DESEI+D 2025

Libro de resúmenes comunicaciones DESEi+d 2025



MINISTERIO
DE DEFENSA



DESEI+D 2025



XII Congreso Nacional de i + d en Defensa y Seguridad

Zamora

11, 12 y 13 de noviembre de 2025

Libro de resúmenes comunicaciones

MINISTERIO
DE DEFENSA

DESEI+D 2025

XII Congreso Nacional de i + d en Defensa y Seguridad

Resúmenes

Organiza

Con la participación

Patrocina

Catálogo de Publicaciones de Defensa
publicaciones.defensa.gob.es

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado
cpage.mpr.gob.es

publicaciones.defensa.gob.es

cpage.mpr.gob.es

Edita:

MINISTERIO DE DEFENSA

SUBSECRETARÍA DE DEFENSA

SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

Paseo de la Castellana 109, 28046 Madrid

© Autores y editor, 2025

NIPO 083-25-183-5 (edición impresa)
ISBN 978-84-1083-073-8 (edición impresa)

NIPO 083-25-182-X (edición en línea)

Depósito legal M 17845-2025
Fecha de edición: agosto de 2025
Maqueta e imprime: Imprenta Ministerio de Defensa

Las opiniones emitidas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad de los autores de la misma.

Los derechos de explotación de esta obra están amparados por la Ley de Propiedad Intelectual. Ninguna de las partes de la misma puede ser reproducida, almacenada ni transmitida en ninguna forma ni por medio alguno, electrónico, mecánico o de grabación, incluido fotocopias, o por cualquier otra forma, sin permiso previo, expreso y por escrito de los titulares del copyright ©.

En esta edición se ha utilizado papel procedente de bosques gestionados de forma sostenible y fuentes controladas.

Índice

Presentación libro de resúmenes DESEi+d 2025 21

Comité Organizador DESEi+d 2025 23

ÁREA 1. Armas y municiones 25

Proyecto ACUS: desarrollo de tobera MOC para propulsión sostenible (DESEi+d, 2025: 40) 27

Proyecto ACUS: inhibición en propulsantes nitrocelulósicos (DESEi+d, 2025: 56) 29

Empleo de modelos de aprendizaje fundacionales para la caracterización de disparos: un enfoque de aprendizaje autosupervisado (DESEi+d, 2025: 60) 31

Modeling of devices for combating IEDs using high-velocity water projection (DESEi+d, 2025: 62) 33

Simulación numérica de la suelta de una bomba GBU-12 con despliegue simultáneo de las aletas durante la misma (DESEi+d, 2025: 65) 35

Municiones merodeadoras: desarrollo y aplicación de una metodología de calificación basada en el programa de evaluación de S3 (DESEi+d, 2025: 88) 37

Propulsantes verdes: una alternativa sostenible en el campo de los propulsantes sólidos composite (DESEi+d, 2025: 119) 39

Evaluación del riesgo asociado a ensayo con cargas explosivas (DESEi+d, 2025: 180) 41

Modelado y simulación de misiles antiaéreos. Aplicación de la ley de navegación proporcional ante amenazas hiperveloces (DESEi+d, 2025: 287) 43

Diseño de sistemas de suelta segura para integración de armamento en RPAS (DESEi+d, 2025: 176) 45

Guiado terminal en UAVs: estrategias, diseño y desafíos (DESEi+d, 2025: 17) 47

Hacia una gestión avanzada del envejecimiento en motores de propulsante sólido de material compuesto (DESEi+d, 2025: 251) 49

ÁREA 2. Sensores y sistemas electrónicos 51

ISNAV: Sistema de navegación vehicular con capacidades *antispoofing* GNSS (DESEi+d, 2025: 208) 53

Additive manufacturing of radio frequency waveguides: material evaluation and surface treatments (DESEi+d, 2025: 240) 55

Detección de radiación electromagnética en el rango 2-5 THz usando un FET de grafeno (DESEi+d, 2025: 292) 57

Desarrollo y evaluación de técnicas de aprendizaje automático basadas en datos de seguimiento para clasificación de blancos en sistemas radar antidron (DESEi+d, 2025: 8) 59

Protección de radares de vigilancia mediante sensores ROSAR en bandas milimétricas (DESEi+d, 2025: 266) 61

Biosensores integrados en textiles para mejorar el confort y la supervivencia del combatiente (DESEi+d, 2025: 9) 63

Aprendizaje basado en proyectos con IoT y drones para la innovación docente en transmisiones militares: integración de tecnologías LoRa y sistemas embebidos (DESEi+d, 2025: 21) 65

Proyecto HEROIC: contribución española en la evolución de los sensores infrarrojos europeos (DESEi+d, 2025: 132) 67

DED - LW primera pieza en el mundo para ultra alto vacío (UHV) fabricada por fabricación aditiva para un reloj óptico (Real Instituto y Observatorio de la Armada / Armada JEMANDIZ Rota / Novaindef / CEDAEC Linares) (DESEi+d, 2025: 238) 69

Evaluación de la carga interna del combatiente mediante termografía infrarroja: aplicaciones actuales y perspectivas de futuro (DESEi+d, 2025: 257) 71

Simulación de un sistema electroóptico para detección pasiva de amenazas propulsadas (DESEi+d, 2025: 273) ... 73

Análisis de nuevos sistemas de detección submarina para la protección de infraestructura crítica (DESEi+d, 2025: 37) ... 75

Transductores piezoeléctricos impresos para la monitorización de la salud de estructuras críticas mediante ultrasonidos (DESEi+d, 2025: 58) ... 77

Red de sensores para la detección de drones aéreos en interiores (DESEi+d, 2025: 283) ... 79

Navegación autónoma basada en relieve: avances y desafíos en la implementación de algoritmos TRN para UAV (DESEi+d, 2025: 5) ... 81

Drones en la oscuridad: localización en túneles mediante la fusión de LiDAR y termografía (DESEi+d, 2025: 29) ... 83

Detección de anomalías en vehículos de la UME mediante modelos de inteligencia artificial no supervisados (DESEi+d, 2025: 43) ... 85

Detección y clasificación de aeronaves militares mediante *deep learning* en imágenes satelitales para la defensa española (DESEi+d, 2025: 144) ... 87

Detección de cambios geoespaciales mediante *deep learning* para inteligencia y actualización cartográfica militar (DESEi+d, 2025: 145) ... 89

Programa SISNAVALT: presentación del proyecto, resultados y experiencias prácticas en entornos abiertos degradados (DESEi+d, 2025: 193) ... 91

Programa SISNAVALT: presentación del proyecto, resultados y experiencias prácticas en entornos cerrados y urbanos (DESEi+d, 2025: 194) ... 93

Análisis predictivo del motor-propulsor a bordo de vehículos tácticos con modelos de IA (DESEi+d, 2025: 201) ... 95

GNSS Spamming: ataques de denegación de servicio GNSS basados en *spoofing* (DESEi+d, 2025: 96) ... 97

ÁREA 3. Tecnologías comunes a bases, instalaciones, plataformas y combatiente ... 99

Recubrimientos multifuncionales Sol-gel: una plataforma tecnológica para la protección inteligente en defensa (DESEi+d, 2025: 45) ... 101

ATARI: inteligencia federada para gestión del ciclo de vida y mantenimiento predictivo en plataformas navales de defensa (DESEi+d, 2025: 151) ... 103

Automatización inteligente del sostenimiento en buques mediante sensórica avanzada e IA (DESEi+d, 2025: 230) 105

Fabricación aditiva y caracterización de CMCs de cordierita reforzados con RGO para soportes ópticos en aplicaciones espaciales (DESEi+d, 2025: 30). 107

Recubrimientos multifuncionales avanzados basados en nanomateriales para aplicaciones en defensa (DESEi+d, 2025: 71) 109

Análisis del daño por cavitación en la tobera de una hélice de acero inoxidable austenítico e investigación de los cambios microestructurales asociados (DESEi+d, 2025: 76) 111

Optimizando el blindaje balístico: nuevos diseños de estructuras reticulares de aceros económicos (316lSi y H11) mediante fabricación aditiva WL-DED (DESEi+d, 2025: 94) 113

Detección y clasificación de defectos en placas de acero mediante modelos visuales de lenguaje (DESEi+d, 2025: 106) 115

Integración de PCMs en equipamiento militar: optimización del camuflaje térmico y reducción de firma infrarroja (DESEi+d, 2025: 108) 117

Tecnología DED para fabricación quirúrgica en entornos operativos militares (DESEi+d, 2025: 133) 119

DED -lw / LPBF solución para fabricación aditiva de piezas de fortuna - impulsor de agua en circuito de refrigeración (Armada española JEMANDIZ Rota / Novaindef / CEDAEC Linares /APERAM) (DESEi+d, 2025: 163) 121

Comportamiento a cavitación del bronce al aluminio y manganeso en agua de mar (DESEi+d, 2025: 177) 123

Recubrimientos Cr_2AlC (*MAX phase*) depositados por *sputtering* resistentes a la corrosión, al desgaste y a temperaturas extremas (DESEi+d, 2025: 205) 125

Tecnología GEL-ELECTRODE para tratamientos de superficie localizados durante la reparación de componentes en misiones (DESEi+d, 2025: 233). 127

Nuevos tiempos, nuevos materiales: ¡apósitos antimicrobianos al combate! (DESEi+d, 2025: 298) 129

Análisis multicriterio para la integración de baterías de ion-litio en submarinos convencionales (DESEi+d, 2025: 12) 131

Avances en el proyecto PCVEMI: diseños e integración de sistema de propulsión basados en pilas de combustible en vehículos militares (DESEi+d, 2025: 222) 133

Integración a bordo de procesos de reformado y pila de combustible en aplicaciones militares (DESEi+d, 2025: 224) 135
Metaanálisis comparativo de la transitabilidad en entornos sin camino: vista aérea frente a vista UGV (DESEi+d, 2025: 44) 137
Desarrollo de soluciones desplegables en fabricación aditiva para BDR - *battle damage repairs* (DESEi+d, 2025: 245) 139
Desarrollo de cuaderna puente crítica por PBF-L y validación aeronáutica (DESEi+d, 2025: 259) 141

ÁREA 4. Bases e instalaciones 143

Diseño de estrategias defensivas en enjambres cooperativos para interceptar USV atacantes tecnológicamente superiores (DESEi+d, 2025: 20) 145
Denegación de acceso mediante enjambres de drones (DESEi+d, 2025: 55) ... 147
Desarrollo de una metodología armonizada para la evaluación de tecnologías de almacenamiento y conversión de energía en infaestructuras críticas (DESEi+d, 2025: 147) 149
Diseño y fabricación de una pizarra táctica retroiluminada para lanchas de instrucción (DESEi+d, 2025: 247) 151

ÁREA 5. Plataformas terrestres 153

ROCÍN: red de capacidades interoperable para sistemas autónomos terrestres (DESEi+d, 2025: 124) 155

ÁREA 6. Plataformas navales 157

Desarrollo de una embarcación con *hydrofoils* y propulsada con hidrógeno (DESEi+d, 2025, 51) 159
Estudio experimental de la variación de viscosidad efectiva por inyección de burbujas para aplicaciones navales (DESEi+d, 2025: 112) 161
Estudio experimental de la influencia del gradiente de presión en la técnica de reducción de resistencia por burbujas para propulsores marinos (DESEi+d, 2025: 117) 163
Propuesta de ensayos en canal y medición en el buque para el análisis del movimiento del centro de flotación y su influencia en la seguridad (DESEi+d, 2025: 161) 165

Sistemas de propulsión naval eficientes mediante técnicas avanzadas de modelado e inteligencia artificial (DESEi+d, 2025: 63) 167
Posicionamiento alternativo al GNSS: determinación de posición y tiempo (DESEi+d, 2025: 57) 169
Sistema SENDA de navegación para buques de la Armada (DESEi+d, 2025: 210) 171

ÁREA 7. Plataformas aéreas 173

Estudio de perfiles no convencionales para RPAS de uso civil-militar (DESEi+d, 2025: 70) 175
Desarrollo de composites de matriz cerámica CMC (DESEi+d, 2025: 16) 177
Batería modular redundante y convertidores de potencia para propulsión en plataformas aéreas de alta fiabilidad (DESEi+d, 2025: 86) 179
Sistema de almacenamiento de energía formado por baterías estructurales para la mejora de la eficiencia y alcance de vehículos aéreos no tripulados de aplicación militar (DESEi+d, 2025: 157) 181
Diseño y fabricación de un motor a reacción tipo pulsorreactor (DESEi+d, 2025: 255) 183
Vuelo en formación de UAVs: estrategias, desafíos y aplicaciones para operaciones en entornos complejos (DESEi+d, 2025: 50) 185
VLA: kit de navegación visual (DESEi+d, 2025: 258) 187
Indicador de complejidad *complex* para operaciones RPAS aplicadas en misiones de emergencia (DESEi+d, 2025: 4) 189
Transición de vuelo vertical a vuelo para avance convencional en un RPAS de alas basculantes (DESEi+d, 2025: 74) 191
Sistema de guiado autónomo para paracaídas mediante IA en operaciones de despliegue aéreo táctico (DESEi+d, 2025: 192) 193
Daliah UTM: plataforma UTM (*unmanned traffic management*) (DESEi+d, 2025: 261) 195
iTRIAXEM: triaje de heridos autónomo basado en robots e IA (DESEi+d, 2025: 264) 197

ÁREA 8. Sistemas espaciales 199

EDF-REACTS: o cómo poner en servicio en 72 horas una capacidad espacial (DESEi+d, 2025: 49) 201

Defendiendo el espacio: basura espacial y transferencias orbitales (DESEi+d, 2025: 52) 203

Herramienta web de monitorización de señales de navegación por satélite: GNSSense (DESEi+d, 2025: 61) 205

ÁREA 9. Combatiente 207

Influencia de la experiencia en el rendimiento motor bajo estrés en unidades paracaidistas (DESEi+d, 2025: 84) 209

Análisis de la actividad alpha y theta del EEG durante la simulación de vuelo: un estudio piloto (DESEi+d, 2025: 97) 211

Evaluación de la influencia de los campos electromagnéticos en los factores humanos: un estudio en el INTA (DESEi+d, 2025: 123) 213

Sistema de mochila para transporte de misiles Spike con amortiguación e integración asistida por exoesqueleto (DESEi+d, 2025: 129) 215

El foramen arqueado como factor de riesgo anatómico en los pilotos de combate (DESEi+d, 2025: 25) 217

ÁREA 10. Nrbqe 219

Proyecto ENASUS: análisis de señal en sensores MOx mediante la transformada de Mellin (DESEi+d, 2025: 41) 221

Proyecto ENASUS: generación de atmósferas contaminadas para la caracterización de sensores Mox (DESEi+d, 2025: 42) 223

Soluciones avanzadas basadas en IA, autonomía y plataformas integradas para la detección y neutralización de amenazas explosivas (DESEi+d, 2025: 81) 225

Proyecto europeo TICHE para la detección de minas y dispositivos improvisados enterrados (DESEi+d, 2025: 135) 227

Inertización de materiales energéticos para su estudio con seguridad en la identificación mediante el uso de tecnología Raman (DESEi+d, 2025: 183) 229

Recientes avances en la fabricación de semiconductores ternarios del tipo CdxZn1-xTe para su aplicación en detectores portátiles de radiación gamma que funcionan a temperatura ambiente para la detección temprana de material radiactivo (DESEi+d, 2025: 219) 231

