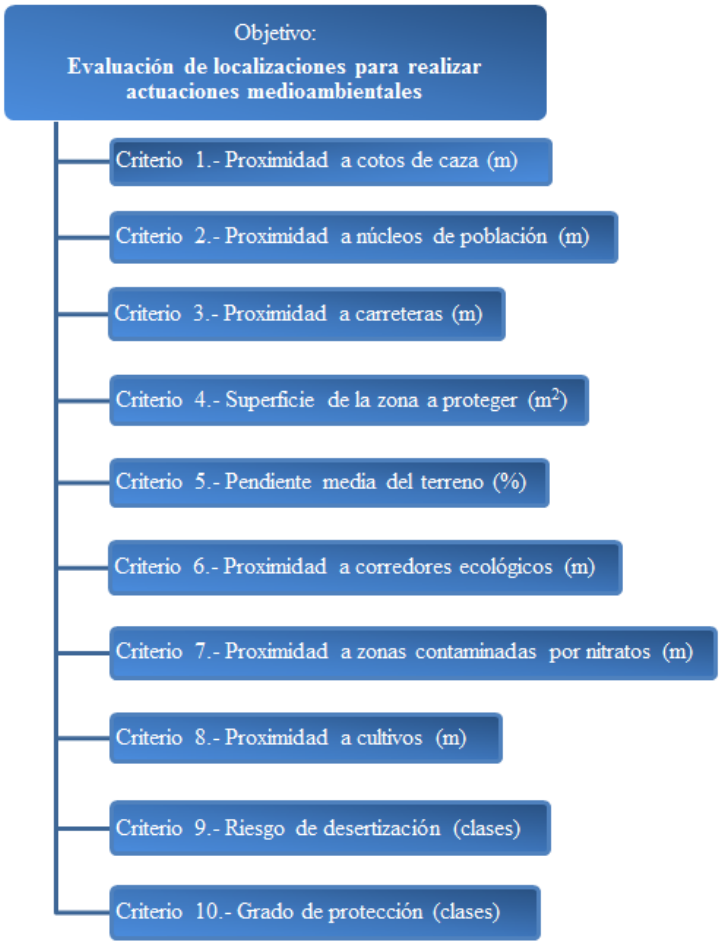


Figura 2. Árbol de criterios para priorizar actuaciones medioambientales

Una vez obtenida la información cartográfica digital en forma de capas temáticas, resulta necesario llevar a cabo labores de edición con el objetivo de obtener una capa temática global que contenga las alternativas objeto a evaluar junto con la totalidad de criterios que influyen en la decisión. El punto de partida será la capa temática inicial que contiene las propiedades del MINISDEF que pertenecen a la Red Natura 2000 (figura 1), partiendo de dicha capa se realizarán operaciones de edición con gvSIG

con el resto de capas temáticas con el objetivo de crear la capa temática global. A continuación se describen los comandos utilizados de gvSIG para tal finalidad:

- "Geoproceso Enlace Espacial": Se aplicará este comando para enlazar la capa inicial de alternativas con las capas de proximidad (criterios 1, 2, 3, 6, 7 y 8) con el objetivo de obtener las distancias en metros (m) de cada alternativa a cada uno de los criterios.
- "Pendiente" del módulo de Sextante de gvSIG: Este comando permitirá obtener el criterio 5 (pendiente media del terreno en %) partiendo de la capa temática ráster de MDT.
- "Estadísticas de Grid en polígonos" del módulo de Sextante de gvSIG: Este comando enlazará la capa ráster de pendiente previamente generada (criterio 5) con la capa temática inicial, de esta forma se obtendrá la pendiente media del terreno (%) para cada alternativa.
- "Agregar Información Geográfica" de gvSIG: Permitirá añadir a la capa temática inicial el área (m^2) de cada una de las alternativas.
- "Geoproceso Intersección": Este comando enlazará la capa temática inicial con las capas temáticas de los criterios 9 y 10. De esta forma, la capa temática global reflejará las clases de riesgo de desertización (1-3) y grado de protección (1-10) para cada alternativa.

2.2.2. El método AHP (Analytic Hierarchy Process)

El método AHP, desarrollado por Thomas L. Saaty [7], se diseñó para resolver problemas complejos de decisión multicriterio, es un método MCDM basado en la obtención de preferencias o pesos de importancia para los criterios que intervienen en la decisión. Para ello, el decisor establece "juicios de valores" a través de la escala numérica de Saaty (del 1 al 9) comparando por parejas tanto los criterios como, en el caso que las haya, las diferentes alternativas. AHP se centra principalmente en tres características: la construcción de una estructura jerárquica, el establecimiento de una comparación por pares de elementos en cada nivel de la jerarquía respecto a cada criterio en el nivel anterior y finalmente, la sintetización de juicios sobre los diferentes niveles de la jerarquía.

En el caso de estudio propuesto se recurrirá al uso de esta metodología para obtener los pesos de los criterios que influyen en la decisión. La extracción del conocimiento será realizada a través de un cuestionario proporcionado a un grupo de expertos de la Consejería de Agua, Agricultura y Medioambiente de la Región de Murcia.

2.2.3. El Método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

El método TOPSIS fue desarrollado por Hwang y Yoon en 1981 [8]. El origen o punto de partida de este método consiste en buscar soluciones próximas a la solución positiva o ideal (PIS) y alejadas de la solución negativa o anti-ideal (NIS). Para resolver tal dilema, se construye un algoritmo (figura 3) en el que se definen las etapas a aplicar para la resolución del método TOPSIS.

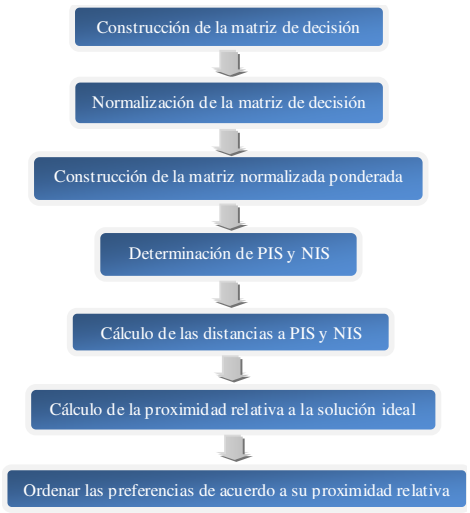


Figura 3. Algoritmo del método TOPSIS.

En el caso de estudio propuesto se aplicará el método TOPSIS con la finalidad de evaluar las alternativas es decir, las propiedades del MINISDEF clasificadas como LICs y/o ZEPAs, y de esta forma poder priorizar actuaciones medioambientales.

3. Resultados y Discusión

3.1. Matriz de decisión de alternativas y criterios

Ejecutando los comandos y herramientas GIS descritas en el apartado de metodología se obtendrá una capa temática global de apariencia física idéntica a la figura 1, sin embargo presentará una gran diferencia, en la misma se habrá generado una base de datos en forma de tabla de atributos (tabla 1) que constituirá la matriz de decisión de alternativas y criterios.

Alternativas	***Criterios***									
	C_1 *(m)*	C_2 *(m)*	C_3 *(m)*	C_4 *(m^2)*	C_5 *(%)*	C_6 *(m)*	C_7 *(m)*	C_8 *(m)*	C_9 *(clases)*	C_{10} *(clases)*
A_1	956.38	2106.13	4502.34	2370074.43	68.81	8196.77	13707.69	5312.92	3.00	6.33
A_2	1534.49	171.83	1609.84	13332993.86	40.88	2946.03	3574.01	0.00	2.00	7.67
A_3	2693.35	80.00	456.12	424207.96	59.47	910.00	5041.76	5061.42	1.00	6.33
A_4	145.33	1099.53	1085.33	364036.04	77.77	975.93	4770.45	1597.82	1.00	7.67
A_5	3318.93	917.11	0.00	143392.51	1.06	14195.37	0.00	302.88	2.00	5.67

Tabla 1. Matriz de decisión.

3.2. Pesos de los criterios

Tras aplicar la metodología AHP, comprobando además el índice de consistencia de los juicios proporcionados por cada uno de los expertos, y realizar una agregación homogénea para que todos los expertos tengan el mismo peso en la decisión, se obtendrá el vector de pesos o coeficiente de importancia de cada uno de los criterios mencionados (tabla 2).

Criterios	***Pesos (%)***	***Orden Prioridad***
C_1	4.30	10
C_2	19.75	1
C_3	12.28	4
C_4	6.80	7
C_5	5.93	8
C_6	7.63	6
C_7	4.33	9
C_8	13.53	3
C_9	10.86	5
C_{10}	14.59	2

Tabla 2. Pesos y orden de prioridad de criterios.

Analizando la tabla anterior se observa que según los expertos, los criterios que presentan una mayor importancia son los criterios C_2 (proximidad a núcleos de población), C_{10} (grado de protección), C_8 (proximidad a cultivos) y C_3 (proximidad a carreteras). Por el contrario los que tienen un menor peso son los criterios C_1 y C_7 (proximidad a cotos de caza y a zonas contaminadas por nitratos respectivamente).

3.3. Ranking de alternativas

El método TOPSIS proporciona una ordenación de las alternativas de acuerdo a su proximidad relativa (figura 3) de forma que, mediante dicha metodología de decisión se podrá obtener un Ranking de alternativas (tabla 3)

Alternativas	***Ranking***
A_1(LIC Cabo Tiñoso)	0.925
A_2(LIC Cabezo de Roldán)	2.042
A_3(LIC Sierra de la Fausilla)	1.897
A_4(LIC Calblanque y Monte de las Cenizas)	1.782
A_5(LIC Mar Menor)	2.173

Tabla 3. Ranking obtenido en el método TOPSIS.

Analizando los resultados obtenidos se observa que la alternativa que habría que priorizar para abordar una actuación medioambiental es la alternativa A_5 que corresponde con el LIC del Mar Menor. La justificación a dicha necesidad se encuentra en su localización, esta alternativa está situada en una zona costera con un nivel de ocupación y desarrollo urbanístico muy elevado con el agravante además de estar emplazada en las proximidades de zonas cultivables, motivo por el cual es más propensa a estar expuesta a amenazas (usos de productos fitosanitarios, etc.). Por el contrario, la zona propiedad del MINISDEFen la que no resulta prioritario realizar actuaciones medioambientales es el LIC de Cabo Tiñoso (alternativa A_1). La explicación a dicho resultado podemos encontrarla en la difícil accesibilidad a dicha zona, provocando por tanto una menor exposición a peligros o amenazas.

4. Conclusiones

Tras el estudio realizado se ha comprobado que la combinación GIS con métodos MCDM tales como TOPSIS y AHP, permite resolver problemas complejos de localización como el propuesto en el presente artículo. Mientras que el GIS proporciona la base de datos en forma de matriz de decisión de alternativas y criterios, los métodos multicriterio permiten evaluar o priorizar las potenciales alternativas (propiedades del MINISDEF clasificadas como LICs y/o ZEPAs)

En el caso particular propuesto se han alcanzado diferentes conclusiones. En relación a las zonas que habría que priorizar para realizar actuaciones medioambientales, la zona con mayor prioridad corresponde con la zona del LIC Mar Menor. Por el contrario la zona que ofrece menor prioridad para realizar actuaciones medioambientales corresponde con el LIC de Cabo Tiñoso.

Respecto a la metodología aplicada es destacable mencionar que, llevando a cabo la extracción del conocimiento a partir de un grupo de expertos en el ámbito medioambiental, ha sido posible aplicar herramientas de decisión cuyo uso está ampliamente extendido en la actualidad con la finalidad de realizar una priorización de alternativas.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración desinteresada de los Técnicos de la Consejería de Agua, Agricultura y Medioambiente de la Región de Murcia.

Referencias

1. Bernal Conesa, J.A.; de Nieves Nieto, C.; Briones Peñalver, A.J. Implantación de la Responsabilidad Social en la Administración Pública: el caso de las Fuerzas Armadas Españolas, *Revista de Responsabilidad Social de la Empresa* **2014**, *18-III*, 101–124.
2. Ministerio de Defensa, *Plan General de Medio Ambiente 2007-2021*. **2006**. Madrid. Gobierno de España.
3. Coord, M.; Bernardos, S.H. *La red Natura 2000 en el Ministerio de Defensa.* Ministerio de Defensa, **2009**. Madrid. Gobierno de España.
4. Sánchez-Lozano, J.M.; Teruel-Solano, J.; Soto-Elvira, P.L.; García-Cascales, M.S. Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews***2013**, 24, 544–556.
5. Sánchez-Lozano, J.M.; García-Cascales, M.S.; Lamata, M.T. Identification and selection of potential sites for onshore wind farms development in Region of Murcia, Spain. *Energy***2014**, 73, 311-324.
6. Aronoff, S. *Geographic Information System: A management perspective*. WDL Publications, Otawa, Canada, 1989.
7. Saaty, T.L. *The Analytic Hierarchy Process*.McGraw-Hill, New York, USA.
8. Hwang, C.L.; Yoon, K. *Multiple Attribute Decision Methods and Applications*. Berlin Heidelberg ed: Springer, Berlin, 1981.

Apuntes Sobre La Acción Exterior de las Fuerzas Armadas Desde La Perspectiva Jurídica Nacional

Álvarez Rodríguez, Ignacio [1]

[1] Profesor Contratado-Doctor. Centro Universitario de la Defensa de San Javier-Academia General del Aire. MDE-UPCT. Email: ignacio.alvarez@cud.upct.es

Abstract: La presente contribución pretende realizar un repaso por las principales reglas que se establecen en nuestro ordenamiento jurídico respecto de la actuación de las Fuerzas Armadas cuando cumplen las misiones internacionales que se les encomiendan por quien tiene competencia para ello.

Keywords: Acción Exterior, Fuerzas Armadas; Derecho.

1. Introducción

Nuestro ordenamiento jurídico establece ciertas reglas en lo que hace a la Acción Exterior de las FAS[1]. El objetivo de estas líneas es, sin pretender agotar la extensión y complejidad de la materia –extremo que se trata en otros lugares doctrinales con toda solvencia[2]- repasar las mismas para clarificar qué

[1] Las Abreviaturas que se van a utilizar serán las siguientes: Constitución Española (CE). Directiva de Defensa Nacional, de 1 de julio de 2012 (DDN). Estrategia de Seguridad Nacional, de 31 de mayo de 2013 (ESN). Fuerzas Armadas Españolas (FAS). Ley 2/204, de 25 de marzo, de la Acción y del Servicio Exterior del Estado (LAESE). Ley Orgánica 8/2014, de 4 de diciembre, de Régimen Disciplinario de las Fuerzas Armadas (LORDFAS). Ley Orgánica 5/2005, de 17 de noviembre, de la Defensa Nacional (LODN). Ley Orgánica 9/2011, de 27 de julio, de Derechos y Deberes de los Miembros de las Fuerzas Armadas (LODDMFAS). Ley 39/2007, de 19 de noviembre, de la Carrera Militar (LCM). Ley Orgánica 13/1985, de 9 de diciembre, del Código Penal Militar (CPM). Real Decreto 96/2009, de 6 de febrero, por el que se aprueban las Reales Ordenanzas para las Fuerzas Armadas (RROO).