DIEDRO - detección aérea inteligente de IEDs (DESEi+d, 2025: 246) 233

Descontaminación de agentes de guerra químicos y biológicos mediante plasma frío: resultados con agentes reales (DESEi+d, 2025: 93) 235
Aptámeros y su aplicación en el diagnóstico de saxitoxina (DESEi+d, 2025: 128) 237
Deep learning force fields: innovación tecnológica para la detección avanzada de amenazas químicas (DESEi+d, 2025: 48) 239
Destrucción de *biofilms* de *Vibrio cholerae* mediante la adición de una molécula señal universal (DESEi+d, 2025: 138) 241
Desarrollo de un método rápido y seguro para la determinación de la viabilidad de esporas utilizadas en guerra biológica (DESEi+d, 2025: 152) 243
Detección y cuantificación de autoinductor en cultivos de *Vibrio cholerae* para el desarrollo de un biosensor *on site* (DESEi+d, 2025: 153) 245
Calibración y adecuación de Sistemas UXV para la detección de contaminación radiactiva (DESEi+d, 2025: 189) 247
Caracterización molecular del aerobioma mediante secuenciación masiva y sus aplicaciones en la defensa biológica (DESEi+d, 2025: 203) 249
Entrenamiento personal sanitario en aula de inmersión en realidad virtual en diversos entornos (DESEi+d, 2025: 276) 251

ÁREA 11. Tecnologías de la información, comunicaciones y simulación 253
Algoritmo de Guerra: caracterización de la estrategia (DESEi+d, 2025: 3) 255
Enhancing defence network resilience: advanced fault-tolerant design and ndt-driven simulation with e-lighthouse network planner (DESEi+d, 2025: 66) 257
Propuesta de un modelo ontológico en sistemas federados con base en taxonomías JC3IEDM (DESEi+d, 2025: 23) 259
Modelos de lenguaje para navegación autónoma: casos prácticos de uso (DESEi+d, 2025: 26) 261
Sistema de geolocalización en tiempo real para activos militares en zonas de baja cobertura basado en LoRaWAN (DESEi+d, 2025: 38) 263
Diseño del sistema digital de entrenamiento de tripulación para la futura defensa naval europea (DESEi+d, 2025: 136) 265
BELLONA: LLMs y agentes IA para la generación de COAs en misiones militares (DESEi+d, 2025: 149) 267

CORSARIO (comunicaciones resilientes por satélite para ala rotatoria integradas y operativas) (DESEi+d, 2025: 218) 269

Implementación de un modelo de riesgos operacionales mediante un sistema *big data* de datos Metocean para su uso en operaciones navales (DESEi+d, 2025: 281) 271

Integración de códigos propelinear y *linear network coding* (DESEi+d, 2025: 291) 273

Implementación de telefonía inalámbrica en puestos de mando de brigada (DESEi+d, 2025: 27) 275

ARTS: sistemas de comunicaciones avanzados para plataformas aéreas (DESEi+d, 2025: 47) 277

Extensión de redes QKD a través de comunicaciones satelitales en entornos remotos (DESEi+d, 2025: 72) 279

Optimización de celdas receptoras nano-CMOS para antenas activas (DESEi+d, 2025: 113) 281

Análisis funcional para el diseño de pruebas de un sistema IoT portátil basado en LoRaWAN en entornos de baja cobertura (DESEi+d, 2025: 188) 283

Gestión de haz y control de topología en nubes de combate con enlaces directivos (DESEi+d, 2025: 215) 285

Computación precisa de la firma radar de grandes plataformas mediante M3 (DESEi+d, 2025: 11) 287

Aplicación de modelos subrogados basados en *deep learning* para la simulación y optimización de procesos complejos como el del acelerador de IFMIF-DONES (DESEi+d, 2025: 31) 289

Aplicación de modelos subrogados basados en *deep learning* para la aceleración de simulaciones de daños por irradiación (DESEi+d, 2025: 32) 291

Validación estructural de un compuesto de matriz cerámica (cordierita-rGO) como alternativa al soporte metálico de una lente de difracción para aplicaciones aeroespaciales (DESEi+d, 2025: 34) 293

Modelos digitales de fiabilidad para apoyo al ciclo de vida (DESEi+d, 2025: 68) 295

Digitalización y automatización de procesos productivos y de gestión en fábrica (DESEi+d, 2025: 79) 297

Efecto del estrés de combate en la memoria operativa del combatiente (DESEi+d, 2025: 90) 299
Simulación de alta fidelidad para sistemas de misiles: un enfoque modular y continuo (DESEi+d, 2025: 104) 301
Modelos de integración y operación de sistemas de almacenamiento de energía con grupos generadores en bases avanzadas: proyecto NOMAD (DESEi+d, 2025: 105) 303
Mantenimiento prescriptivo para vehículos militares usando técnicas de IA generativa (DESEi+d, 2025: 107) 305
Desarrollo de un entorno HWIL para la emulación del sistema pitot-estático en helicópteros (DESEi+d, 2025: 118) 307
Generación de escenarios para simulación de emergencias a partir de datos públicos (DESEi+d, 2025: 139) 309
Navegación autónoma en terrenos complejos (DESEi+d, 2025: 142) 311
Diseño de un casco hidrodinámico para vehículo submarino autónomo modular en las Fuerzas Armadas (DESEi+d, 2025: 158) 313
Interacción humano-robot y formación en el ámbito militar: una revisión de los avances y retos actuales (DESEi+d, 2025: 165) 315
Diseño de la cadena de transmisión de una antena activa matricial en la banda K (DESEi+d, 2025: 190) 317
Análisis comparativo mediante simulación de sistemas de fondeo para plataformas solares flotantes en aguas someras (DESEi+d, 2025: 211) 319
Automatización y simulación avanzada de escenarios GNSS para evaluación de interferencias (DESEi+d, 2025: 262) 321
Desarrollo integral de sistemas de control y guiado para UAVs basados en control predictivo: una aproximación multiplataforma desde la simulación hasta el vuelo autónomo (DESEi+d, 2025: 275) 323
Simulación inmersiva de adiestramiento táctico para Infantería de Marina mediante realidad virtual (DESEi+d, 2025: 268) 325
Hacia la redefinición del segundo: desarrollo de un reloj atómico óptico en el ROA (DESEi+d, 2025: 289) 327
Visualización de datos AIS en tiempo real mediante realidad aumentada (DESEi+d, 2025: 301) 329

NME-DEFCON. Modelo neuroeconómico conductual para la anticipación de guerras psicológicas económicas encubiertas. Propuesta estratégica para la defensa cognitiva nacional (DESEi+d, 2025: 53) 331

Toma de decisiones de sostenimiento utilizando IA generativa (DESEi+d, 2025: 67) 333

STORE, la plataforma europea para el desarrollo colaborativo de IA militar para la defensa del futuro (DESEi+d, 2025: 83) 335

Aplicación para desarrollo y gestión de planes de estudios de la defensa (DESEi+d, 2025: 95) 337

La Armada presenta el asistente virtual COCO con inteligencia artificial generativa para resolver preguntas administrativas de los militares (DESEi+d, 2025: 98) 339

IntSen^2: extracción automática en baja resolución para la construcción de sistemas IMINT proactivos (DESEi+d, 2025: 99) 341

Análisis y desarrollo de un sistema de detección de minidrones mediante radar pasivo basado en señales de DVB-T (DESEi+d, 2025: 103) 343

¿Te fías de lo que lees? Desafíos en la detección de texto artificial en la era de la inteligencia artificial (DESEi+d, 2025: 122) 345

Transformando el análisis de datos en sistemas de defensa aéreos: plataforma TSAS-M (DESEi+d, 2025: 125) 347

Georregistro robusto de imágenes aéreas mediante visión artificial (DESEi+d, 2025: 154) 349

Diseño e implementación de una red de mando y control para la Armada basada en Meshtastic (DESEi+d, 2025: 155) 351

Arquitectura en cascada para mantenimiento predictivo robusto en entornos críticos (DESEi+d, 2025: 159) 353

IDEPAR en los ensayos PARMESTO organizados por el set-320 de la OTAN (DESEi+d, 2025: 195) 355

Sistema de gestión de riesgos dinámicos en entornos operacionales multidominio (DESEi+d, 2025: 214) 357

Clasificación de UAS basado en inteligencia artificial para dar soporte a sistemas de defensa antiaérea (DESEi+d, 2025: 227) 359

Estudio de técnicas de aprendizaje profundo aplicado a la evaluación de la amenaza en sistemas navales (DESEi+d, 2025: 228) 361

Análisis y diseño de metasuperficies planas y conformadas para baja observabilidad (DESEi+d, 2025: 229) 363

IMAGIA. Inteligencia artificial para la inspección de ensayos no destructivos por ultrasonidos (DESEi+d, 2025: 239) 365

Predicción de tipo de buque a partir de datos AIS utilizando técnicas de aprendizaje automático supervisado (DESEi+d, 2025: 284) 367

ÁREA 12. Ciberdefensa 369

Prototipo de laboratorio para la segurización de infraestructuras IoT y automatización de escenarios de ciberataque (DESEi+d, 2025: 18) 371

Propuesta de un modelo mixto de *dataset* normalidad-anomalía para la detección de ciberataques (DESEi+d, 2025: 59) 373

Tecnolgías *doud* para simulación de pruebas de ciberresiliencia (DESEi+d, 2025: 77) 375

IA generativa y ciberseguridad: datos sintéticos para defensa y desafíos éticos (DESEi+d, 2025: 116) 377

Plataforma virtual de gestión de evidencia para la validación de pruebas electrónicas (DESEi+d, 2025: 197) 379

Generación automática de patrones de detección no supervisados para la ciberdefensa en entornos OT críticos (DESEi+d, 2025: 213) 381

Desafíos y soluciones en seguridad, privacidad y ciberseguridad en drones y sistemas RPAS (DESEi+d, 2025: 36) 383

Avances de las tecnologías cuánticas en defensa: oportunidades, vulnerabilidades y desafíos de seguridad (DESEi+d, 2025: 146) 385

La protección de una infraestructura crítica portuaria garantiza el desarrollo socioeconómico (DESEi+d, 2025: 212) 387

Modernización y prevención de vulnerabilidades en aplicaciones críticas mediante migración con inteligencia artificial generativa (DESEi+d, 2025: 209) 389

Optimización de PUFs para mejorar la autenticación de dispositivos en redes UAV (DESEi+d, 2025: 202) 391

PQC y QKD: una solución híbrida para la mejora de la seguridad en las comunicaciones en el ámbito militar (DESEi+d, 2025: 242) 393

Reforzando las bases criptográficas en sistemas de defensa para la era poscuántica (DESEi+d, 2025: 256) 395
Escenario de alta seguridad en MadQCI-UPM (DESEi+d, 2025: 285) 397

ÁREA 13. Sociedad, economía y humanidades 399

¿Se evaluan bien los criterios de valoración en una licitación pública? Propuesta de un nuevo método de apoyo a la decisión utilizando AHP para evaluar los criterios de valoración de un PCAP (DESEi+d, 2025: 13) 401
Analyzing the impact of geopolitical risk and economic policy uncertainty on defence spending in Spain (DESEi+d, 2025: 89) 403
Desde la detección de una amenaza hasta el desarrollo de programas formativos. El caso de la ciberseguridad en dos países europeos: España y Francia (DESEi+d, 2025: 6) 405
Liderazgo de servicio, identidad grupal y capital psicológico positivo en organizaciones de defensa y seguridad (DESEi+d, 2025: 28) 407
Implementación y evaluación de metodologías activas híbridas para la formación en competencias técnicas en el ámbito de la defensa y seguridad (DESEi+d, 2025: 137) 409
Simulación estratégica de seguridad y defensa en la OTAN: innovación docente aplicada al aprendizaje activo en contextos militares (DESEi+d, 2025: 290) 411
Identificación de tipos de combustible forestal en el CENAD San Gregorio mediante sensores satelitales activos y pasivos (DESEi+d, 2025: 216) 413
Tipos de liderazgo a través de héroes de la historia militar española (DESEi+d, 2025: 14) 415
Más allá de la teoría: liderazgo aplicado en la Academia General Militar (DESEi+d, 2025: 19) 417
Caso de éxito para la creación de una Oficina de Gestión de Proyectos TIC aplicable a defensa y seguridad (DESEi+d, 2025: 87) 419

ÁREA 14. Eficiencia energética y sostenibilidad 421

Modelo de optimización con variables binarias para la obtención de trayectorias de mínimo consumo (DESEi+d, 2025: 22) 423

Producción de combustibles estratégicos para las Fuerzas Armadas a partir de NFU: Un modelo para la resiliencia energética y la defensa nacional (DESEi+d, 2025: 54) 425

Estudio de velas aeronáuticas para aplicaciones navales (DESEi+d, 2025: 64) 427

Evaluación y optimización de la gestión de residuos sólidos en las fragatas F-100 de la Armada española (DESEi+d, 2025: 73) 429

Estructura de las membranas de intercambio aniónicas y mecanismo de difusión (DESEi+d, 2025: 91) 431

Generación de calor de proceso mediante un sistema portátil de concentración solar (DESEi+d, 2025: 101) 433

Climatización eficiente para zonas de operaciones: diseño, fabricación aditiva y pruebas de un evaporador indirecto de cobre (DESEi+d, 2025: 131) 435

Actuaciones de eficiencia energética en la base naval de Rota (DESEi+d, 2025: 134) 437

NEBULA: inteligencia distribuida para analítica energética en instalaciones militares (DESEi+d, 2025: 150) 439

Ingeniería enzimática con IA para el desarrollo de recubrimientos avanzados en plataformas de defensa (DESEi+d, 2025: 168) 441

Desarrollo asistido por IA de nuevos electrolitos para aumentar la seguridad y durabilidad energética en plataformas móviles (DESEi+d, 2025: 171) 443

Gemelos digitales para estructuras navales, anticipando la corrosión con inteligencia artificial (DESEi+d, 2025: 172) 445

Optimización energética de escorias industriales mediante IA para mejorar la eficiencia energética en sistemas de defensa (DESEi+d, 2025: 173) 447

Desarrollo de polímeros avanzados para estructuras ligeras y resistentes para aplicaciones aeroespaciales de defensa (DESEi+d, 2025: 174) 449

Nanotecnología: un pilar estratégico para la autonomía energética y la geopolítica de los metales críticos (DESEi+d, 2025: 179) 451

Baterías de flujo: almacenamiento energético fiable y eficiente de larga duración (DESEi+d, 2025: 200) 453

Maximizando la eficiencia energética de módulos habitables construidos con base en contenedores (DESEi+d, 2025: 204) 455

Plataforma COOL EDGE-TOP ECO CLOUD (DESEi+d, 2025: 207) 457
Proyecto NOMAD: avances y desafíos en el ecuador del proyecto (DESEi+d, 2025: 244) 459
Sensores LiDAR para operaciones 24/7: mejora de la sensibilidad espectral en aplicaciones de defensa (DESEi+d, 2025: 249) 461
Proyecto ELECTRA: electrificación de componentes propulsivos en aeronaves (DESEi+d, 2025: 253) 463
PULSMES: desarrollo de un sistema pulsado de alta potencia basado en SMES (DESEi+d, 2025: 270) 465
Gemelo digital energético como motor de la eficiencia energética y sostenibilidad, su aplicación en sectores críticos productivos y su proyección a defensa (DESEi+d, 2025: 280) 467
Hacia una Armada eficiente y competitiva: el desafío de España en el horizonte 2045 (DESEi+d, 2025: 288) 469
Predicción de la inmisión de gas radón en edificios mediante modelos de inteligencia artificial (DESEi+d, 2025:295) 471
Mitigación de radón en edificios mediante estrategias de ventilación energéticamente eficientes (DESEi+d, 2025: 299) 473
Cinética de adsorción en interfaces sólido-líquido en catálisis heterogénea y electrocatálisis para combustibles sintéticos (DESEi+d, 2025: 75) 475
Sensórica avanzada e IA para caracterización *in situ* de materiales locales idóneos para infraestructura militar (DESEi+d, 2025: 120) 477
DED-lw + SLA solución para reparación en piezas sometidas a alta presión y desgaste de forma inmediata (DESEi+d, 2025: 162) 479
Remediacion de suelos contaminados por actividades militares mediante bioingeniería y bioadsorbentes: una estrategia de sellado y reduccion de la biodisponibilidad de HAP (DESEi+d, 2025: 164) 481
Evaluación del potencial del HVO como combustible sostenible en lanchas de instrucción de la Armada (DESEi+d, 2025: 231) 483
Aplicación de baterías de aluminio-ion para la optimización energética en campamentos militares desplegables (DESEi+d, 2025: 254) 485
ECOBALLIFE: desarrollo de sistemas de protección balística sostenibles (DESEi+d, 2025: 271) 487

Optimización del tratamiento de aguas residuales de buques mediante tecnologías avanzadas de adsorción y oxidación (DESEi+d, 2025: 278)..... 489
Propulsión naval sostenible: estudio de viabilidad tecno-económica para su implantación en la Armada (DESEi+d, 2025: 282)..... 491
Análisis integral de las aguas residuales generadas en buques de la Armada: caracterización y eficacia de diferentes sistemas de depuración (DESEi+d, 2025: 296)..... 493
Eliminación de contaminantes en medios acuosos mediante filtros poliméricos dopados con algas (DESEi+d, 2025: 297)..... 495

PRESENTACIÓN LIBRO DE RESÚMENES DESEi+d 2025

La XII edición del Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad de este 2025 se celebra durante los días 11, 12 y 13 de noviembre en Zamora. Este congreso, cuya vocación itinerante tiene como objeto hacer partícipes de los proyectos de I+D+i a las universidades, centros de investigación y empresas de las distintas zonas de España, es organizado conjuntamente por la Dirección General de Reclutamiento y Enseñanza Militar (DIGEREM) y la Dirección General de Estrategia e Innovación de la Industria de Defensa (DIGEID), a través de sus respectivas subdirecciones generales; la Subdirección General de Enseñanza Militar y la Subdirección General de Planificación, Tecnología e Innovación, junto con los Centros Universitarios de Defensa e ISDEFE (Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España).

Actualmente, la vinculación del Ministerio de Defensa (MDEF) con la provincia de Zamora pasa por el proyecto del Ejército de Tierra en la localidad de Monte la Reina (Toro), en el marco del cual se firmó un convenio entre el Ministerio de Defensa, a través de la empresa de ISDEFE, y la Universidad de Salamanca, para posibilitar la realización conjunta de actividades y proyectos que contribuyan al desarrollo científico y tecnológico en el área de la sostenibilidad y eficiencia energética en defensa.

Esta edición del DESEi+d 2025 promulga una I+D+i como motor de dicha sostenibilidad y eficiencia energética en el ámbito de la defensa y,

de entre las actividades a desarrollar, como es habitual, están las exposiciones de comunicaciones, la realización de tres mesas plenarias, la entrega de los premios ISDEFE y la celebración de actividades sociales y culturales. Continuando con la novedad de la edición pasada, dentro del «Espacio Innovación», habrá un espacio dedicado a la presentación de actividades de innovación en las Fuerzas Armadas y su aportación a la UE y OTAN, junto con la entrega del Premio Innovación FEINDEF, además de expositores y zonas de reunión para *start-ups*.

Como en las ediciones anteriores, el DESEi+d se constituye como un magnífico foro para compartir conocimiento y avances científicos en apoyo a la innovación y el desarrollo tecnológico aplicado a la defensa y seguridad del país. Del mismo modo, es una magnífica oportunidad para destacar programas emblemáticos del Ministerio de Defensa en los que se ve materializada su capacidad de desarrollo e innovación en campos tan diversos como la eficiencia energética y la sostenibilidad, que este año se ha constituido en una nueva área temática que aúna las comunicaciones que se presentan sobre este ámbito.

El creciente interés y nivel de participación en las ediciones anteriores, junto con la progresiva demanda de intercambio de conocimiento y avances técnicos en campos tan diversos como el de la eficiencia energética y la sostenibilidad, nos animan a predecir que esta edición se va a erigir como un escenario destacado de intercambio de información y de la investigación entre los diversos actores que lo conforman. Y, como anticipo, se presenta este libro en el que se exponen los 224 resúmenes de las comunicaciones seleccionadas para esta edición por el Comité Científico, encontrándose agrupadas según las catorce diferentes áreas temáticas del congreso. Cabe reseñar que este número supone un incremento notable de comunicaciones presentadas respecto a ediciones anteriores, lo que demuestra el creciente interés que suscita este congreso.

Desde el Comité Organizador queremos agradecer a todos ustedes su asistencia y participación, y les deseamos el máximo aprovechamiento de esta XII edición.

Comité Organizador DESEi+d 2025

Comité Director y Científico

Comité Director (CODIR)

El Comité Director (CODIR) se constituye como órgano de apoyo a la dirección y organización del congreso.

- Presidente. Subdirector general de Enseñanza Militar, general de brigada Juan Manuel Sánchez Aldao
- Vicepresidente. SDG de Planificación, Tecnología e Innovación, vicealmirante Fernando Suárez Fonseca
- Vocal, director del CUD Zaragoza, Francisco José Gómez Ramos
- Vocal, director del CUD Marín, José Martín Dávila
- Vocal, director del CUD San Javier, Carmelo Nicolás Madrid García
- Vocal, director del CUD Madrid, Natalio Antonio García Honduvilla
- Vocal, representante de ISDEFE, Ildefonso Vera Gómez
- Secretario, coronel Fernando Díaz García

Comité Científico (COCIEN)

Su misión principal será coordinar la revisión, clasificación, análisis y evaluación de los artículos técnicos recibidos.

- Presidencia CUD ENM, María Álvarez Hernández
- Vocal SDG PLATIN, Óscar Jiménez Mateo
- Vocal CUD AGA, María Teresa Martínez Inglés
- Vocal CUD AGA, David Sebastián Martínez Hernández
- Vocal CUD ACD, Natalio Antonio García Honduvilla
- Vocal CUD AGM, Óscar de la Iglesia Pedraza
- Vocal ISDEFE, Eva de Íscar Camacho
- Vocal Gabinete ministra de Defensa, Elena González Toril
- Secretario CUD ENM, José M.ª Núñez Ortuño

ÁREA 1

Armas y municiones

Proyecto ACUS: desarrollo de tobera MOC para propulsión sostenible (DESEi+d, 2025: 40)

Javier Mateos Seirul-lo (Universidad Carlos III, UC3M), David Chimeno Saavedra (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Irene Velasco Suárez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Raúl López Sánchez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) y Andrea Ianiro (Universidad Carlos III UC3M).

El presente manuscrito describe el diseño de una tobera para un microcohete destinado al armado de un RPAS. La tobera se ha desarrollado utilizando el método de características (MOC), lo que permite lograr una expansión ideal del fluido en la sección divergente de esta hasta alcanzar las condiciones ambientales. A diferencia de los diseños convencionales de geometría cónica, el diseño basado en el MOC genera un flujo axial a la salida que evita la formación de ondas de choque internas y, en consecuencia, mejora la eficiencia del sistema en un rango entre el 2% y el 13%. Esta mejora se traduce en una reducción del consumo de combustible y, por tanto, para un rendimiento equivalente, en una disminución de las emisiones. A lo largo del documento se exponen consideraciones sobre el diseño, abarcando tanto las condiciones de estrangulamiento en la garganta como la relación de expansión y el contorno de la tobera, además del análisis del desempeño obtenido y las aplicaciones potenciales del diseño MOC propuesto para un sistema de propulsión, resaltando su

contribución a la optimización de las capacidades estratégicas y a la sostenibilidad operativa de los RPAS militares.

Proyecto ACUS: inhibición en propulsantes nitrocelulósicos (DESEi+d, 2025: 56)

Raúl López Sánchez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), David Chimeno Saavedra (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Mario Martínez Sánchez (Universidad Rey Juan Carlos, URJC), Alicia Salazar López (Universidad Rey Juan Carlos, URJC) y Jesus Rodríguez Pérez (Universidad Rey Juan Carlos, URJC).

En los motores de propulsante sólido, la inhibición del grano cumple la función de limitar su superficie combustible, asegurando una progresión controlada de la combustión. Sin embargo, la deficiente adherencia entre el inhibidor y el propulsante es un proceso indeseable, conocido como *debonding*, que constituye una de las principales causas de fallo estructural del motor durante su lanzamiento por el aumento súbito que causa en la superficie expuesta, pudiendo causar fenómenos de combustión inestable. A lo largo del presente trabajo se evalúan experimentalmente dos sistemas de inhibición para doble base, DB. La primera formulación del inhibidor se ha basado en una resina de poliéster convencional, reforzada con fibra de vidrio, observándose serios problemas de adhesión. En segundo lugar, se presenta un sistema que ofrece adherencia mejorada, con la misma resina de poliéster cargada con litopón. La adherencia se mejora drásticamente por un proceso previo de imprimación basado en isocianatos. Los isocianatos son capaces de reaccionar con los grupos -OH de la nitrocelulosa, por su incompleta nitración, incrementando el

porcentaje de enlaces covalentes entre la inhibición y el propulsante de DB. Para cuantificar la resistencia de esta unión, se han realizado ensayos de tracción normalizados según la ASTM C633-13 (2021). Esta mejora en la adhesión permite incrementar tanto la seguridad como la fiabilidad en motores de doble base de fabricación propia, especialmente durante su encendido, donde las solicitaciones mecánicas son elevadas.

Empleo de modelos de aprendizaje fundacionales para la caracterización de disparos: un enfoque de aprendizaje autosupervisado (DESEi+d, 2025: 60)

Lucía Cristina Martín Pérez (ISDEFE), Carlos Roberto del Blanco (Universidad Politécnica de Madrid), Jesús Ángel Alierta Nicodemus (Dirección de Ingeniería del Mando de Apoyo Logístico. Ejército de Tierra. Ministerio de Defensa) y Alfonso Cepeda Caballos (Dirección de Ingeniería del Mando de Apoyo Logístico. Ejército de Tierra. Ministerio de Defensa).

En las últimas décadas, dentro del dominio de las mediciones ciberfísicas y la inteligencia de firma (MASINT, por sus siglas en inglés), ha habido un creciente interés en la caracterización de los disparos de armas en entornos civiles y militares motivado por la proliferación del internet de las cosas (IoT) y la inteligencia artificial. La caracterización de la señal producida al disparar un arma de fuego puede considerarse como la tarea de detectar, identificar y clasificar cuándo se ha producido el disparo, ya que durante la operación se producen diferentes sonidos y vibraciones, lo que tiene varias aplicaciones en la ciencia forense, la aplicación de la ley y las aplicaciones militares. Un reto acuciante para la caracterización de disparos es la escasa disponibilidad de conjuntos de datos robustos y de alta calidad que contengan datos etiquetados de múltiples tipos de armas de fuego, necesarios para entrenar los modelos de aprendizaje profundo

que intervienen en los sistemas de detección y reconocimiento de disparos. La reciente aparición de modelos fundacionales de aprendizaje profundo, que son grandes redes neuronales entrenadas sobre bases de datos de diferentes dominios, escenarios y contextos, ha aliviado el requisito de grandes volúmenes de datos etiquetados para el entrenamiento de una aplicación concreta, ya que el modelo objetivo puede aprovechar el conocimiento general del modelo fundacional. Sin embargo, aún no existen trabajos centrados en cómo aplicar y adaptar modelos fundacionales al campo de la detección y reconocimiento de disparos. Este trabajo pretende aprovechar los modelos fundacionales de audio basados en aprendizaje autosupervisado para caracterizar las señales de sonido de los disparos mediante el uso de esquemas de aprendizaje autosupervisado a través de diferentes algoritmos de audio. El sistema de reconocimiento tendrá en cuenta distintos tipos de perturbaciones, como la variación del tono o el timbre, las condiciones ambientales, la distancia del arma a la fuente de captación o la forma en la que se está disparando. Para ello, se emplea un conjunto de datos balísticos formado por archivos de audio que capturan disparos efectuados por cuatro armas de fuego con diferentes modos de disparo del arma: disparo único, disparo múltiple y disparo rápido.

Modeling of devices for combating IEDs using high-velocity water projection (DESEi+d, 2025: 62)

Joaquín Sancho Val (Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza), José Francisco Ródenas García (Cuerpo Nacional de Policía, CNP), Lourdes Martínez de Baños Martínez Morentin (Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza), Otón Martínez Ramón (Centro Universitario de la Defensa de San Javier), Javier Pascual Aranzana (Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza) y Óscar de Francisco Ortiz (Universidad Politécnica de Cartagena).

The persistent threat posed by improvised explosive devices (IEDs) in both military and civilian contexts necessitates the development of advanced counter-IED technologies. Among the emerging solutions, high-velocity water projection systems have gained attention due to their potential to neutralize IEDs safely, effectively, and without triggering detonation. This research explores the modeling and simulation of devices designed to combat IEDs through the application of high-speed water jets, focusing on their mechanical, hydrodynamic, and operational characteristics.

The study presents a multidisciplinary approach that integrates fluid dynamics, impact mechanics, and system design to evaluate the effectiveness of water jet projection against various types of IEDs. Computational fluid dynamics (CFD) models are employed to simulate the behavior of water jets under different pressure regimes, nozzle geometries, and

standoff distances. These simulations are coupled with structural models of representative IED configurations to analyze penetration capabilities, disruption efficiency, and potential collateral effects.

The research also investigates the influence of water jet parameters —such as velocity, coherence, and droplet size— on the disruption of critical IED components, including detonators, firing circuits, and triggering mechanisms. Results indicate that precise targeting with ultra-high-pressure water jets can disable IEDs without initiating an explosive reaction, especially when applied to exposed or vulnerable areas of the device. Furthermore, the study examines the role of automated targeting and robotic delivery platforms, which enhance operational safety by allowing remote deployment in hazardous environments.

Prototypes based on the modeled designs are validated through controlled field tests, providing empirical support for the simulation results. These tests reveal that water-based neutralization offers a low-risk, cost-effective alternative to traditional explosive or mechanical disruption methods, with minimal environmental impact and increased applicability in urban and populated areas.

This research contributes to the advancement of non-lethal counter-IED technologies and provides a framework for further development of high-velocity water projection systems. By combining rigorous modeling with practical experimentation, it lays the groundwork for scalable and adaptable solutions capable of addressing the evolving threat of IEDs in diverse operational scenarios.