[2] A título de ejemplo, véase el *Handbook on United Nations Multidimensional Peacekeeping Operations*, Department of Peacekeeping Operations-United Nations, New York, 2003; BERMEJO GARCÍA, R; y LÓPEZ JACOISTE DÍAZ, E; "Las Operaciones de Mantenimiento de la Paz de las Naciones Unidas: aspectos generales". En SEPÚLVEDA, I (ed.): *España en las operaciones internacionales de pacificación*. Instituto Universitario General Gutiérrez Mellado-UNED, Madrid, 2009, pp. 31-51; DOLÓN PAYÁN, A; "Alianzas Estratégicas entre Organizaciones Internacionales para Operaciones de Mantenimiento de Paz: Misión de Naciones Unidas para Guatemala (MINUGUA)". En SERNA SERRANO, J; RODRÍGUEZ BERMÚDEZ, G; y GARCÍA LAENCINA, P; *Las Tecnologías de Doble Uso: La Contribución de la I+D en Defensa al crecimiento económico, industrial y social*, Edelvives-CUD de San Javier, 2015, en prensa; LOZANO CONTRERAS, F; "Breve análisis de las Operaciones de Mantenimiento de la Paz a la luz del Derecho Internacional vigente". En SEPÚLVEDA, I (ed.): *España en las operaciones internacionales de pacificación*. Instituto Universitario General Gutiérrez Mellado-UNED, Madrid, 2009, pp. 53-80; y DÍAZ BARRADO, C.M; y VACAS FERNÁNDEZ, F; "Fundamentos jurídicos y condiciones para el ejercicio de las operaciones de mantenimiento de la paz de Naciones

exige este de los soldados españoles que se encuentran cumpliendo las misiones internacionales correspondientes, en un marco geopolítico ciertamente complicado[3].

2. Normativa sobre Acción Exterior

La tradicional unión entre los Ejércitos y la política exterior es un hecho constante desde hace varios lustros[4]. Diversos factores internos y externos han coadyuvado para que los Estados modernos, cada vez más integrados en diferentes alianzas y organizaciones internacionales que les exigen amplios esfuerzos en materia de Defensa, hayan dedicado varias normas a regular la actividad militar extramuros de sus fronteras. Nuestro ordenamiento no es la excepción, existiendo diversas regulaciones en la materia.

De un lado tenemos la propia Constitución Española, cúspide del sistema normativo donde se establecen los mínimos constitucionales que sirven de soporte –y de límite- al resto de disposiciones[5]. Como tales mínimos se ven necesitados de concreción, en segundo lugar se presta atención al acervo legislativo, que regula con cierto detalle qué posición ocupan nuestras FAS en la arena internacional, así como las misiones que cumplen y las operaciones necesarias para su desempeño. Nos referimos a la LAESE, la LODN, la LODDMFAS, a la LORDFAS, y, aunque de menor importancia en esta materia, a la LCM, sin olvidar al CPM. El Reglamento es la tercera fuente a la que hay que prestar atención; principalmente, a las RROO, compendio de valores que todo militar debe observar.

2.1. En la Constitución

La CE no regula con especial detalle las acciones exteriores que las FAS pueden y deben acometer.

A pesar de ello, su letra establece algunas líneas maestras. Ya en el Preámbulo dice que la Nación española proclama su voluntad de "(…) colaborar en el fortalecimiento de unas relaciones pacíficas y de eficaz cooperación entre todos los pueblos de la Tierra (…)". Sucede que en ocasiones las relaciones pacíficas no pueden cimentarse sin unos mínimos de seguridad y estabilidad. Es sabido que una de las principales instituciones que cumple tal misión, desde la óptica internacional, son las propias FAS.

Unidas", *Anuario de Derecho Internacional*, nº 21, 2005, pp. 273-316; y FELIU ORTEGA, F; *Las Misiones de las Fuerzas Armadas Españolas en el Exterior*, Foro de la Sociedad Civil, Madrid, 2010.

[3] Así lo reconocen tanto la DDN y ESN, sendos ejemplos de comunicación a la sociedad de las líneas de la política de Defensa, centrada a su vez en conceptuar algo tan importante como la seguridad nacional, detectar los riesgos y amenazas para la seguridad nacional, y determinar las líneas de acción estratégicas a seguir. Vid. ARTEAGA, F; "La Directiva de Defensa Nacional 1/2012: tiempos de cambio para cambiar a tiempo"; *Anuario del Real Instituto Elcano*, nº 58, 2012, pp. 1-6 (Texto consultado el 20 de junio de 2015 aquí: http://www.realinstitutoelcano.org/wps/wcm/connect/ea30b7004c9b67e18460fe3f609095b4/ARI58-2012_Arteaga_Directiva_Defensa_Nacional_2012.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ea30b7004c9b67e18460fe3f609095b4). Véase, también, LIÑÁN NOGUERAS, D; y ROLDÁN BARBERO, J (eds.): *El Estatuto Jurídico de las Fuerzas Armadas Españolas en el Exterior*, Plaza y Valdés, Madrid, 2008.

[4] Vid. MAIZIERE, Ulrich de: "El cometido de las fuerzas armadas en la política exterior", *Boletín de Información del CESEDEN*, nº 126-VI, 1979, pp. 1-18; para el caso específicamente español así lo observa SERRA, E; "La modernización de las Fuerzas Armadas", *Arbor Ciencia, Pensamiento y Cultura*, 2014, vol. 190-765, pp. 1-6.

[5] España tiene sin duda la obligación de trasponer e incorporar normativa internacional de obligatorio cumplimiento internacional (por ejemplo Directivas y Reglamentos de la UE), que ocasionaron, al menos una vez, la reforma de aquélla (el artículo 13.2 CE, cambio llevado a cabo en 1992).

Después figura el siempre polémico artículo 8, al que la doctrina le ha dedicado amplios esfuerzos para concluir que del mismo no puede derivarse un poder militar autónomo separado del civil, sino todo lo contrario. Nuestras FAS cumplen puntualmente con lo que aquél ordena, dado que es quien tiene conferido constitucionalmente el poder de activarlas[6]. Cuestión diferente es que, como el sentido común impone, el poder político deba ser asesorado por los mandos de los Ejércitos, quienes no sólo son los expertos en el empleo profesional de las armas, sino también técnicos cualificados en las materias correspodientes[7].

El Gobierno es el órgano jurídico-político encargado de encomendar cualesquiera misiones nacionales o internacionales a aquélla, atribuyéndole aquélla la dirección de "la política interior y exterior, la Administración civil y militar y la defensa del Estado" (artículo 97 CE), sin olvidar que es el propio Estado el que "tiene competencia exclusiva sobre las siguientes materias: (…) 3ª: Relaciones Internacionales. 4ª Defensa y Fuerzas Armadas (…)" (artículo 149.1.4ª CE).

De lo anterior se deduce que cualquier regulación legal que se haga sobre la materia debe respetar tales parámetros, sopena de incurrir en inconstitucionalidad. Pero también se deduce que, como sucede en toda democracia, el margen de acción del Parlamento es sumamente amplio a la hora de abordar el particular. Se decía antes y se recuerda ahora que los preceptos constitucionales necesitan de concreción legislativa; la materia que nos ocupa no es la excepción[8].

2.2. En las Leyes

En lo que hace al acervo legal, la LAESE ha operado cambios de calado en la materia. Tal cuerpo legislativo pretende que la actuación internacional de nuestros soldados siga unos parámetros ordenados y de conjunto.

Lo primero que debe decirse es que dicha norma no hace sino reiterar lo que arriba se dijo, estableciendo que "el Gobierno acordará la participación de las Fuerzas Armadas en misiones internacionales, como parte del esfuerzo concertado en la Acción Exterior del Estado, con arreglo a los requisitos y procedimientos establecidos por la Ley Orgánica 5/2005, de 17 de noviembre, de la Defensa Nacional" (artículo 2.2 LAESE).

El segundo aspecto a resaltar es que la ley destaca que las FAS "son un pilar básico en la Acción Exterior del Estado, (…) y promueven un entorno internacional de paz y seguridad" (artículo 8 LAESE). ¿Y qué conforma dicha Acción? "La ejecución de la Política Exterior en base a los principios de unidad de acción; lealtad institucional, coordinación y cooperación; planificación; eficiencia; eficacia y especialización; transparencia y servicio al interés general" (artículo 3 LAESE).

---

[6] La cuestión ha sido ampliamente debatida desde hace muchos años. Un resumen de la misma puede verse en ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, I; "Los Derechos Políticos de los Miembros de las Fuerzas Armadas a la luz del Principio de Neutralidad Política", *Revista Estudios de Deusto*, vol 62, nº 2, 2014, pp. 9-44.

[7] Para ello la LODN creó el Consejo de Defensa Nacional, órgano colegiado encargado de coordinar, asesorar y responder cualesquiera cuestiones que planteé el Presidente del Gobierno en materia de defensa (artículo 8 LODN).

[8] Legislación que llegó en buena medida gracias a la LODN, llenando un vacío sobre cuyas consecuencias ya habían reflexionado algunos constitucionalistas. Vid. ORTEGA SANTIAGO, C; "La dimensión constitucional de la guerra: Conflictos armados e intervenciones militares en el extranjero", *Documentos de Trabajo del Real Instituto Elcano*, nº 43, 2004, pp. 1-32 (el texto se ha leído aquí: http://www.realinstitutoelcano.org/wps/portal/rielcano/contenido?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/Elcano_es/Zonas_es/Defensa+y+Seguridad/DT43-2004, el 21 de junio de 2015).

Conviene no olvidar que dicha política también obedece, a su vez, a ciertos principios y objetivos insoslayables para todos los sujetos implicados.

Los principios generales que regirán toda actuación internacional serán "(…) el respeto a la dignidad humana, la libertad, la democracia, el Estado de Derecho y los derechos humanos (…)". Además, "(…) la Política Exterior de España defenderá y promoverá el respeto y desarrollo del derecho internacional, en particular el respeto de los principios de la Carta de las Naciones Unidas. Promoverá los proyectos de construcción europea y de la Comunidad Iberoamericana de Naciones, así como el multilateralismo en el seno de la comunidad internacional (…)" (artículo 2.1 LAESE).

Por su parte, los objetivos regulados por la norma se centran en "(…) el mantenimiento y promoción de la paz y la seguridad internacionales; el fomento de instituciones multilaterales fuertes y legítimas, la promoción y consolidación de sistemas políticos basados en el Estado de Derecho y en el respeto a los derechos fundamentales y las libertades públicas; la lucha contra la pobreza, la solidaridad con los países en vías de desarrollo y el desarrollo económico y social de todos los Estados; la defensa del medio ambiente y la protección de la biodiversidad, la lucha contra el cambio climático y la preocupación por la seguridad alimentaria; la eliminación de las armas de destrucción masiva y armas químicas y la asunción de un compromiso activo por un progresivo desarme a nivel mundial; la construcción de una Europa más integrada y más legítima ante sus ciudadanos, que se constituye como un actor global de referencia; el fortalecimiento de la Comunidad Iberoamericana de Naciones; la seguridad y bienestar de España y sus ciudadanos; la asistencia y protección a sus ciudadanos, así como la protección de los intereses económicos de España en el exterior; la promoción de los intereses económicos de España en el exterior" (artículo 2.1 LAESE).

Se decía antes que la norma que regula con cierto detenimiento la Defensa Nacional en general y las misiones nacionales e internacionales en particular es la LODN. Y lo hace, de nuevo, apostando por un decidido multilateralismo.

Por un lado, la norma establece que las FAS "contribuyen militarmente a la seguridad y defensa de sus aliados, en el marco de las organizaciones internacionales de las que España forma parte" (artículo 15). Por otro, su letra recoge las principales tareas que los Ejércitos de diferentes países vienen ejecutando desde hace lustros. Se alude a las misiones que tienen que ver con el mantenimiento de la paz; la garantía de la estabilidad; la ayuda humanitaria; y, en caso de necesidad, la evacuación de los residentes españoles en el extranjero cuando su vida y/o intereses se encuentren en grave riesgo (artículo 15, en relación con los artículos 16 y 19).

Para acometer las mismas, se establecen los tipos de operaciones pertinentes. Estas pueden ser clasificadas en generales y particulares.

Respecto a las *operaciones generales*, se gradúan una serie de situaciones que actúan como supuesto de hecho legitimador de la actuación de las FAS (en los términos que luego se verá). Estas son las operaciones de prevención y/o disuasión; las operaciones de mantenimiento de la paz; las operaciones en situaciones de crisis; y la respuesta a una eventual agresión.

En cuanto a las *operaciones particulares*, y en lo que aquí interesa, la LODN concreta tres. La primera es "la colaboración en operaciones de mantenimiento de la paz y estabilización internacional en aquellas zonas donde se vean afectadas, la reconstrucción de la seguridad y la administración, así como la rehabilitación de un país, región o zona determinada, conforme a los tratados y compromisos establecidos". La segunda es "la participación con otros organismos nacionales e internacionales para

preservar la seguridad y el bienestar de los ciudadanos españoles en el extranjero, de conformidad con los criterios de coordinación y de asignación de responsabilidades que se establezcan". La tercera es la eventual operación que deba llevarse a cabo "para garantizar la seguridad y bienestar de los ciudadanos españoles en el extranjero".

Para que se puedan acometer tales misiones deben concurrir diversos requisitos formales y materiales.

Acerca de los *requisitos formales*, lo primero que debe decirse es que cabe identificar dos tipos de situaciones. En el caso de que la operación en el exterior esté directamente relacionada con la defensa de España o del interés nacional –conceptos rayanos con lo jurídicamente indeterminado- no será necesaria la autorización previa del Congreso de los Diputados. El Gobierno, quien como ya se dijo es el órgano constitucional competente en la materia, será el encargado de mandar a nuestros soldados fuera de las fronteras patrias, con la consiguiente responsabilidad que ello conlleva. Quizá valdría aquí el ejemplo de la intervención en la isla de Perejil de darse en la actualidad (al menos de darse a partir de 2005, momento en el que entró en vigor la regulación aludida)[9].

En cualquier otro supuesto, el Gobierno deberá pedir autorización previa a la Cámara Baja para mandar la correspondiente misión al exterior. Pero también se realizan algunos matices en función de la situación en la que nos encontremos. Si estamos ante misiones que "de acuerdo con compromisos internacionales, requieran una respuesta rápida o inmediata a determinadas situaciones, los trámites de consulta previa y autorización se realizarán mediante procedimientos de urgencia que permitan cumplir con dichos compromisos". Es decir, los plazos parlamentarios se acortarán a la mitad. Además cabe otro supuesto. Si lo que se dan son "razones de máxima urgencia", por las que "no fuera posible realizar la consulta previa", el Gobierno someterá al Congreso de los Diputados lo antes posible la decisión que haya adoptado para la ratificación, en su caso." Control *exante* y control *expost*, tal y como se puede observar, son los dos puntales de la intervención parlamentaria en la materia, no exentos de cierta casuística por otro lado.