Simulación numérica de la suelta de una bomba GBU-12 con despliegue simultáneo de las aletas durante la misma (DESEi+d, 2025: 65)

Leo M. González Gutiérrez (Universidad Politécnica de Madrid), Javier Capel Jorquera (Universidad Politécnica de Madrid), Eusebio Valero Sánchez (Universidad Politécnica de Madrid), Rafael Gómez Blanco (Mando del Apoyo Logístico del Ejercito, MALOG) y Ramón Lacruz Alcazar (Mando del Apoyo Logístico del Ejercito, MALOG).

En este trabajo se presentan parte de los resultados de una colaboración que se está llevando a cabo entre el Mando del Apoyo Logístico del Ejercito (MALOG) y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). En él se resalta la importancia de poder realizar un cálculo preciso de la evolución del proceso de suelta de una bomba tipo GBU-12 en los instantes iniciales desde una aeronave en vuelo, la cual se basa en poder garantizar que dicha suelta sea segura para la aeronave y que la carga no tenga una dinámica que resulte en un impacto con la misma, lo que afectaría negativamente a la seguridad de vuelo.

La geometría completa incluye parte del ala de un F-18, un depósito exterior de combustible y una bomba GBU-12 con sus respectivos pilones y un soporte de eyección simplificado. La GBU-12 cuenta con un conjunto de aletas en la parte trasera con el fin de proporcionar sustentación

y estabilidad aerodinámica. El proceso de liberación de armas guiadas como la GBU-12 desde una aeronave es complejo debido al movimiento y despliegue de superficies de control, como los *canards* móviles, el *seeker* y las aletas. En este trabajo, únicamente se asumirá un movimiento en las aletas traseras.

Dos fuerzas eyectoras se ocupan del proceso de la suelta, siendo el Ejército del Aire quien proporcionó la evolución temporal de dicha fuerza. Esta curva fue modelada matemáticamente, con el fin de obtener una expresión analítica final que se utilizó en herramienta computacional de este equipo.

La parte más sobresaliente del trabajo es el uso de mallas superpuestas (*overset meshes*) elaboradas sobre geometrías tan complejas como las que resultan de una GBU y sus respectivas aletas móviles. Es importante resaltar que hay hasta tres mallas en juego, en primer lugar, está la del ala del avión, en segundo lugar, la malla de la GBU que será soltada del ala y, por último, la malla de las aletas que se desplegarán en la GBU durante la suelta. Para que la evolución numérica entre ambas mallas sea adecuada y puedan intercambiar información correctamente, el tamaño de las celdas de ambas mallas en los volúmenes de intersección debe ser similar.

En este trabajo se presentarán las fuerzas aerodinámicas que siente la GBU durante la suelta y el despliegue de las aletas, así como la monitorización del movimiento de su centro de gravedad y giros durante los primeros instantes de lanzamiento.

Municiones merodeadoras: desarrollo y aplicación de una metodología de calificación basada en el programa de evaluación de S3 (DESEi+d, 2025: 88)

Irene Velasco (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Fernando Martínez de Castro (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) y Raúl López Sánchez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA).

La complejidad tecnológica y el entorno operativo asociado a los denominados sistemas de munición merodeadora conllevan numerosos desafíos, vinculados a la evaluación de la seguridad e idoneidad en servicio (S3 por sus siglas en inglés, *safety and suitability for service*). Precisamente, es el carácter innovador de este tipo de armamento, así como su naturaleza ligada a los sistemas aéreos remotamente pilotados (RPAS), lo que ha motivado la necesidad de explorar nuevas rutas de calificación, en aras de verificar la integridad operativa de estos revolucionarios sistemas. El presente artículo describe el desarrollo de una metodología aplicable a las municiones merodeadoras, con el propósito de concebir una guía de homologación y calificación para este modelo de sistemas. La metodología propuesta tiene como pilar fundamental garantizar la seguridad en servicio de este tipo de armamento, en ausencia de estándares específicos. Asimismo, se presenta un caso de estudio nacional: el sistema Q-SLAM 40. Se define un ciclo de vida genérico compatible con

los sistemas de munición merodeadora de un solo ataque y portátiles. Además, se plantea un diagrama de flujo del programa de evaluación S3 aplicado a dicha munición, con el objetivo de analizar la integridad operativa de cada uno de los subsistemas durante las fases de lanzamiento, crucero, guiado terminal y neutralización, garantizando que se cumplen las tasas de armado inintencionado recomendadas. El estudio tiene como resultado el desarrollo de una prometedora metodología basada en la aplicación de estándares existentes, que permite una evaluación detallada de los sistemas de munición merodeadora. El método propuesto permite identificar los requisitos de seguridad estrictamente necesarios en función de las prestaciones del sistema, minimizando el impacto económico y temporal de la calificación en el producto final. Esta metodología no solo permite asegurar el progreso continuo de estos sistemas, sino que también facilita una respuesta ágil y eficaz ante el dinámico escenario internacional.

Propulsantes verdes: una alternativa sostenible en el campo de los propulsantes sólidos composite (DESEi+d, 2025: 119)

David Chimeno Saavedra (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Daniel Pellico Escudero (ISDEFE), David Baza Herrero (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Raúl López Sánchez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) y Jesús Rodríguez Pérez (Universidad Rey Juan Carlos).

La actual situación geopolítica ha supuesto un drástico aumento en la producción de munición de casi cualquier tipo. La fabricación de propulsantes no ha sido ajena a esta realidad. El propulsante sólido más habitual, particularmente en grandes calibres, es el composite basado en polibutadieno hidroxiterminal (HTPB) y perclorato amónico (PA) debido a su buen rendimiento balístico y su bajo coste. Sin embargo, la pluma de combustión generada no tiene tan buen historial en cuanto a toxicidad, corrosión e impacto en el medioambiente. La combustión del propulsante composite basado en PA genera un humo blanco que contiene, entre otros, cloruro de hidrógeno (HCl). Este hecho, contribuye de forma negativa desde una perspectiva ambiental (lluvia ácida) y operacional debido a la dificultad de ocultación (firma) y a la degradación por corrosión de las plataformas de lanzamiento. La continua preocupación por procesos menos contaminantes, sumado a la creciente necesidad de fabricación, pone de manifiesto la importancia de la fabricación de propulsantes libres

de HCl o propulsantes verdes. En este trabajo se muestran los primeros pasos en el desarrollo de propulsantes verdes. Desde una actuación ligera que consiste en la sustitución de forma parcial de un porcentaje de PA por nitroaminas como el octógeno (HMX) o hexógeno (RDX) hasta una actuación más drástica que consiste en la sustitución total del PA por 2,2,2-*trinitroethyl formate* (TNEF). La síntesis del TNEF supone un reto en si misma y su posterior empleo como oxidante en la composición del propulsante aumenta dicha perspectiva. La aplicación práctica de este trabajo pretende estudiar las diferencias existentes en la combustión del composite tradicional y las dos nuevas propuestas más respetuosas con el medioambiente y que parecen mantener el impulso específico y la velocidad de combustión. Para ello se caracterizará la descomposición mediante técnicas calorimétricas (TGA), se comparará la velocidad de combustión para las tres muestras de propulsante y se determinará el impulso específico entregado mediante el empleo del *software* ProPep.

Evaluación del riesgo asociado a ensayo con cargas explosivas (DESEi+d, 2025: 180)

Iván Gil Garnacho (INTA), Francisco Raúl Alegria Morato (INTA), José Antonio Provencio Martín (INTA) y Pedro Gaspar Rosado (INTA).

El Área de Balística de Efectos y Detónica de la Subdirección de Sistemas Terrestres del INTA tiene entre sus actividades principales: 1) Realizar pruebas de vigilancia sobre municiones, sistema de armas, artefactos y artificios, etc. para los Ejércitos y la Armada; 2) Realizar pruebas de clasificación para el transporte y almacenamiento de mercancías peligrosas (clasificación UN para el transporte para municiones y sistema de armas); 3) Realizar pruebas de insensibilidad de munición (IM); 4) Realizar pruebas de caracterización de municiones, sistema de armas, artefactos y artificios, etc.; 5) Realizar pruebas de vulnerabilidad de plataformas vehiculares (según STANAG 4569); 6) Pruebas de vulnerabilidad de infraestructuras (según STANAG 2280). Todas estas actividades presentan como denominador común la utilización de cargas explosivas, cuyos efectos derivados —fragmentación, presión, gases, radiación, *flash*, etc.— suponen un riesgo para el personal y las edificaciones de la subdirección, y desde el área se tienen que analizar antes de cada prueba para garantizar la seguridad. La ponencia que se propone es mostrar cómo se ejecuta un caso práctico, cómo el Área de Balística ha realizado un análisis de riesgo en sus instalaciones para definir la carga máxima de explosivo desnudo que puede detonar en una de sus zonas de ensayo, la denominada «plaza

balística». Para ello, primero realiza un estudio teórico basado en algoritmos/correlaciones (Kingeri y Bulmash) típicamente empleadas para la determinación del mapa de presiones, en concreto se aplica a cargas explosivas de 15, 20, 25 y 30 kg de TNT.

En segundo lugar, se realiza un estudio teórico de riesgo frente a la detonación de cargas de 15, 20, 25 y 30 kg de TNT, basándose en los expuesto en bibliografía especializada (véase Technical Paper 14. *Approved methods and algorithms for DoD risk-based explosives siting*. Department of Defense Explosives Safety Board).

Por último, se ejecutan ensayos de campo con diferentes cargas explosivas de 15, 20, 25 y 30 kg de TNT, con sus instalaciones sensorizadas para el registro de presiones, de modo que se pueda evaluar la capacidad de los algoritmos/correlaciones (Kingeri y Bulmash) para predecir presiones a determinadas distancias y, de este modo, dar validez al cálculo de riesgo.

Modelado y simulación de misiles antiaéreos. Aplicación de la ley de navegación proporcional ante amenazas hiperveloces (DESEi+d, 2025: 287)

Alfonso Juan Majadas Díez (Escuela Politécnica Superior del Ejército), Antonio Cantero Obregón (Escuela Politécnica Superior del Ejército) y Guillermo Jenaro de Mencos (Ejército de Tierra).

Los nuevos avances en materia de misiles originan la necesidad del correspondiente desarrollo de la defensa antiaérea. En los últimos años, se están desarrollando varios planes nacionales en el mundo enfocados en el diseño y construcción de misiles híper veloces. Por ello, este artículo, propone una forma de evaluar el comportamiento de un misil de intercepción ante este tipo de amenazas. Para este fin, se compara el comportamiento de este con el que ya tiene cuando se enfrenta a amenazas convencionales (subsónicas y súpersónicas). El trabajo se fundamenta, por tanto, en la aplicación de modelos matemáticos que expongan esta casuística, basados en la ley de navegación proporcional. Esto se ha realizado utilizando la herramienta MatLab, apoyada en un posprocesado de los datos mediante MS Excel. Las herramientas diseñadas permiten desarrollar múltiples casos bidimensionales de enfrentamiento misil-objetivo de forma sencilla, obteniendo resultados gráficos y numéricos analizables después. En este trabajo, esto se ha empleado concretamente, primero

para analizar el comportamiento del misil de intercepción ante amenazas subsónicas, súpersónicas e hípersónicas con base en el error de paso y a la aceleración lateral máxima comandada. A continuación, se ha analizado cuál sería la distancia de detección mínima que debería tener el sistema antiaéreo a fin de tener posibilidad de éxito en la intercepción. Finalmente, se ha planteado el enfrentamiento entre el misil y una amenaza hipersónica en trayectoria variable, basado en distancias de intercepción y altura de vuelo altamente demandantes y estudiadas previamente.

Diseño de sistemas de suelta segura para integración de armamento en RPAS (DESEi+d, 2025: 176)

Fernando Martínez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Irene Velasco (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Manuel Alejandro Carmona (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) y Raúl López (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA).

Dentro del ámbito de armado de vehículos no tripulados, RPAS (*remotely piloted aircraft systems*), la capacidad de suelta segura (*jettison*) del armamento es de vital importancia para garantizar la seguridad de la operación, y es el objeto de análisis del trabajo que se expone. La normativa vigente establece estrictos requisitos para la integración de armamento, exigiendo soluciones que mitiguen riesgos en situaciones de emergencia o mal funcionamiento del sistema de armas. Además, dichas soluciones deben ser efectivas en toda la envolvente de vuelo de la aeronave. En este artículo se presentan diferentes soluciones para la instalación de un sistema de suelta segura que permita la integración de armamento en RPAS con limitada carga de pago, aquellos catalogados como Class I mini de hasta 25 kg. En particular, se lleva a cabo un análisis comparativo entre los sistemas de anclaje de armamento que emplean bulones desplazables mediante mecanismos pirotécnicos y aquellos que utilizan filamentos de alta resistencia, con el fin de evaluar su comportamiento bajo diferentes escenarios de carga. El primer sistema de liberación analizado emplea un

bulón desplazable activado por un mecanismo pirotécnico. Este bulón actúa como elemento de unión entre la subestructura fija del RPAS y el herraje de anclaje del armamento. Su activación provoca el desplazamiento del bulón y, en consecuencia, el desprendimiento conjunto herraje-armamento. Por otro lado, se analiza un sistema de anclaje desprendible en el que el armamento se fija a través de un filamento de alta resistencia que une el herraje a la subestructura del RPAS. Durante el proceso de liberación, el filamento es fundido intencionadamente, lo que permite el desprendimiento controlado del armamento. Los filamentos evaluados corresponden a dos tipos: un cable metálico y un filamento compuesto de fibras de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW). El diseño se centra en asegurar la liberación para una determinada carga, minimizando la masa del anclaje y la inducción de aceleraciones indeseadas en el RPAS y evitando las proyecciones de elementos. El trabajo incluye un análisis del comportamiento del sistema de liberación por bulón, de los filamentos sometidos a carga, así como la rotura mediante aplicación de calor puntual para generar la separación rápida del armamento. Finalmente, se exponen las prestaciones de ambos sistemas y se analizan en detalle sus principales ventajas y limitaciones, prestando especial atención a las cargas inducidas en la estructura del vehículo.

Guiado terminal en UAVs: estrategias, diseño y desafíos (DESEi+d, 2025: 17)

Miguel Ángel de Frutos Carro (UAV Navigation - Grupo Oesía S. L.), Francisco Milán Cabrera (UAV Navigation - Grupo Oesía S. L.), Enrique Donada Rocamora (UAV Navigation - Grupo Oesía S. L.) e Ignacio José Calomarde Heras (UAV Navigation S. L.).

El guiado terminal de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) cobra cada vez más relevancia en el contexto de defensa actual. Esta capacidad permite a los sistemas de control de vuelo como el VECTOR FCS navegar con base en una referencia final incluso en entornos con GNSS denegados; modificando la trayectoria de la plataforma para la intercepción de un objetivo. Algoritmos de guiado terminal como los denominados Vector-To-Target (VTT) o Point-To-Target (PTT), explotan la información de posición y velocidad relativas proporcionada por una carga de pago embarcada —normalmente optrónica— para lograr la eliminación de amenazas exitosamente.

Basado en el principio de navegación proporcional, el algoritmo VTT logra una solución de guiado que establece al UAV en curso de colisión con el objetivo, con independencia de si este es estático o dinámico. Por otro lado, el algoritmo PTT permite que el UAV apunte un cañón en dirección al objetivo para que sea este el que ejecute la intercepción mediante lanzamiento de proyectiles.