Por otro lado, el desarrollo de toda misión exterior está supervisado por la misma Cámara. Así, la dicción literal del artículo 18 LODN es clara: "El Gobierno informará periódicamente, en un plazo en ningún caso superior a un año, al Congreso de los Diputados sobre el desarrollo de las operaciones de las Fuerzas Armadas en el exterior"[10].

En cuanto a los *requisitos materiales*, el tenor es en parte similar y en parte diferente. Por ello, de conformidad con el artículo 19 LODN, "para que las Fuerzas Armadas puedan realizar misiones en el exterior que no estén directamente relacionadas con la defensa de España o del interés nacional, se deberán cumplir las siguientes condiciones: a) Que se realicen por petición expresa del Gobierno del Estado en cuyo territorio se desarrollen o estén autorizadas en Resoluciones del Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas o acordadas, en su caso, por organizaciones internacionales de las que España

[9] Sobre el conflicto de Perejil puede verse TOMÁS ORTIZ DE LA TORRE, J.A.: "La isla de Perejil y el Derecho Internacional", *Revista General de Legislación y Jurisprudencia*, nº 1, 2002, pp. 57-80; RUIZ MIGUEL, C; "Las nuevas relaciones internacionales después de la crisis de Perejil", *Boletín de Información*, nº 276, 2002, pp. 1-12; y SAURA ESTAPÁ, J; "A propósito de la soberanía sobre el islote de Perejil", *Revista electrónica de estudios internacionales*, nº 5, 2002, pp. 1-5.

[10] El Ministerio de Defensa ha venido cumpliendo puntualmente con tal deber de información. En ese sentido puede verse la *Comparecencia del Ministro de Defensa ante la Comisión de Defensa del Congreso de los Diputados para informar sobre el desarrollo de las Misiones de las Fuerzas Armadas en el exterior*, de 17 de diciembre de 2014 (el texto se ha consultado, el 25 de junio de 2015, aquí: www.defensa.gob.es).

forme parte, particularmente la Unión Europea o la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN), en el marco de sus respectivas competencias. b) Que cumplan con los fines defensivos, humanitarios, de estabilización o de mantenimiento y preservación de la paz, previstos y ordenados por las mencionadas organizaciones. c) Que sean conformes con la Carta de las Naciones Unidas y que no contradigan o vulneren los principios del derecho internacional convencional que España ha incorporado a su ordenamiento, de conformidad con el artículo 96.1 de la Constitución".

Este sería el marco jurídico básico para poder enviar soldados españoles al exterior. Ahora bien, existen algunas otras previsiones que deben tenerse en cuenta, toda vez que la propia LAESE recuerda en su disposición adicional la importancia que para el buen desempeño de la función militar tienen los principios de disciplina, jerarquía y unidad, principios que se incardinan en un marco jurídico compuesto básicamente por la legislación antedicha.

La nueva LORDFAS entró en vigor en marzo de 2015, regulando un régimen sancionador aplicable a nuestros soldados en el extranjero. Por poner algunos ejemplos, en primer término el artículo 6.3 de la misma establece como falta leve "la inexactitud en el cumplimiento de los deberes impuestos por el derecho internacional aplicable en conflictos armados, así como de los propios del puesto que desempeñe mientras preste sus servicios en organizaciones internacionales o durante su participación en operaciones militares". Estas faltas serán castigadas, a tenor del artículo 11.1, bien con la reprensión; con la privación de salida de uno a ocho días; con una sanción económica de uno a siete días; o con el arresto de uno a catorce días. Por su parte, su artículo 7.3 establece que será falta grave "el incumplimiento de las órdenes e instrucciones que reciba de las autoridades y mandos extranjeros de los que dependa, en las estructuras civiles o militares en las que esté integrado mientras preste sus servicios en organizaciones internacionales o durante su participación en operaciones militares". Tal falta podrá ser castigada, siguiendo el artículo 11.2, con una sanción económica de ocho a quince días; con el arresto de quince a treinta días; con la pérdida de destino; y, si estamos ante un alumno militar, con la baja en el Centro Docente Militar de Formación correspondiente. Además, el artículo 8.5 concluye que será falta muy grave, entre otras, "las extralimitaciones en sus atribuciones y abusos en relación con sus subordinados militares o civiles, nacionales o extranjeros, cuando sean reiterados, así como provocar, ocasionar o tomar parte activa, reiteradamente, en altercados con la población local, con otros miembros del personal militar extranjero o del personal civil de la organización o de las estructuras o fuerzas participantes en la misión, o de otras organizaciones o estructuras internacionales o no gubernamentales". Tampoco cabe perder de vista lo que dice el artículo 8.10, constituyendo falta muy grave "incumplir grave o reiteradamente las reglas de enfrentamiento establecidas para las operaciones en las que participe o la inobservancia por imprudencia grave de los deberes establecidos por el derecho internacional aplicable en los conflictos armados". De conformidad con el artículo 11., las sanciones que pueden imponerse por estos ilícitos son el arresto de treinta y uno a sesenta días; la suspensión de empleo; la separación del servicio; o la resolución de compromiso.

También debe aludirse a la LODDMFAS, norma que no excluye la titularidad de los derechos fundamentales de los soldados cuando actúan en el exterior[11]. Ello cobra pleno sentido si se tiene en cuenta que el propio ordenamiento espera del militar que cumpla escrupulosamente uno de los más

[11] Una amplia reflexión sobre dicha norma puede verse en FERNÁNDEZ GARCÍA, I; "La sujeción especial del militar tras la nueva Ley Orgánica de Derechos y Deberes", *Revista Española de Derecho Constitucional*, nº 102, 2014, pp. 127-166.

deberes fundamentales de todo miembro de las mismas, como es el de guardar y hacer guardar la Constitución, sin perjuicio de cumplir con las reglas de comportamiento propias de su condición.

¿Y qué se dice respecto de tales reglas? En lo que aquí interesa, una apuesta decidida –una vez más- por el multilateralismo respetuoso con los compromisos internacionales adquiridos en las organizaciones de las que somos parte (artículo 6.1. Segunda: " [el militar] cuando actúe en misiones para contribuir militarmente al mantenimiento de la paz, estabilidad y seguridad y apoyar la ayuda humanitaria, lo hará como instrumento de la Nación española al servicio de dichos fines, en estrecha colaboración con ejércitos de países aliados y en el marco de las organizaciones internacionales de las que España forme parte").

Tales reglas de comportamiento exigen que el uso de la fuerza por parte de nuestros soldados sea, como no puede ser de otro modo, adecuado a los estándares jurídicos pertinentes (artículo 6.1.Sexta: "En el empleo legítimo de la fuerza, hará un uso gradual y proporcionado de la misma, de acuerdo con las reglas de enfrentamiento establecidas para las operaciones en las que participe").

Dicho eso, la norma legal establece límites adicionales en el ejercicio de tales derechos. Se llega a dicha conclusión de la dicción literal del artículo 10.1 LODDMFAS ("El militar tiene derecho a la intimidad personal. En el ejercicio y salvaguarda de este derecho se tendrán en cuenta las circunstancias en que tengan lugar las operaciones"); del artículo 11 LODDMFAS ("1. El militar podrá desplazarse libremente por el territorio nacional sin perjuicio de las limitaciones derivadas de las exigencias del deber de disponibilidad permanente a que se refiere el artículo 22. 2. En los desplazamientos al extranjero se aplicarán los mismos criterios que a los que se realicen en territorio nacional. En función de la situación internacional y en operaciones militares en el exterior, será preceptiva una autorización previa de conformidad con lo que se establezca por orden del Ministro de Defensa"); del artículo 12.3 LODDMFAS ("En los asuntos estrictamente relacionados con el servicio en las Fuerzas Armadas, los militares en el ejercicio de la libertad de expresión estarán sujetos a los límites derivados de la disciplina"); del artículo 15.2 LODDMFAS, que también opera como garantía ("Los miembros de las Fuerzas Armadas tienen derecho de sufragio activo; lo pueden ejercer de conformidad con lo establecido en la legislación sobre régimen electoral general. Las autoridades competentes y los mandos militares establecerán los procedimientos y medios necesarios para facilitar el voto de los militares que se encuentren en cualquier destino y misión, en especial fuera del territorio nacional (…)"; y del artículo 41 ("El ejercicio del derecho de asociación profesional se realizará de tal modo que quede garantizado el cumplimiento de las misiones de las Fuerzas Armadas, el desarrollo de las operaciones (…)"].

El todavía Proyecto Código Penal Militar (actualmente en fase de tramitación parlamentaria[12]), parece que también prestará decidida atención a lo que suceda con la actuación militar extramuros de nuestras fronteras. El apartado III de su Exposición de Motivos recuerda que "en el Capítulo VII se agrupan los delitos contra centinela, Autoridad militar, fuerza armada (que define) y policía militar, recogiendo sus

[12] Vid. http://www.congreso.es/portal/page/portal/Congreso/Congreso/Iniciativas?_piref73_2148295_73_1335437_1335437.next_page=/wc/servidorCGI&CMD=VERLST&BASE=IW10&PIECE=IWA0&FMT=INITXD1S.fmt&FORM1=INITXLUS.fmt&DOCS=1-1&QUERY=%28I%29.ACIN1.+%26+%28C%C3%B3DIGO+PENAL+MILITAR%29.ALL. Consultado el 17 de septiembre de 2015.

especialidades en caso de conflicto armado, estado de sitio o en el curso de una operación internacional coercitiva o de paz".

En lo que hace a la LCM, la misma pretende dotar al soldado español de la mejor preparación, en aras de un exacto cumplimiento de las misiones que se le atribuyan; sobre todo en un contexto en el que, como se dice en el apartado III "(…) se tiene por objetivo (…) convertirlo en un excelente servidor público y hacerlo militar, es decir, depositario de la fuerza y capacitado y preparado para usarla adecuadamente. Aquél a quien se confía el uso de la fuerza debe adquirir el compromiso de emplearla en la forma y con la intensidad que la Nación, a través de las Cortes Generales y del Gobierno, ordene hacerlo de acuerdo con la Constitución y el resto del ordenamiento. Militar que también debe estar en disposición de afrontar las misiones de las Fuerzas Armadas en situaciones de crisis o emergencias".

2.3. En los Reglamentos

Una de las normas más longevas del Derecho Militar son las RROO, cuyo origen data de 1778. Desde entonces han venido siendo el auténtico código de buena conducta del militar, aplicándose dentro y fuera de nuestras fronteras tal y como establece el artículo 31 de las mismas ("Cuando [el soldado] se integre temporalmente en ejércitos y órganos de defensa de otros países o en organizaciones internacionales, le será de aplicación lo dispuesto en estas Reales Ordenanzas, sin perjuicio de las peculiaridades previstas en los tratados, convenios y demás acuerdos internacionales suscritos por España. Observará en su trato con los miembros de los ejércitos de otras naciones las mismas reglas de comportamiento que rigen en las Fuerzas Armadas españolas").

Más allá de los valores que debe mostrar todo soldado, sea en combate, sea en misión de paz, lo cierto es que la norma se preocupa porque respeten escrupulosamente lo que denomina el *principio de humanidad*, según el cual "su conducta [la del soldado] en el transcurso de cualquier conflicto u operación militar deberá ajustarse a las normas que resulten aplicables de los tratados internacionales en los que España fuera parte, relativos al Derecho Internacional Humanitario" (artículo 85). Extremo que refuerza posteriormente estableciendo que "el militar conocerá y difundirá, así como aplicará en el transcurso de cualquier conflicto armado u operación militar, los convenios internacionales ratificados por España relativos al alivio de la suerte de heridos, enfermos o náufragos de las fuerzas armadas, al trato a los prisioneros y a la protección de las personas civiles, así como los relativos a la protección de bienes culturales y a la prohibición o restricciones al empleo de ciertas armas" (artículo 106).[13]

El segundo aspecto a reseñar es que el soldado debe conocer, en caso de que deba usar la fuerza, las reglas de enfrentamiento[14]. Ello le permitirá "hacer frente a las situaciones cambiantes de cada momento, debiendo estar preparado para asumir la protección de la población afectada y los riesgos consiguientes" (artículo 94).

Además, se antoja esencial que sea consciente del teatro de operaciones donde tendrá que desplegarse. De ahí que aquél "se instruirá y pondrá todo su interés en el conocimiento y comprensión de los

[13] A medida que las FAS tuvieron que comenzar a participar activamente en misiones internacionales, las carencias de esta y otra índole fueron paulatinamente solventadas. Véase GARCÍA GARCÍA, A: *Misión de Paz en Bosnia*, Universidad de Murcia, 2009, p. 118 y ss.

[14] Las reglas de enfrentamiento (también conocidas como *rules of engagement* o ROE) responden al cómo, cuándo, y dónde se puede hacer uso de las armas por parte del soldado en misión internacional. Vid. FELIU ORTEGA, F; *Las Misiones de las Fuerzas Armadas Españolas en el Exterior*, Foro de la Sociedad Civil, Madrid, 2010, p. 25.

elementos identificadores de la cultura y las costumbres propias de la zona de despliegue, elementos que respetará salvo que comprometan la misión encomendada o la seguridad propia y la de sus subordinados" (artículo 96).

También se regula la cooperación con las instituciones civiles, desde una óptica realista. Para ello "colaborará, dentro de las posibilidades de la misión encomendada, con aquellas organizaciones civiles que desempeñen tareas en favor de la paz, seguridad, estabilidad o de ayuda humanitaria" (artículo 97)[15].

3. Jurisprudencia sobre Acción Exterior

La complejidad y extensión de las diferentes funciones que cumplen nuestros soldados, el marco tan espinoso en el que deben llevarlas a cabo, y las diferentes circunstancias que pueden concurrir de forma inesperada, - amén de la mala praxis propia de la condición humana, vista o no de uniforme- pueden desembocar en ciertas conductas tipificadas como ilícitas.

En relación con las misiones internacionales, la mayor parte de los litigios jurisdiccionales acaecidos no tienen directamente que ver con el desempeño de las mismas sino con aspectos tangenciales. Por ejemplo, los tribunales españoles han tenido que decidir en varias ocasiones si la concesión de diferentes recompensas, medallas, distintivos y reconocimientos al valor acreditado de algunos de los soldados fueron o no ajustadas a Derecho. Es el caso de una de las últimas resoluciones judiciales del orden contencioso-administrativo, la STSJ de Madrid nº 55/2014, de 27 enero, donde se reconoce parcialmente la pretensión de los actores de anotación en su hoja de servicio de la condición de "Valor reconocido" (aunque se les acabe negando la posibilidad de derecho al uso en el uniforme del "Distintivo de Excombatiente de las Fuerzas Españolas").