La versatilidad de estas estrategias de guiado terminal, la facilidad de integración con diversos periféricos con capacidad de detección de

blancos y la fusión de la información de posición con el resto de los sensores embarcados hacen esta solución altamente funcional y pertinente en operaciones contra amenazas aire-tierra y aire-aire.

Los mayores desafíos tecnológicos a esta implementación consisten en la sincronización entre la estimación y el control, y la velocidad de procesado de la carga de pago; en particular en aproximaciones a alta velocidad. En el caso de las misiones en las que un operador ha de seleccionar el objetivo en tiempo real, la capacidad de comunicación tierra-aire también puede suponer un desafío.

Esta línea de trabajo busca expandir las capacidades actuales y abre la puerta a nuevos perfiles operacionales como los ejercicios Counter-UAS.

Hacia una gestión avanzada del envejecimiento en motores de propulsante sólido de material compuesto (DESEi+d, 2025: 251)

Mario Martínez (Universidad Rey Juan Carlos), Raúl López Sánchez (Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial, INTA), David Chimeno Saavedra (Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial, INTA), Jesús Rodríguez (Universidad Rey Juan Carlos) y Alicia Salazar (Universidad Rey Juan Carlos).

Los propulsantes sólidos de material compuesto (CSP) son materiales clave en sistemas de propulsión en municiones. Los largos periodos de vida en servicio de los motores de este tipo favorecen el envejecimiento del propulsante antes de su uso. Dicho envejecimiento da lugar a la aparición de grietas en el grano del motor, lo que supone un riesgo para la integridad estructural y la operatividad del misil. El mantenimiento predictivo de los arsenales con este tipo de motores resulta importante, no solo desde el punto de vista de la fiabilidad y seguridad, sino que es necesario determinar la vida en servicio restante con el objetivo de optimizar el coste y la gestión ambiental de la munición sin vida útil. Abordar este problema resulta complejo. Es común determinar la vida útil de un propulsante a través de la evolución de alguna propiedad mecánica o química con el envejecimiento, propiedades que se evalúan en las pruebas de

vigilancia. Además, es habitual el estudio de la evolución de las propiedades con material sometido a envejecimientos acelerados que se podrían definir como sencillos, tendiendo en cuenta la complejidad de la historia real del motor durante su vida útil.

En este trabajo se propone una metodología de caracterización y análisis que avanza en el conocimiento en dos direcciones. En primer lugar, se emplean tres tipos de envejecimientos acelerados (mecánico, térmico y químico con ozono), los cuales tienen en cuenta una mayor variedad de procesos que afectan al envejecimiento del propulsante durante toda su vida útil. En segundo lugar, se analizan las propiedades de los propulsantes obtenidas mediante ensayos de relajación, tracción uniaxial y fractura, haciendo uso del análisis por componentes principales (PCA), de manera que se ha analizado la afección de los diferentes envejecimientos al evaluar una multitud de variables. Esta metodología ha demostrado ser eficaz para poder identificar muestras de material que han sido envejecidos por diferentes mecanismos (mecánico, térmico y químico), incluso distinguiendo los niveles de degradación dentro de cada envejecimiento acelerado empleado. Estos resultados pueden servir como un primer paso en la evolución de los sistemas de vigilancia actuales.

ÁREA 2
Sensores y sistemas electrónicos

ISNAV: Sistema de navegación vehicular con capacidades *antispoofing* GNSS (DESEi+d, 2025: 208)

Antonio Vallejo Antolín (GMV Aerospace and Defence), Manuel Pichel (GMV Aerospace and Defence), José Luis Musoles (GMV Aerospace and Defence), Francisco José Nieto (GMV Aerospace and Defence) y Miguel Ángel Gómez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA).

GMV comenzó a desarrollar en 2018 un nuevo sistema de navegación vehicular (ISNAV) con el objetivo de dotar de capacidades actualizadas y mejoradas para una navegación resiliente en escenarios de guerra electrónica a cualquier tipo de vehículo de las Fuerzas Armadas (FF. AA.). En la actualidad, destaca su uso en el vehículo de combate sobre ruedas (VCR) 8x8 y en las piezas de artillería M109 y SIAC. Desde su inicio, ISNAV ha tenido una evolución constante con el fin de añadir mejoras en cuanto a precisión y resiliencia. Una de las principales capacidades añadidas es la introducción de algoritmos de detección y mitigación de ataques de *spoofing*, permitiendo la detección temprana de estas perturbaciones y la continuación segura de operaciones en entornos de interferencia sobre la señal GNSS. Un ataque de *spoofing* se define como la suplantación intencionada de señales GNSS, mediante la emisión de señales falsas, con la misma estructura y forma que las señales verdaderas, para confundir a los receptores, deteriorando la calidad y comprometiendo la integridad de la solución de posicionamiento, navegación y tiempo (PNT). Las

principales innovaciones que se encuentran en los algoritmos de ISNAV son: 1) Algoritmos de detección de *spoofing* a diferentes niveles para asegurar una detección rápida y fiable. Se pueden clasificar en: 1.1) nivel de procesamiento de señal, incluyendo algoritmos de detección de anomalías en la calidad de la señal GNSS (picos secundarios de correlación, niveles de potencia no esperados, etc.); 1.2) nivel de procesamiento de medidas, mediante algoritmos de monitorización de observables y de consistencia entre mensajes de navegación, incluyendo el uso selectivo de constelaciones y señales GNSS; 1.3) nivel de monitorización de la solución PNT, mediante el uso de sensores de navegación adicionales en el vehículo (especialmente la comparación con medidas inerciales, medidas del odómetro, etc.), y 2) sistema experto de mitigación y recuperación, encargado de recopilar la información reportada por todos los algoritmos de detección para determinar la probabilidad de que exista un ataque de *spoofing*, identificando las señales y constelaciones afectadas y realizando la mitigación correspondiente de forma automática. Estos algoritmos han sido probados y validados en las instalaciones del INTA en el ámbito del proyecto internacional RIPTIDE de la EDA, sometiendo a ISNAV a diversas perturbaciones y validando su capacidad de detección y mitigación de *spoofing* GNSS, reforzando su resiliencia como navegador en cualquier escenario de operación terrestre.

Additive manufacturing of radio frequency waveguides: material evaluation and surface treatments (DESEi+d, 2025: 240)

Melody Pacheco Espejo (CATEC), Irene Heras (CATEC), Antonio Periñán (CATEC), Juan Francisco Valenzuela (Universidad de Granada), Marcos Baena (Universidad de Granada), Carlos Molero (Universidad de Granada), Carlos Alberto Leal (SENER), Vicente Cabrera (SENER) y Esteban Celemín (SENER).

Metal additive manufacturing (AM), in particular with Powder Bed Laser Fusion - Laser Beam (PBF-LB/M) technology, can create parts with complex shapes, light weight and internal details with reduced accessibility, ideal for radio frequency (RF) filters, antennas or waveguides components for aerospace applications. Despite its advantages in design freedom, AM introduces challenges such as surface roughness, which increases propagation losses and affects efficiency. The surface roughness characteristics of components manufactured via PBF-LB/M technology are determined by multiple factors that significantly influence the final part quality. Among the most critical parameters is the particle size distribution of the metal powder feedstock, which typically ranges between 20 and 60 µm, the construction orientation, layer thickness, another fundamental parameter, directly affects both surface quality and build time. Additional contributing factors include laser power parameters, scan speed and support structure design. This study evaluates the impact of different alloys and

surface treatments on waveguides manufactured using AM. Through a design of experiments (DoE) approach, different AM - compatible light alloys with have been analysed and various surface treatments have been applied, with the aim of mitigating the effects of roughness and improve the Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) of the RF component. Various surface treatment methods —such as mechanical (e. g. abrasive blasting), chemical (e. g. acid etching), and electrochemical (e. g. electropolishing) processes— are systematically analysed to determine their effectiveness in reducing surface roughness and improving electromagnetic performance. The study aims to establish a comprehensive understanding of how material properties and post-processing strategies interact to influence the functional performance of AM-produced waveguides. By characterizing the impact of these variables on key RF metrics, the findings will provide valuable insights for optimizing the manufacturing workflow, ensuring that the benefits of AM —such as weight reduction and design complexity— can be fully leveraged without compromising the stringent electrical requirements of aerospace RF systems.

Detección de radiación electromagnética en el rango 2-5 THz usando un FET de grafeno (DESEi+d, 2025: 292)

El Hadj Abidi (Nano-THz Group, Universidad de Salamanca), Jaime Calvo-Gallego (Nano-THz Group, Universidad de Salamanca), Takashi Taniguchi (National Institute of Material Sciences, 1-1 Namiki, Tsukuba 305-0044, Japan), Kenji Watanabe (National Institute of Material Sciences, 1-1 Namiki, Tsukuba 305-0044, Japan), Taicii Otsuji (Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan), Jesús Enrique Velázquez-Pérez (Nano-THz Group, Universidad de Salamanca) y Yahya Moubarak Meziani (Nano-THz Group, Universidad de Salamanca).

La radiación de terahercios (THz), también conocida como rayos T, *T-light* o THz es radiación de tipo electromagnético dentro de la banda 0,1-10 THz del espectro electromagnético. La inexistencia de fuentes y detectores eficientes de THz ha acuñado el término *THz gap*. El presente trabajo propone un nuevo detector basado en un FET (*field effect transistor*) fabricado en la Sala Limpia de Nanotecnología de la USAL con el siguiente *layout* vertical: se depositó por transferencia una doble heterounión vertical h-BN/grafeno/h-BN sobre una oblea SiO2/Si. El grafeno es de tipo *bilayer* y constituye el canal activo del transistor cuyo *layout* horizontal se basa en una estructura fuente-canal-drenador con una puerta asimétrica dual e interdigitada que permite la creación de asimetrías en la distribución de la carga a lo largo del canal del FET que

mejorará la respuesta en THz del dispositivo [1-2]. La encapsulación del grafeno entre dos capas de h-BN permite su estabilización mecánico-química, la adición del dieléctrico para las puertas superior e inferior y un alejamiento de la interfaz SiO2/Si que reduce el *scattering* por impurezas remotas y la rugosidad en el canal. En el proceso de fabricación, se integró una antena de tipo *in chip bow-tie* para aumentar la responsividad del detector. El FET con la antena integrada fue caracterizado en espacio abierto (*open air*) mediante excitación con una fuente comercial TeraCascade multi-QCL (*quantum cascade laser*) de Lytid. Tres láseres con frecuencias de emisión 2.5, 3.4, y 4.7 THz fueron usados. Las potencias respectivas de los láseres a 2.5, 3.4, y 4.7 THz fueron 1.6, 1.3, y 2.4 mW respectivamente. La caracterización de los detectores se realizó a 8 K. Los resultados de la caracterización en fotocorriente fueron excelentes gracias a excepcionales valores de movilidad de electrones (147 000 $cm^2/V{\cdot}s$) y huecos (150 000 $cm^2/V{\cdot}s$) a 10 K. La respuesta del detector se explica como una intermodulación de los voltajes aplicados a los dedos de la puerta superior y a la puerta inferior (*backgate*).

Desarrollo y evaluación de técnicas de aprendizaje automático basadas en datos de seguimiento para clasificación de blancos en sistemas radar antidron (DESEi+d, 2025: 8)

Guillermo Pastor Carrasco (Observatorio Horizontes en Defensa y Seguridad, ISDEFE-UPM), Rodrigo Blázquez García (Observatorio Horizontes en Defensa y Seguridad, ISDEFE-UPM), José María Peña Espartero (Advanced Radar Technologies, ART) y Mateo Burgos García (Observatorio Horizontes en Defensa y Seguridad, ISDEFE-UPM).

En los últimos años, el uso de drones ha aumentado significativamente debido a la reducción de costes y su mayor accesibilidad. Estas plataformas aéreas autónomas suponen una amenaza para la seguridad, no solo por su uso negligente, sino también por su empleo en actividades ilícitas o para realizar ataques directos. Para hacer frente a estas amenazas, es habitual el uso de radares para su detección y seguimiento, permitiendo incluso localizar aquellos drones que operan de forma autónoma sin enlace de comunicaciones. Sin embargo, en estos sistemas la clasificación de los drones detectados frente a aves sigue siendo un reto debido a la similitud en sus características de tamaño y vuelo. Aunque se han desarrollado clasificadores basados en la medida de la respuesta micro-Doppler de los blancos, estas técnicas resultan poco efectivas para drones de ala fija y requieren largos tiempos de integración que no son adecuados

en los sistemas radar tradiciones de vigilancia superficial con exploración mecánica de la antena. Por ello, estos radares suelen integrarse con sistemas ópticos que realizan la función de clasificación y confirmación de la amenaza, aumentando su coste y complejidad.

En este trabajo se propone realizar la clasificación de drones frente a aves utilizando los datos de seguimiento de las trayectorias de los blancos proporcionados por los radares de vigilancia. Este enfoque permite integrar la funcionalidad de clasificación en sistemas radar ya desplegados sin necesidad de incorporar *hardware* adicional ni modificar la arquitectura del sistema. Gracias a la disponibilidad de una base de datos proporcionada por la empresa Advanced Radar Technologies (ART) que incluye datos de seguimiento de drones y aves obtenidos en múltiples emplazamientos reales, se han desarrollado y evaluado algoritmos de clasificación basados en técnicas de aprendizaje automático (*support vector machines, random forest* y redes neuronales) empleando dos estrategias alternativas: el procesado de características extraídas de los datos de seguimiento y el procesado directo de las trayectorias estimadas por los filtros de seguimiento. De esta forma, para la base de datos utilizada se han alcanzado precisiones de clasificación para drones superiores al 97% con probabilidades de falsa alarma (ave clasificada como dron) por debajo del 5%. Además, la evaluación de los resultados de precisión obtenidos con diferentes técnicas y estrategias ha puesto de manifiesto las limitaciones en la robustez de los clasificadores ante distintos escenarios y la necesidad de ampliar la base de datos de entrenamiento para mejorar las prestaciones.

Protección de radares de vigilancia mediante sensores ROSAR en bandas milimétricas (DESEi+d, 2025: 266)

Félix Pérez-Martínez (Dpto. SSR, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid), Susan Martínez-Cordero (Dpto. SSR, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid), Jaime Calvo-Gallego (Departamento de Informática y Automática, Universidad de Salamanca), Rodrigo del Pulgar (Dpto. SSR, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid) y Álvaro Gutiérrez (Dpto. Tecnología Fotónica y Bioingeniería, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid).

En muchas ocasiones los radares de vigilancia están desatendidos o trabajan en un entorno que obliga a protegerlos frente acciones de sabotaje que pueden ir dirigidas a ellos o a las plataformas que los embarcan. Esta protección se realiza con distintos sensores que presentan algunas limitaciones: cámaras en el espectro visible o infrarrojo (afectadas por los fenómenos meteorológicos) o sensores de proximidad de microondas (con falsas alarmas producidas por animales, viento, etc.). En este trabajo se propone aprovechar el giro de las antenas de los radares de vigilancia para incorporar radares trabajando en bandas milimétricas, situados en el extremo de su antena, para configurar un sistema ROSAR (*rotating synthetic aperture radar*) capaz de obtener imágenes de alta resolución.

Estas imágenes permiten aplicar procesos de señal tipo Area-MTI con los que extraer del entorno las señales de los posibles intrusos, distinguiendo por su tamaño el tipo de agresión y facilitando la generación automática de alarmas con una probabilidad de falsa alarma prácticamente nula. Esta técnica consiste en generar con el giro de la antena una apertura sintética circular grande que, adecuadamente procesada, permite la obtención de imágenes con elevadas resoluciones angulares, lo que permite resolver blancos y determinar sus tamaños. Este método de extracción de imágenes de alta resolución se ha aplicado con éxito para la detección y localización de blancos con mucha precisión (Pérez-Martínez *et al*., 2024) o la implementación de sistemas *sense and avoid* en drones (Pérez-Martínez *et al.*, 2017).

En la comunicación se presentará diversas simulaciones obtenidas con radares de vigilancia utilizados por las fuerzas armadas españolas en diferentes entornos y con diferentes sensores. Las conclusiones serán ratificadas por un conjunto de medidas experimentales que avalan las posibilidades reales de la técnica propuesta y se concluye su viabilidad para proteger radares de vigilancia y las plataformas o infraestructuras en que están instalados.

Bibliografía:

Pérez-Martínez, F.; Martínez-Cordero, S.; Calvo-Gallego, J. y Santos-Rancaño, C. (2017). Prototipo experimental ArcSAR embarcado en una plataforma aérea [en línea]. *Actas del XI Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad (DESEi+d 2024)*, Jaen, Spain, Ministerio de Defensa. Secretaría General Técnica, pp. 1-6. [Consulta: 1 noviembre 2024]. Disponible en: https://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/es-es/Presentacion/deseid_2024/Paginas/Defensa.aspx

Pérez-Martínez, F.; Martínez-Cordero, S.; Calvo-Gallego, J. y Romero-Paisano, F. J. (2024). Arc-Scanning Synthetic Aperture Radar for Accurate Location of Targets [en línea]. *Journal of Sensors*, pp. 1-11. [Consulta: 2025]. DOI: 10.1155/2024/1308712

Biosensores integrados en textiles para mejorar el confort y la supervivencia del combatiente (DESEi+d, 2025: 9)

Carlos Fernández (CEO) y Juan Antonio Martín (CTO).

Recientes avances han permitido embeber tanto sensores (en este caso, biosensores) como electrónica en tejidos, dando lugar a tejidos inteligentes. Estos pueden utilizarse para mejorar el confort y la supervivencia de los combatientes, monitorizando o controlando variables como la posición corporal, esfuerzos que se están realizando, temperatura corporal, fatiga, ritmo cardiaco, presión sanguínea y nivel de oxígeno en sangre, de forma no invasiva. La medición y control de estas variables fisiológicas y biomecánicas puede servir para, en primer lugar, detectar en etapas tempranas situaciones de estrés físico y mental del soldado y, en segundo lugar, para adaptar en tiempo real el soporte ofrecido con sistemas ciberfísicos externos de ayuda a la realización de tareas pesadas (exoesqueletos).

Con esta finalidad, GOGOA ha desarrollado un biosensor textil capacitivo (patentado), no invasivo, lavable, que se puede integrar en tejidos inteligentes (junto con la electrónica para el acondicionamiento y procesamiento de la señal, también embebible en textiles) y que ofrece una señal proporcional a su deformación, permitiendo medir en tiempo real posiciones corporales, movimientos, esfuerzos y variables fisiológicas, de forma económica. Un traje militar equipado con este sistema sensorial

puede registrar los movimientos humanos en posición, velocidad y aceleración, medir los esfuerzos de los músculos y capturar las principales variables fisiológicas (frecuencia respiratoria, frecuencia cardíaca, temperatura y saturación de oxígeno en sangre), lo que permite análisis dinámicos (cinéticos y cinemáticos) y fisiológicos. El procesamiento en tiempo real de estas señales por la electrónica embebida, mediante la adecuada algorítmica (basada en inteligencia artificial o no) permite establecer unos límites de seguridad para detectar el estrés del combatiente o para adecuar el soporte ofrecido por los exoesqueletos, ajustándose de manera óptima a la tarea que se está realizando y a las condiciones físicas del soldado.

Aprendizaje basado en proyectos con IoT y drones para la innovación docente en transmisiones militares: integración de tecnologías LoRa y sistemas embebidos (DESEi+d, 2025: 21)

Carlos Cajal (Centro Universitario de la Defensa Zaragoza), Miguel Ángel Guillomia (Centro Universitario de la Defensa Zaragoza) y Álvaro Marco (Centro Universitario de la Defensa Zaragoza).

En el ámbito de la formación militar, la enseñanza de tecnologías de transmisión y defensa requiere enfoques innovadores que combinen teoría, práctica y adaptabilidad a escenarios dinámicos. Este proyecto, desarrollado en el Centro Universitario de la Defensa (CUD-AGM), implementa una solución pedagógica basada en el aprendizaje basado en proyectos (ABP), integrando dispositivos biométricos móviles, sistemas de alerta en tiempo real y drones autónomos con capacidades avanzadas. El núcleo del proyecto es un brazalete *wearable* diseñado por los estudiantes, que captura datos biométricos en movimiento —pulso cardiaco, oxígeno en sangre y temperatura corporal—. Cuando alguna medida supera umbrales predefinidos, el dispositivo envía una señal de alarma a un puesto de mando (*gateway*) mediante conexión inalámbrica. Este *gateway*, desarrollado con tecnologías accesibles, muestra el tipo de alerta, la ubicación geográfica del usuario en Google Maps y el emplazamiento exacto,

garantizando una respuesta rápida en entornos operativos. Para asegurar la fiabilidad, el mensaje se transmite dos veces consecutivas con un intervalo de dos segundos, sistema que actualmente funciona en condiciones reales. Paralelamente, los alumnos han ensamblado un dron autónomo gobernado por Ardupilot, equipado con una Raspberry Pi. Este dron cumple dos funciones clave: 1) Detección de objetos en tiempo real (personas, coches, camiones), lograda mediante visión artificial y algoritmos de *machine learning*, operativa actualmente y 2) Replicación de alertas biométricas como repetidor radiofónico, utilizando un módulo RYRL998 para retransmitir la segunda señal del brazalete hacia el *gateway*. Esta capa de radio, independiente de protocolos como LoRaWAN, prioriza la simplicidad y robustez en entornos de baja conectividad, aunque su implementación está pendiente de finalizar. La innovación pedagógica radica en la integración de tecnologías comerciales (Raspberry Pi, sensores biométricos) con desafíos reales, fomentando habilidades en programación, electrónica y análisis de datos. El uso de datos biométricos móviles —no sujetos a instalaciones fijas— replica escenarios tácticos donde la monitorización en movimiento es crítica, como operaciones de rescate o despliegues en terreno hostil. Los resultados preliminares destacan una mejora en la retención conceptual (evaluada mediante comparativas de calificaciones). La retroalimentación instantánea del sistema permite ajustar estrategias docentes en tiempo real, mientras que la escalabilidad del proyecto se evidencia en su adaptación a otras asignaturas, como tecnología para la defensa. En conclusión, este enfoque no solo moderniza la educación militar, sino que también contribuye a la seguridad y defensa al formar profesionales capaces de diseñar sistemas interoperables.

Proyecto HEROIC: contribución española en la evolución de los sensores infrarrojos europeos (DESEi+d, 2025: 132)

Alberto Benito (Indra Sistemas S. A.), Alberto Pérez (Indra Sistemas S. A.), Eduardo Casanueva (Indra Sistemas S. A.) y Jorge de la Cierva (Indra Sistemas S. A.).

El proyecto HEROIC supone la materialización y la puesta en marcha de parte de los esfuerzos europeos en el desarrollo y evolución los sensores infrarrojos aplicados a la defensa en la Unión Europea; los cuales deberán estar preparados para los escenarios más desafiantes con un previsible uso más intensivo y exigente de estos. La Comisión Europea, a través del Fondo Europeo de Defensa (EDF), solicita al sector industrial europeo la evolución de detectores infrarrojos (IR), como respuesta a la necesidad de establecer y mantener una cadena de suministro europea autosuficiente para detectores infrarrojos de alto rendimiento, sin las restricciones impuestas por países no pertenecientes a la UE. HEROIC se centra en el desarrollo de Circuitos Integrados de Lectura (ROIC) de nueva generación, componente electrónico clave de los detectores IR que captan las cargas eléctricas generadas por los píxeles del detector y las convierten en señales procesables para la obtención de imágenes. Estos ROIC avanzados aprovecharán los avances en microelectrónica, siendo compatible con las arquitecturas 3D emergentes, y adaptados para los sistemas de detectores IR refrigerados y no refrigerados. La evolución de

este componente se orienta a dotar de una capacidad al conjunto sensor de mayor resolución lo que implica la reducción del tamaño entre pixeles hacia las 5 µm, así como una mayor velocidad de muestreo, junto a la incorporación de nuevas funcionalidades entre otros. Coordinado por el fabricante francés de detectores IR Lynred, el consorcio está compuesto por empresas europeas líderes en cada etapa de la cadena de suministro de detectores IR, desde proveedores de tecnología como CEA-LETI (Francia), IDEAS (Noruega) y el Instituto de Microelectrónica de Sevilla (España), que investigan y desarrollan nuevas funciones, procesos y materiales para los detectores, hasta integradores de sistemas como PCO (Polonia), Kongsberg (Noruega), Miltech (Grecia) e Indra (España), que integran los detectores IR en sistemas y plataformas de defensa. La convocatoria se lanzó en 2021 con una duración de 54 meses. En estos momentos ya se han realizado los primeros prototipos en fase de pruebas y se espera una continuación prometedora en la conclusión del proyecto.

DED - LW primera pieza en el mundo para ultra alto vacío (UHV) fabricada por fabricación aditiva para un reloj óptico (Real Instituto y Observatorio de la Armada / Armada JEMANDIZ Rota / Novaindef / CEDAEC Linares) (DESEi+d, 2025: 238)

Antonio Estarellas (Real Instituto y Observatorio de la Armada), Héctor Álvarez (Real Instituto y Observatorio de la Armada), Jesús Romero (Real Instituto y Observatorio de la Armada), Ignacio Cortés (Real Instituto y Observatorio de la Armada), Sergio de la Mota (Armada española), Javier Racero Catalan (Novaindef), Antonio Peralta (Novaindef), Arnold Biehler (Novaindef), Francisco Javier Gonzalez (Novaindef), Fernando Lasagni (Novaindef, CEDAEC Linares) y José Sivo Romero (Novaindef, CEDAEC Linares).

En el marco de la colaboración entre el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) y Novaindef, se lleva a cabo el diseño y la fabricación de diferentes componentes destinados al desarrollo experimental de un reloj de red óptica de estroncio. Este tipo de reloj constituye uno de los sistemas más avanzados en metrología del tiempo y frecuencia, y su implementación requiere una integración precisa de sistemas ópticos, electrónicos y de vacío de ultra alto nivel. Se han diseñado y fabricado diversas piezas con aplicaciones específicas, tales como estructuras

ajustables, piezas internas del sistema del reloj y componentes de ultra alto vacío (UHV). Las piezas compatibles con condiciones UHV se han fabricado utilizando bridas CF (ConFlat) como estándar de conexión. Estas condiciones imponen exigencias estrictas en cuanto a tolerancias dimensionales, selección de materiales y acabados superficiales, con el objetivo de garantizar la estanqueidad y estabilidad necesarias para alcanzar presiones inferiores a 10^{-9} mbar. El proceso de diseño y fabricación se realiza de forma iterativa, en colaboración estrecha con el equipo científico del ROA, lo que facilita el ajuste continuo de los diseños en función de las necesidades del experimento. Este enfoque permite abordar de manera eficiente los retos tecnológicos que plantea un sistema de alta exigencia como el reloj óptico. El uso de la fabricación aditiva para la creación de nuevos componentes, explorando geometrías complejas que son difíciles de conseguir con procesos de fabricación tradicionales, en el caso del reloj óptico, puede ser diferencial. Estos avances permitirán optimizar aún más la compatibilidad con entornos UHV y la precisión del sistema experimental. La impresión de conexiones de UHV con aditiva y posterior mecanizado en la misma máquina/operación añade una cualidad que, hasta ahora, impedía que la pieza fuese realizada a partir de un solo bloque, y tenía que realizarse por medio de un inserto. Al estar realizada de un solo bloque, su ajuste y estanqueidad son superiores comparativamente, además de realizarse de forma más rápida y mejorar su repetibilidad.

Evaluación de la carga interna del combatiente mediante termografía infrarroja: aplicaciones actuales y perspectivas de futuro (DESEi+d, 2025: 257)

Julio A. Ceniza-Villacastín (Facultad de Ciencias de la Salud - HM Hospitales, Universidad Camilo José Cela, Madrid), Manuel Sillero Quintana (ThermoHuman, Madrid), Ismael Fernández-Cuevas (ThermoHuman, Madrid), Adrián Carrio (Thermohuman), Marcos A. Soriano (Facultad de Ciencias de la Salud - HM Hospitales, Universidad Camilo José Cela, Madrid) y Ester Jiménez-Ormeño (Facultad de Ciencias de la Salud - HM Hospitales, Universidad Camilo José Cela, Madrid).

La termografía infrarroja (IRT) es una tecnología no invasiva, rápida y sin contacto, utilizada ampliamente en sectores como la industria, la automoción, la defensa o la veterinaria, entre otros. Su aplicación sobre humanos y, en particular, con personal militar, ha despertado un interés creciente en los últimos años, evaluándose su utilidad para monitorizar el estado fisiológico en distintos contextos operativos como el entrenamiento, la exposición a ambientes extremos o el uso de equipamiento táctico. La actividad del combatiente se desarrolla habitualmente en contextos de alta exigencia fisiológica y térmica, donde el esfuerzo físico, las condiciones ambientales o el uso continuado de equipamiento específico (chalecos antibalas, uniformes técnicos, trajes de protección, etc.) modifican la respuesta del organismo. En este sentido, la IRT permite una evaluación

objetiva del estado térmico y fisiológico del personal, aportando información relevante sobre la carga interna, la recuperación o la regulación térmica individual, entre otros aspectos. A través del análisis de los patrones térmicos —y con el apoyo de herramientas de procesamiento automático— es posible cuantificar diferencias asociadas a variables como el momento del día, el sexo, la zona corporal o el tipo de equipamiento utilizado. Así lo evidencian trabajos recientes realizados con personal militar, en los que se han estudiado las variaciones térmicas circadianas, la respuesta térmica ante diferentes uniformes o la utilidad de la IRT para monitorizar procesos fisiológicos en entornos de instrucción y despliegue. Por tanto, el objetivo de este trabajo es exponer, desde una perspectiva científica, diversas aplicaciones de la termografía en humanos dentro del ámbito militar, como el control del estrés térmico, la valoración de la carga interna y el estudio de respuestas fisiológicas en distintos contextos operativos. Además, a partir de la evidencia disponible, se plantean también futuras líneas de desarrollo que permitan una integración progresiva de esta herramienta en programas de evaluación, prevención y mejora del rendimiento del combatiente.

Simulación de un sistema electroóptico para detección pasiva de amenazas propulsadas (DESEi+d, 2025: 273)

Francisco Javier Álvarez Ríos (EM&E Group), Pablo de la Hoz Iglesias (EM&E Group), Luis Blas Braunschweig (EM&E Group), Sergio López Rincón (EM&E Group) y Grabriel Cano (EM&E Group).