Otra panoplia de casos que han acabado en sede judicial son los de algunos guardias civiles que, estando en misión internacional, perdieron algunas indemnizaciones, dietas, y/u otros reconocimientos económicos que sí se abonaban a sus compañeros de las FAS. Como regla general la jurisdicción contencioso-administrativa ha reconocido las mismas haciendo valer el principio de igualdad. Y en una de las ocasiones en las que no lo hizo fue el Tribunal Constitucional el que acabó por hacerlo. Se habla de la STC 11/2013, de 28 de enero de 2013, donde se ventila una supuesta vulneración del derecho a la igualdad y no discriminación del artículo 14 CE[16]. El Guardia Civil demandaba tutela constitucional por entender que tenía derecho a la indemnización por residencia eventual, petición denegada previamente en sede jurisdiccional (y que sí se reconoció a los funcionarios del Cuerpo Nacional de Policía integrados en la Misión de Naciones Unidas en Haití, a la que todos pertenecían). La sentencia reconoce que la resolución judicial denegatoria quebró la igualdad, al no motivar porqué en casos idénticos fue admitida la procedencia de la indemnización y en otros no.

La responsabilidad del militar español también se extiende a casos donde la gravedad de su conducta implique la depuración de la responsabilidad individual pertinente como sujeto activo, ventilándose en

[15] Algunos autores siguen albergando dudas acerca de la idoneidad de canalizar dicha ayuda mediante el empleo indiscriminado de la fuerza militar, apostando por las instituciones de protección civil. Si se ha entendido bien, ése es el parecer de REY, F; THIEUX, L; y NÚÑEZ VILLAVERDE, J.A; *Fuerzas Armadas y acción humanitaria: debates y propuestas*, Fundación Carolina-CeALCI, Madrid, 2007, *pássim*.

[16] Que dice así: "Los españoles son iguales ante la ley, sin que pueda prevalecer discriminación alguna por razón de nacimiento, raza, sexo, religión, opinión o cualquier otra condición o circunstancia personal o social".

sede administrativa (disciplinaria), y/o en sede penal. Y de estar incurso en este último supuesto, los hechos delictivos podrían llegar a ser enjuiciados –complementariamente[17]- por la Corte Penal Internacional, de la que España es parte desde el 24 de octubre de 2000[18].

Con todo, la demostración palpable de que estas normas rigen y se aplican en toda su extensión es la triste actuación de un puñado de soldados españoles en Irak; caso que, aunque se encuentra *subiudice* al momento de entregar estas páginas, ha visto cómo la titular del Juzgado Togado Militar Territorial nº 12 que lo instruye dictaba prisión provisional para uno de los soldados que presuntamente participaron en las agresiones infligidas a presos bajo su custodia[19].

Tampoco cabe obviar que una eventual actuación contra Derecho del militar español puede suponer no sólo su responsabilidad individual frente a la misma nación que debía defender, sino que podría hacer incurrir a esta en responsabilidad internacional por la comisión de ilícitos internacionales[20]. Al menos eso parece deducirse de los artículos 2 y siguientes del *Proyecto de Artículos sobre la Responsabilidad del Estado por hechos internacionalmente ilícitos*.

Un hecho internacionalmente ilícito tiene lugar "cuando un comportamiento consistente en una acción u omisión: a) Es atribuible al Estado según el derecho internacional; y b) Constituye una violación de una obligación internacional del Estado" (artículo 2). Abundando en el particular, calificar de ilícito tales hechos queda fuera del margen de apreciación nacional de los Estados firmantes de dicho Tratado, sin permitir la elusión de la eventual responsabilidad: "La calificación del hecho del Estado como internacionalmente ilícito se rige por el derecho internacional. Tal calificación no es afectada por la calificación del mismo hecho como lícito por el derecho interno" (artículo 3).

La norma internacional pretende hacer de cortafuegos ante posibles elusiones de la responsabilidad. Así: "se considerará hecho del Estado según el derecho internacional el comportamiento de todo órgano del Estado, ya sea que ejerza funciones legislativas, ejecutivas, judiciales o de otra índole, cualquiera que sea su posición en la organización del Estado y tanto si pertenece al gobierno central como a una división territorial del Estado. 2. Se entenderá que órgano incluye toda persona o entidad que tenga esa condición según el derecho interno del Estado" (artículo 4). También "se considerará hecho del Estado según el derecho internacional el comportamiento de una persona o entidad que no sea órgano del Estado según el artículo 4, pero esté facultada por el derecho de ese Estado para ejercer atribuciones del poder público, siempre que, en el caso de que se trate, la persona o entidad actúe en esa capacidad" (artículo 5). Incluso "se considerará hecho del Estado según el derecho internacional el comportamiento de un órgano puesto a su disposición por otro Estado, siempre que ese órgano actúe en el ejercicio de atribuciones del poder público del Estado a cuya disposición se encuentra" (artículo 6); asimismo, las posibles extralimitaciones en el mandato tienen también su consecuente penalización

[17] En el Preámbulo de la norma se dirá que "(…): la Corte Penal Internacional establecida en virtud del presente Estatuto será complementaria de las jurisdicciones penales nacionales (…)".

[18] Después de casi 15 años, la Corte sólo tiene una sentencia en su haber (y se encuentra recurrida, tal y como informa nuestro Ministerio de Asuntos Exteriores en http://www.exteriores.gob.es/Portal/es/PoliticaExteriorCooperacion/NacionesUnidas/Paginas/CortePenalInternacional.aspx . Consultado el 3 de julio de 2015). Sobre el particular véase MARTÍNEZ GUERRA, A; "Corte Penal Internacional: balance de una década", *Política Exterior*, vol. 26, nº 148, 2012, p. 27.

[19] Vid. http://politica.elpais.com/politica/2014/07/02/actualidad/1404326443_070845.html (consultado el 3 de julio de 2015).

[20] Así lo defiende SASSOLI, M; "La responsabilidad del Estado por las violaciones del derecho internacional humanitario". Vid. https://www.icrc.org/spa/resources/documents/misc/5tecbx.htm. Consultado el 3 de julio de 2015.

en el Tratado, dado que "el comportamiento de un órgano del Estado o de una persona o entidad facultada para ejercer atribuciones del poder público se considerará hecho del Estado según el derecho internacional si tal órgano, persona o entidad actúa en esa condición, aunque se exceda en su competencia o contravenga" (artículo 7).

Hasta el momento, la actuación de los soldados españoles no ha dado lugar a responsabilidad internacional por parte de España, hecho por el que no podemos sino felicitarnos.

4. Conclusiones

La regulación comentada ha repercutido positivamente, creemos, en cuestiones capitales.

La consolidación de la participación de las FAS en la acción exterior estatal, en gran medida mediante operaciones de paz, ha servido para cerrar una brumosa etapa del pasado, consolidar otra exitosa en el presente, y abrir de forma esperanzadora la que está por venir[21]. La intervención de las FAS en cuestiones internas ha seguido, sigue, y a buen seguro seguirá obedeciendo a una lógica inversamente proporcional a la cantidad y calidad de misiones de cumplan fuera de nuestras fronteras[22]. El contacto con el mundo internacional/exterior es, en este sentido, tan provechoso para todo soldado como lo es para cualquier otro ciudadano[23].

Tal proceso ha ayudado a renovar y modernizar las estructuras de mando, logísticas, y operativas de las FAS, lo que necesariamente redunda en la calidad del servicio prestado por sus miembros. Por no mencionar la profundización en la profesionalización de la tropa y marinería, así como el afianzamiento de los principios vertebradores de toda Fuerza Armada (disciplina y jerarquía, principalmente)[24].

Todo ello ha redundado en la imagen y el grado de aceptación que nuestras FAS han adquirido con el paso del tiempo, con unos mandos que en su inmensa mayoría respetan y cumplen escrupulosamente con el ordenamiento jurídico vigente.

La acción exterior a través de las FAS, en suma, ha ayudado a crecer a España en la escena internacional, contribuyendo a proyectar una imagen cada vez más positiva de nuestro país hacia el resto del mundo.

[21] Vid. NAVAJAS ZUBELDIA, C; "El inicio de las operaciones de paz como *punto final* de la larga transición militar". En SEPÚLVEDA, A (ed.); *España en las operaciones internacionales de pacificación*, Instituto Universitario General Gutiérrez Mellado, Madrid, 2009, pp. 83-110.

[22] Vid. VEGA FERNÁNDEZ, E; "Las operaciones en el exterior de las Fuerzas Armadas y el papel de España en el mundo", *Panorama Social*, nº 16, 2012, pp. 166-177.

[23] La integración de las FAS en instituciones internacionales, entrando en contacto con otros ejércitos, puede ser un factor que ayude a comprender e imbricar mejor a la propia Institución militar dentro de la democracia. Vid. BARRACHINA LEÓN, C; "El retorno de los militares a los cuarteles: militares y cambio político en España (1976-1981). *Working Paper* nº 211, Institut de Ciències Polítiques i Socials, Barcelona, 2002, p. 50.

[24] Vid. ORTEGA MARTÍN, J; "Transformación y adaptación de las FAS para las Operaciones en el exterior". En SEPÚLVEDA, I (ed.): *España en las operaciones internacionales de pacificación*. Instituto Universitario General Gutiérrez Mellado-UNED, Madrid, 2009, p. 116.

Referencias

ÁLVAREZ RODRÍGUEZ, I; "Los Derechos Políticos de los Miembros de las Fuerzas Armadas a la luz del Principio de Neutralidad Política", *Revista Estudios de Deusto*, vol. 62, nº 2, 2014.

ARTEAGA, F; "La Directiva de Defensa Nacional 1/2012: tiempos de cambio para cambiar a tiempo"; *Anuario del Real Instituto Elcano*, nº 58, 2012.

BARRACHINA LEÓN, C; "El retorno de los militares a los cuarteles: militares y cambio político en España (1976-1981). *Working Paper* nº 211, Institut de Ciències Polítiques i Socials, Barcelona, 2002.

BERMEJO GARCÍA, R; y LÓPEZ JACOISTE DÍAZ, E; "Las Operaciones de Mantenimiento de la Paz de las Naciones Unidas: aspectos generales". En SEPÚLVEDA, I (ed.): *España en las operaciones internacionales de pacificación*. Instituto Universitario General Gutiérrez Mellado-UNED, Madrid, 2009.

CORREA BURROWS, P; "¿Cómo se financian las operaciones y cuánto le cuestan a España las misiones internacionales de paz? *Memorando OPEX* nº 143, 2010.

DÍAZ BARRADO, C.M; y VACAS FERNÁNDEZ, F; "Fundamentos jurídicos y condiciones para el ejercicio de las operaciones de mantenimiento de la paz de Naciones Unidas", *Anuario de Derecho Internacional*, nº 21, 2005.

DEPARTMENT OF PEACEKEEPING OPERATIONS-UNITED NATIONS; *Handbook on United Nations Multidimensional Peacekeeping Operations*, New York, 2003.

DOLÓN PAYÁN, A; "Alianzas Estratégicas entre Organizaciones Internacionales para Operaciones de Mantenimiento de Paz: Misión de Naciones Unidas para Guatemala (MINUGUA)". En SERNA SERRANO, J; RODRÍGUEZ BERMÚDEZ, G; y GARCÍA LAENCINA, P; *Las Tecnologías de Doble Uso: La Contribución de la I+D en Defensa al crecimiento económico, industrial y social*, Edelvives-CUD de San Javier, 2015.

FELIU ORTEGA, F; *Las Misiones de las Fuerzas Armadas Españolas en el Exterior*, Foro de la Sociedad Civil, Madrid, 2010.

FERNÁNDEZ GARCÍA, I; "La sujeción especial del militar tras la nueva Ley Orgánica de Derechos y Deberes", *Revista Española de Derecho Constitucional*, nº 102, 2014.

GARCÍA GARCÍA, A: *Misión de Paz en Bosnia*, Universidad de Murcia, 2009.

GOBIERNO DE ESPAÑA-PRESIDENCIA DEL GOBIERNO*; Estrategia de Seguridad Nacional. Un proyecto compartido*, Madrid, 2013.

GOBIERNO DE ESPAÑA-PRESIDENCIA DEL GOBIERNO; *Directiva de Seguridad Nacional*, Madrid, 2012.

LIÑÁN NOGUERAS, D; y ROLDÁN BARBERO, J (eds.): *El Estatuto Jurídico de las Fuerzas Armadas Españolas en el Exterior*, Plaza y Valdés, Madrid, 2014.

LOZANO CONTRERAS, F; "Breve análisis de las Operaciones de Mantenimiento de la Paz a la luz del Derecho Internacional vigente". En SEPÚLVEDA, I (ed.): *España en las operaciones internacionales de pacificación*. Instituto Universitario General Gutiérrez Mellado-UNED, Madrid, 2009.

MAIZIERE, Ulrich de: "El cometido de las fuerzas armadas en la política exterior", Boletín de Información del CESEDEN, nº 126-VI, 1979.

JANOWITZ, M; *El Soldado Profesional*, Ministerio de Defensa, Madrid, 1990.

MARTÍNEZ GUERRA, A; "Corte Penal Internacional: balance de una década", *Política Exterior*, vol. 26, nº 148, 2012.

NAVAJAS ZUBELDIA, C; "El inicio de las operaciones de paz como *punto final* de la larga transición militar". En SEPÚLVEDA, A (ed.); *España en las operaciones internacionales de pacificación*, Instituto Universitario General Gutiérrez Mellado, Madrid, 2009.

ORTEGA MARTÍN, J; "Transformación y adaptación de las FAS para las Operaciones en el exterior". En SEPÚLVEDA, I (ed.): *España en las operaciones internacionales de pacificación*. Instituto Universitario General Gutiérrez Mellado-UNED, Madrid, 2009.

ORTEGA SANTIAGO, C; "La dimensión constitucional de la guerra: Conflictos armados e intervenciones militares en el extranjero", *Documentos de Trabajo del Real Instituto Elcano*, nº 43, 2004.

REY, F; THIEUX, L; y NÚÑEZ VILLAVERDE, J.A; *Fuerzas Armadas y acción humanitaria: debates y propuestas*, Fundación Carolina-CeALCI, Madrid, 2007.

RUIZ MIGUEL, C; "Las nuevas relaciones internacionales después de la crisis de Perejil", Boletín de Información, nº 276, 2002.

SASSOLI, M; "La responsabilidad del Estado por las violaciones del derecho internacional humanitario". Vid. https://www.icrc.org/spa/resources/documents/misc/5tecbx.htm

SAURA ESTAPÁ, J; "A propósito de la soberanía sobre el islote de Perejil", Revista electrónica de estudios internacionales, nº 5, 2002.

SERRA, E; "La modernización de las Fuerzas Armadas", *Arbor. Ciencia, Pensamiento y Cultura*, 2014, vol. 190-765.

TOMÁS ORTIZ DE LA TORRE, J.A.: "La isla de Perejil y el Derecho Internacional", *Revista General de Legislación y Jurisprudencia*, nº 1, 2002.

VEGA FERNÁNDEZ, E; "Las operaciones en el exterior de las Fuerzas Armadas y el papel de España en el mundo", *Panorama Social*, nº 16, 2012.

DESEi+d

2015

http://goo.gl/jUDyO1