Este trabajo presenta la simulación de un sistema electroóptico (EO) de detección pasiva IR pensado para formar parte de un sistema de protección activa (APS). El sistema EO propuesto está compuesto por cuatro sensores de infrarrojos (MWIR) dispuestos con orientaciones relativas específicas para asegurar una cobertura azimutal completa de trescientos sesenta grados. La simulación evalúa el rendimiento del sistema en la detección de amenazas propulsadas entrantes, como misiles. Se simularán múltiples trayectorias de amenaza, considerando diversos ángulos de lanzamiento, velocidades y firmas infrarrojas. La capacidad del sistema EO para detectar, localizar y proporcionar información precisa de seguimiento será evaluada en términos de alcance de detección, resolución angular y tiempo de detección.

El objetivo principal de esta simulación es desarrollar y validar configuraciones del sistema EO capaces de generar imágenes MWIR realistas para propósitos de detección y seguimiento. Estas imágenes simuladas servirán como entrada para futuros algoritmos de procesamiento de imágenes y rutinas de identificación de amenazas.

Análisis de nuevos sistemas de detección submarina para la protección de infraestructura crítica (DESEi+d, 2025: 37)

Augusto Conte de los Ríos (Armada, Cátedra Jerónimo de Ayanz) y Javier García Peláez (Navantia).

La evolución tecnológica ha transformado el entorno de amenazas submarinas. Los submarinos convencionales y nucleares, así como los vehículos submarinos no tripulados (UUV), representan un riesgo creciente para la seguridad marítima. Estas plataformas permiten realizar operaciones encubiertas, sabotajes, reconocimiento e interferencias en infraestructuras críticas. En el caso del estrecho de Gibraltar, zona de vital importancia estratégica, el sistema actual de vigilancia basado en contactos AIS, radares y patrullas navales resulta insuficiente para una detección submarina eficaz debido a sus limitaciones técnicas y geográficas. Este trabajo propone el análisis y desarrollo de una red de sensores submarinos de tipo multiinfluencia, capaz de integrar tecnologías como sonar activo/pasivo, sensores hidrodinámicos, acústicos, magnéticos y eléctricos. En particular, se destaca el potencial de los sensores inductivos para detectar emisiones ELF (*extremely low frequency*) generadas por objetivos en movimiento bajo el agua, lo cual ha sido demostrado en estudios recientes sobre detección electromagnética submarina. Este enfoque permitiría una caracterización más precisa del entorno submarino y una detección más temprana de amenazas, especialmente si se combina con algoritmos

de inteligencia artificial para procesar grandes volúmenes de datos y mejorar el reconocimiento de firmas. La implementación de este sistema facilitaría la actuación coordinada y en tiempo real de la Armada y fuerzas y cuerpos de seguridad del Estado ante incursiones hostiles. Dada la importancia geoestratégica del estrecho de Gibraltar y en respeto al derecho internacional, el sistema propuesto se diseñaría exclusivamente sobre territorio español en ambas orillas, utilizando la isla de Alborán como nodo central para la recogida, integración y análisis de datos, asegurando así plena soberanía y control nacional sobre la red, siguiendo modelos ya aplicados como la red SOSUS (EE. UU.), LoVe (Noruega) o la Underwater Great Wall (China). Se plantea así un enfoque integral y multinacional para reforzar la seguridad marítima y la protección de infraestructuras críticas submarinas.

Transductores piezoeléctricos impresos para la monitorización de la salud de estructuras críticas mediante ultrasonidos (DESEi+d, 2025: 58)

Benjamín Rubio García (TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance, BRTA), Ana Pérez Márquez (TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance, BRTA), Nekane Galarza Urigoitia (TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance, BRTA), Jon Maudes Puentedura (TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance, BRTA), Celina Vaquero Moralejo (TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance, BRTA) y Ander Domínguez-Macaya Lopez (TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance, BRTA).

Las ondas ultrasónicas hacen posible la monitorización no destructiva de la salud estructural de elementos críticos en vehículos o instalaciones, habitualmente mediante transductores piezoeléctricos (PZT) comerciales pegados *a posteriori* a la estructura. Los últimos avances en electrónica integrada y polímeros electroactivos están siendo utilizados en recientes estudios para imprimir transductores ultrasónicos directamente sobre piezas. Esto hace que sean viables topologías de sensorización personalizadas, lo que acelera y simplifica de manera rotunda la instalación, es más compatible con grandes flexiones de la estructura y, además, permite una reducción de peso del sistema. En este trabajo se han desarrollado transductores piezoeléctricos impresos sobre la propia estructura

a monitorizar, con el fin último de conformar, de manera única o mixta junto con PZTs, sistemas de monitorización activos por ondas guiadas en estructuras planares o pasivos por emisiones acústicas, para hacer posibles futuras estructuras autosensorizadas desde la misma fabricación. En la fase inicial, como paso previo, se han desarrollado transductores impresos por serigrafía sobre *films* flexibles de PET, a partir de un copolímero líquido piezoeléctrico P(VDF-TrFE), así como polímeros conductores y tintas de plata nanoparticuladas para los electrodos. En una segunda fase, se han imprimido los transductores directamente sobre placas de aluminio 6082 T6 de grado aeronáutico de 1 mm de espesor. Los transductores han sido concebidos para favorecer primeramente los modos guiados principales de Lamb A0 a 800 kHz y el S0 a 1,6 MHz, alcanzando una relación señal-ruido superior a 20 dB con la señal promediada a dieciséis muestras. Por último, se ha evaluado la viabilidad de la detección de daños y anomalías en la estructura mediante los transductores desarrollados, tanto en su modo activo (generación y detección de ondas ultrasónicas) como en modo pasivo (detección de emisiones acústicas). Se ha comprobado su sensibilidad al daño en la estructura y a emisiones acústicas generadas con la técnica Hsu-Nielsen, siendo capaces de filtrar la dirección de la fuente del defecto en función del diseño seleccionado. Este trabajo confirma que la impresión de transductores puede protagonizar la siguiente generación de sensorización para la monitorización y evaluación no destructiva de estructuras críticas en el sector aeroespacial debido a su flexibilidad y capacidad de adaptación a múltiples aplicaciones así como su capacidad de generar piezas y estructuras sensorizadas desde la propia fabricación.

Red de sensores para la detección de drones aéreos en interiores (DESEi+d, 2025: 283)

Francisco de Asís Aznar de la Riera (Escuela Naval Militar, Plaza de España s/n, 36920, Marín, Pontevedra), Norberto Fernández García (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar) y Milagros Fernández-Gavilanes (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar).

El creciente uso de drones en conflictos modernos ha puesto en evidencia la necesidad de contar con sistemas de detección eficaces, especialmente en entornos urbanos donde la visibilidad puede estar limitada. En este contexto, se presenta una propuesta centrada en el diseño e implementación de una red de sensores acústicos capaz de identificar la presencia de drones en interiores mediante el análisis de su firma sonora. El sistema desarrollado se basa en el despliegue de microcontroladores Raspberry Pi equipados con micrófonos. Estos dispositivos capturan señales acústicas que son enviadas a un sistema central para su procesamiento en tiempo real. El análisis se realiza mediante técnicas de filtrado de frecuencia y comparación con umbrales previamente calibrados. Para establecer el método de detección, se llevó a cabo un estudio detallado del perfil acústico del dron, identificando las bandas de frecuencia características de su funcionamiento. Aplicando un filtro paso-banda centrado en dicha frecuencia y estableciendo un umbral basado en la energía acústica (medida en decibelios), fue posible discriminar eficazmente la presencia del dron

incluso en entornos con ruido ambiental. Las pruebas experimentales realizadas confirman la fiabilidad del sistema, que mostró una tasa de detección robusta y coherente con las expectativas planteadas. Aunque el estudio se ha limitado inicialmente a un único modelo de dron, la metodología creada es aplicable a otros dispositivos con modificaciones mínimas en los parámetros de calibración. Este enfoque representa un avance significativo hacia el desarrollo de redes de sensores acústicos para la detección de drones, con un alto potencial de aplicación en tareas de seguridad, vigilancia y defensa urbana. En suma, el trabajo demuestra la viabilidad de integrar sensores acústicos en redes distribuidas para afrontar desafíos de seguridad emergentes, ofreciendo una solución tecnológica escalable y adaptable a distintos escenarios operativos.

Navegación autónoma basada en relieve: avances y desafíos en la implementación de algoritmos TRN para UAV (DESEi+d, 2025: 5)

Miguel Ángel de Frutos Carro (UAV Navigation - Grupo Oesía S. L.), Javier Bernal Urbaneja (UAV Navigation - Grupo Oesía S. L.) y José María Púlido Fernández (UAV Navigation S. L.).

La dependencia de los sistemas de navegación aérea a las señales del Global Navigation Satellite System (GNSS) plantea importantes riesgos operativos en escenarios donde estas señales puedan ser degradadas o denegadas. Ante esta vulnerabilidad, resurgen tecnologías como la Terrain Referenced Navigation (TRN), que permiten estimar la posición de una aeronave mediante la correlación de perfiles topográficos medidos en vuelo con modelos digitales de elevación (DEM) previamente almacenados. Esta técnica, empleada en aplicaciones militares como el TERCOM, se presenta como una solución robusta y autónoma para reforzar la navegación en entornos complejos y GNSS-denied. El presente trabajo expone los avances en el desarrollo de un algoritmo de TRN diseñado para integrarse en sistemas de navegación de UAVs de Clase I y II, proporcionando una fuente alternativa complementaria de estimación de posición. La solución se apoya en sensores *commercial off-the-shelf* (COTS) como altímetros radares y en el procesado de DEM de alta resolución, permitiendo correlacionar los datos recogidos durante el vuelo con el modelo de terreno para obtener la posición más probable del UAV.

El desarrollo incluye la optimización del acceso a grandes volúmenes de datos DEM, la implementación de interpolaciones avanzadas y la creación de módulos específicos para la identificación de tipos de terreno, el control de la calidad del perfil topográfico y el cálculo del nivel de correlación. Asimismo, se ha diseñado un simulador y un entorno de análisis que permiten evaluar el comportamiento del algoritmo en diferentes escenarios, identificando sus límites y optimizando sus parámetros de funcionamiento. Los principales desafíos abordados son tanto la sensibilidad del sistema a la orografía sobrevolada y errores acumulados en la traza de vuelo como a los saltos en posición; mitigados mediante técnicas de control de confianza y la simulación del efecto de un filtro de Kalman. Los resultados preliminares demuestran que el TRN puede limitar el error de navegación a decenas de metros, incluso en situaciones de pérdida total de GNSS, mejorando así la resiliencia del sistema de navegación. Esta línea de trabajo abre la puerta a capacidades de navegación autónoma en entornos adversos, incrementando la seguridad y robustez de las operaciones de UAVs en escenarios que demanden vuelos a baja cota, alta velocidad y en cualquier condición lumínica.

Drones en la oscuridad: localización en túneles mediante la fusión de LiDAR y termografía (DESEi+d, 2025: 29)

José Manuel González Marín (CATEC, Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales), Marco A. Montes-Grova (CATEC, Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales), Francisco Javier Pérez-Grau (CATEC, Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales) y Antidio Viguria (CATEC, Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales).

Los RPAS son herramientas valiosas para inspección, búsqueda y rescate, o mapeado de entornos complejos o peligrosos, entre otras aplicaciones. Sin embargo, su despliegue en espacios interiores, donde la señal GNSS no está disponible, presenta grandes desafíos. Además, en la exploración de túneles, los algoritmos de navegación actuales a menudo no funcionan bien en estos entornos debido a las limitaciones de los sensores. Esto causa un bajo rendimiento en la precisión y la robustez de la solución de localización de la aeronave. Los principales retos incluyen: la ya mencionada ausencia de señal GNSS, que obliga a los RPAS a depender de métodos alternativos como técnicas basadas en cámaras o LiDAR; entornos repetitivos y con pocas características visuales, ya que los túneles suelen ser secciones largas y simétricas que pueden provocar fallos en los algoritmos de SLAM; las condiciones de iluminación adversas, afectando soluciones basadas en visión, y el espacio confinado que dificulta la aeronavegabilidad, además de que el polvo y partículas en el aire pueden

interferir con los sensores embarcados. Se han revisado diferentes técnicas de la literatura, como la odometría visual-inercial (VIO), métodos basados en LiDAR y técnicas de fusión de sensores, evaluando cuidadosamente sus pros y contras. Además, se proponen mejoras concretas para incrementar la robustez y precisión de las soluciones de localización. Se han llevado a cabo experimentos reales en un túnel de la vía verde de Coripe (Sevilla), utilizando varios sensores embarcados en una aeronave no tripulada personalizada. En concreto, un LiDAR 3D Ouster OS-128, una cámara térmica integrada en un gimbal FLIR Hadron 640R, y el sensor inercial de un autopiloto PixHawk Orange Cube. De los algoritmos revisados, los resultados indicaron que COIN-LIO y FAST-LIVO2 son los más efectivos en entornos complejos como este. Esto resalta la importancia de usar cámaras térmicas para reducir los impactos de la presencia de polvo y la simetría en la estructura del túnel. Esta combinación de sensores puede proporcionar una estimación de posicionamiento confiable en estos entornos. Debido a que todas estas pruebas se han realizado *a posteriori*, entre los trabajos futuros se encuentra la tarea de integrar dicha estimación de localización con los algoritmos de guiado, navegación y control de la aeronave con el objetivo de conseguir una navegación completamente autónoma de la aeronave.

Detección de anomalías en vehículos de la UME mediante modelos de inteligencia artificial no supervisados (DESEi+d, 2025: 43)

Javier Castrillo Mazagatos (ISDEFE) y Lucía Cristina Martín Pérez (ISDEFE).

El mantenimiento predictivo es un planteamiento proactivo que utiliza datos y análisis avanzados de detección de anomalías y defectos para predecir cuándo puede fallar un equipo o sistema. A diferencia del mantenimiento reactivo, que actúa después de que se produzcan las fallas, o del mantenimiento preventivo, que se basa en calendarios fijos, el mantenimiento predictivo se anticipa a los problemas y permite intervenir en el momento oportuno. La convergencia del mantenimiento predictivo con la inteligencia artificial (IA) está provocando una revolución tecnológica en la industria 4.0. La capacidad de la IA para analizar grandes conjuntos de datos, identificar patrones imperceptibles y facilitar la toma de decisiones, ha transformado la forma en que la industria gestiona sus procesos y activos. Para poder aplicar técnicas de inteligencia artificial con el objetivo de llegar a un mantenimiento predictivo, es necesaria la utilización de sensores (IoT) que permiten monitorizar el estado de los sistemas y recopilar datos para su análisis. Agrupando los conceptos expuestos con anterioridad, se ha desarrollado un proyecto de I+D+i que consiste en obtener información útil de una flota de vehículos sensorizados de forma que sea posible llegar a un mantenimiento predictivo mediante la

aplicación de técnicas de inteligencia artificial basadas en algoritmos no supervisados. A diferencia del aprendizaje supervisado, los modelos de aprendizaje automático no supervisados reciben datos sin etiquetar y pueden descubrir patrones y estadísticas sin ninguna orientación o instrucción explícita. El proyecto se ha desarrollado mediante una colaboración de ISDEFE con la UME (Unidad Militar de Emergencias) y se han realizado las siguientes acciones: 1) Sensorización de veinticinco camiones de intervención media de la UME del modelo Renault K-440 ubicados en los batallones de Madrid, Zaragoza y Sevilla; 2) recogida de datos de los vehículos. Se han detectado y almacenado ciento ochenta señales diferentes de los vehículos y se han agrupado en los siguientes sistemas: motor, eléctrico, frenado, transmisión y ayuda a la conducción; 3) análisis de la información recolectada mediante algoritmos no supervisados con la finalidad de detectar vehículos anómalos o defectuosos y deficiencias en la conducción y uso. Además, aplicando técnicas de *clustering* es posible visualizar los vehículos en un plano según sus similitudes con base en diferentes aspectos (utilización, conducción y datos propios de cada sistema).

Detección y clasificación de aeronaves militares mediante *deep learning* en imágenes satelitales para la defensa española (DESEi+d, 2025: 144)

Francisco Rodríguez Robles (HI-Iberia Ingeniería y Proyectos), Enrique Díez Benito (HI-Iberia Ingeniería y Proyectos), Manuel Naranjo Martínez (HI-Iberia Ingeniería y Proyectos), Luis Ciruelo Sanz (HI-Iberia Ingeniería y Proyectos), Víctor Chaparro Parra (HI-Iberia Ingeniería y Proyectos) y Roberto Gómez-Espinosa Martín (HI-Iberia Ingeniería y Proyectos).

La elevada disponibilidad de datos satelitales ópticos de alta resolución, así como los avances en inteligencia artificial (IA), especialmente en aprendizaje profundo (DL) están transformando la inteligencia geoespacial (GEOINT) para defensa y seguridad. El proyecto SEDA, financiado por el Ministerio de Defensa español, desarrolla una plataforma GEOINT avanzada integrando IA para el análisis de interés militar. Este trabajo detalla un caso de uso crítico en SEDA: la detección y clasificación automatizada de aeronaves en imágenes satelitales, respondiendo a necesidades clave de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR) de las Fuerzas Armadas.

El estado de la cuestión en detección de objetos satelitales ha progresado desde métodos tradicionales hasta CNN y detectores de una etapa como YOLO. Sin embargo, la aplicación efectiva en el dominio militar satelital

enfrenta desafíos como la variabilidad de resolución, condiciones visuales diversas y la dificultad para identificar objetos pequeños o camuflados. SEDA afronta estos retos adaptando arquitecturas y modelos del estado de la cuestión elegidos por su velocidad y precisión, que son entrenados en una primera iteración con una selección de *datasets* públicos.

Se emplea una metodología optimizada para el dominio satelital, donde las primeras iteraciones del modelo se perfeccionan mediante la creación semiautomática de un *dataset* propio, utilizando nuevas imágenes satelitales reales de zonas de interés para refinar el modelo y mejorar su adaptación a datos operativos. Se analizaron técnicas de preprocesamiento clave, incluyendo el tamaño de tesela óptimo (1024 x 1024) con solapamiento y el impacto de diferentes estrategias de *padding* (espejo *vs*. negro) en la conservación del contexto. El modelo se entrenó para clasificar más de veintidós categorías relevantes (cazas, bombarderos, transporte, vigilancia, civiles, helicópteros), implementando *data augmentation on-the-fly* para mejorar la generalización. Adicionalmente, se analizó el efecto de agrupar clases durante el entrenamiento, evaluando el compromiso entre la mejora en la detección global y la precisión específica para clases minoritarias.

Los resultados obtenidos validan la alta efectividad del modelo desarrollado en el marco de SEDA para la detección y clasificación de aeronaves, demostrando la viabilidad y el potencial del aprendizaje profundo para esta aplicación ISR crítica. La contribución principal reside en la adaptación exitosa de modelos de vanguardia a un caso de uso militar complejo, superando los desafíos inherentes a las imágenes satelitales mediante un cuidadoso preprocesamiento, aumento de datos adaptado y, fundamentalmente, un ajuste fino con datos operativos específicos.

Detección de cambios geoespaciales mediante *deep learning* para inteligencia y actualización cartográfica militar (DESEi+d, 2025: 145)

Enrique Díez Benito (HI-Iberia Ingeniería y Proyectos), Francisco Rodríguez Robles (HI-Iberia Ingeniería y Proyectos), Manuel Naranjo Martínez (HI-Iberia Ingeniería y Proyectos), Luis Ciruelo Sanz (HI-Iberia Ingeniería y Proyectos), Víctor Chaparro Parra (HI-Iberia Ingeniería y Proyectos) y Roberto Gómez-Espinosa Martín (HI-Iberia Ingeniería y Proyectos).

La disponibilidad de información geoespacial precisa y actualizada es un pilar fundamental para las operaciones del Centro Geográfico del Ejército de Tierra (CEGET) y, en general, para las capacidades de defensa y seguridad. La proliferación de imágenes satelitales de alta resolución ofrece oportunidades sin precedentes para la inteligencia geoespacial (GEOINT), pero impone el reto de analizar eficientemente vastos volúmenes de datos para identificar modificaciones significativas en el terreno. Este trabajo presenta el desarrollo, la optimización y la validación de un sistema avanzado basado en aprendizaje profundo (*deep learning,* DL) para la detección automatizada de cambios en la superficie terrestre. El desarrollo llevado a cabo para dar solución a este reto se ha concebido e integrado como un caso de uso específico dentro del proyecto SEDA, una herramienta geoespacial multifuncional orientada a la detección y análisis de elementos de interés militar.

La detección bitemporal de cambios es crucial para identificar nuevas construcciones, alteraciones en infraestructuras críticas o cambios en el uso del suelo, elementos de alto valor táctico y estratégico. Sin embargo, muchos modelos de DL existentes sufren de una limitada capacidad de generalización, fallando al aplicarse a nuevas áreas geográficas, sensores o condiciones ambientales no vistas durante el entrenamiento. Para superar esta barrera, fundamental para un despliegue operativo fiable, se implementó un modelo basado en redes neuronales siamesas, SARAS-NET. Se introdujeron mejoras metodológicas clave, incluyendo el entrenamiento con una combinación estratégica de múltiples *datasets* públicos, un esquema avanzado de aumento de datos (transformaciones geométricas, fotométricas y recortes aleatorios), y la aleatorización del orden temporal de las imágenes para evitar sesgos de construcción/destrucción.

Los resultados experimentales demuestran una notable mejora en la capacidad de generalización del modelo optimizado, logrando un rendimiento preciso y fiable en diversos conjuntos de datos y superando el sobreajuste del modelo base. El sistema identifica con alta precisión cambios relevantes para la cartografía militar y la vigilancia, mostrando adaptabilidad y robustez. La integración de este caso de uso en SEDA proporciona al CEGET una herramienta potente y eficiente, agilizando la actualización cartográfica, potenciando la inteligencia de imágenes (IMINT) y reforzando la conciencia situacional en zonas de interés operativo.

Programa SISNAVALT: presentación del proyecto, resultados y experiencias prácticas en entornos abiertos degradados (DESEi+d, 2025: 193)

Pablo García Auñón (Áurea Avionics), Enrique Lozoya Lidón (GMV Aerospace and Defence), Adrián Cerros Sánchez (GMV Aerospace and Defence) y Alberto Nieto Illescas (Áurea Avionics).

En el ámbito de trabajo de las Fuerzas Armadas es habitual encontrar escenarios en los cuales los servicios de posicionamiento global mediante satélites (GNSS) no se encuentran disponibles, bien sea por la propia naturaleza del entorno (por encontrarse dentro de edificios o bajo tierra, por ejemplo), o bien porque existen contramedidas que impiden su uso, tales como los sistemas de bloqueo de señal o *jamming*. Esta limitación en los sistemas de localización tiene un impacto relevante en la usabilidad y autonomía de las aeronaves no tripuladas (RPAS), especialmente en las de pequeño tamaño y peso.

El proyecto SISNAVALT, perteneciente al programa COINCIDENTE financiado por la SDG PLATIN, y desarrollado durante los años 2023, 2024 y 2025, tiene como objetivo desarrollar tecnologías de posicionamiento alternativas embarcables en plataformas aéreas no tripuladas Clase I, a la vez que mantienen la compatibilidad con los sistemas de guiado, navegación y control ya existentes y que además puedan ser

utilizables potencialmente por otras plataformas militares. Los escenarios considerados en el proyecto son confinados (interiores de edificios), urbanos, y abiertos degradados. Los dos primeros escenarios se han resuelto conjuntamente mediante una misma solución tecnológica, mientras que para los escenarios abiertos degradados se ha planteado una plataforma aérea y una alternativa técnica diferente. En esta segunda comunicación se presenta la solución tecnológica implementada para los espacios abiertos degradados, esto es, espacios al aire libre en los cuales la señal del servicio de posicionamiento global es inexistente, está degradada o no es fiable. Para estos escenarios, la aeronave seleccionada es un ala fija de pequeño tamaño con suficiente capacidad de carga como para transportar los sensores necesarios, sistema de comunicaciones y unidad de procesamiento. La plataforma sensórica está compuesta por diferentes sensores, entre los cuales cabe destacar un sistema de cámaras situadas en la parte inferior de la aeronave. Dicho sistema de visión se usa para observar el terreno cercano y, mediante la fusión de la información suministrada por el resto de sensores, estimar el movimiento de la aeronave, obteniéndose así su posición.

Se presentan las diferentes alternativas consideradas para este sistema de navegación, así como la solución tecnológica seleccionada y el proceso de ajuste y mejora de los algoritmos. Finalmente, se muestran los ensayos llevados a cabo, la evaluación final del sistema, las características y la precisión alcanzadas, así como las lecciones aprendidas y los posibles desarrollos futuros que permitan su implementación en plataformas comerciales actuales.

Programa SISNAVALT: presentación del proyecto, resultados y experiencias prácticas en entornos cerrados y urbanos (DESEi+d, 2025: 194)

Pablo García Auñón (Áurea Avionics), Alberto Nieto Illescas (Áurea Avionics) y Juan López Otero (Áurea Avionics).

En el ámbito de trabajo de las Fuerzas Armadas es habitual encontrar escenarios en los cuales los servicios de posicionamiento global mediante satélites (GNSS) no se encuentran disponibles, bien sea por la propia naturaleza del entorno (por encontrarse dentro de edificios o bajo tierra, por ejemplo), o bien porque existen contramedidas que impiden su uso, tales como los sistemas de bloqueo de señal o *jamming*. Esta limitación en los sistemas de localización tiene un impacto relevante en la usabilidad y autonomía de las aeronaves no tripuladas (RPAS), especialmente en las de pequeño tamaño y peso.

El proyecto SISNAVALT, perteneciente al programa COINCIDENTE financiado por la SDG PLATIN y desarrollado durante los años 2023, 2024 y 2025, tiene como objetivo desarrollar tecnologías de posicionamiento alternativas embarcables en plataformas aéreas no tripuladas Clase I, a la vez que mantienen la compatibilidad con los sistemas de guiado, navegación y control ya existentes, y que además puedan ser utilizables potencialmente por otras plataformas militares. Los escenarios

considerados en el proyecto son confinados (interiores de edificios), urbanos, y abiertos degradados. Los dos primeros escenarios se han resuelto conjuntamente mediante una misma solución tecnológica, mientras que para los escenarios abiertos degradados se ha planteado una plataforma aérea y una alternativa técnica diferente.

En esta primera comunicación se presenta la solución tecnológica desarrollada para resolver la navegación en espacios confinados y urbanos. En primer lugar, se describe la plataforma aérea seleccionada (un multicóptero de pequeño tamaño), y los sensores instalados. A continuación, se describen las diferentes alternativas algorítmicas consideradas, presentando las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas, así como la selección final de las técnicas que se han adoptado. El algoritmo de navegación, ejecutado de forma íntegra en el microrordenador embarcado, es un sistema de mapeado y localización simultánea (SLAM, por sus siglas en inglés) que genera un mapa del entorno desconocido en el que opera el multirrotor, a la vez en se localiza en este, enviándose la información recopilada al operador. El sistema permite comandar la aeronave marcando puntos en el mapa creado, generándose rutas seguras a través del entorno evitando obstáculos y recalculando trayectorias si fuese necesario. El sistema ha sido ajustado y evaluado en diferentes escenarios representativos a lo largo de numerosos ensayos, presentándose los resultados y principales conclusiones. Finalmente, se describe la evaluación final del sistema, destacando características y usabilidad alcanzadas, así como las lecciones aprendidas y posibles desarrollos futuros.

Análisis predictivo del motor-propulsor a bordo de vehículos tácticos con modelos de IA (DESEi+d, 2025: 201)

Francisco José Ochando Terreros (MDEF) y Ángel Martínez Jiménez (ISDEFE).

Este trabajo presenta una metodología basada en inteligencia artificial para la evaluación a bordo del estado del sistema motor-propulsor en vehículos, seleccionada como sistema crítico tras un análisis de criticidad de fallos. La propuesta se fundamenta en el uso de algoritmos de aprendizaje automático para la estimación del desgaste del motor, mediante la predicción de la potencia de fricción acumulada, con el objetivo de optimizar las estrategias de mantenimiento predictivo. El enfoque se distingue por utilizar datos funcionales del motor obtenidos en tiempo real desde el bus de comunicaciones CAN, sin necesidad de incorporar sensores adicionales, lo cual reduce la complejidad y el coste de implementación. A diferencia de otros estudios previos, que dependen del análisis químico de lubricantes o de la transmisión remota de grandes volúmenes de datos, este trabajo integra datos operacionales con datos extraídos de estudios empíricos para una evaluación conjunta del estado del lubricante y la salud del motor. La metodología incluye etapas de adquisición y preprocesamiento de datos, entrenamiento de modelos de aprendizaje automático y validación con datos reales de operación. Se ha adoptado un enfoque semisupervisado, combinando predicciones del modelo con

reglas expertas sobre el comportamiento de lubricantes, lo cual permite estimar la potencia de fricción a partir de parámetros conocidos del motor. Entre varios modelos evaluados, el modelo perceptrón multicapa mostró el mejor desempeño en términos de precisión y generalización. Este modelo se ha optimizado y adaptado para su ejecución a bordo de plataformas con recursos limitados. Se han utilizado formatos que favorecen la portabilidad del modelo y la interoperabilidad, comparando los rendimientos de los modelos para obtener el más eficiente. La validación experimental demostró una correlación significativa entre la potencia de fricción acumulada estimada y la presencia de metales en muestras de aceite, lo que refuerza su aplicabilidad como indicador indirecto del desgaste del motor y el lubricante.

GNSS Spamming: ataques de denegación de servicio GNSS basados en *spoofing* (DESEi+d, 2025: 96)

Sergio Angulo Cosín (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Javier Junquera Sánchez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Carlos Hernando Ramiro (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Óscar Gamallo Palomares (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) y José Antonio Gómez Sánchez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA).

Un sistema global de navegación por satélite (GNSS por sus siglas en inglés) consiste en una constelación de satélites que transmiten señales a cualquier parte del globo, permitiendo así a un receptor determinar su posición, velocidad y tiempo (*i. e.* solución PVT) con precisión. Los sistemas GNSS están expuestos a amenazas que persiguen degradar su seguridad, como los ataques de *jamming* (*i. e.* interferencias para impedir su uso) o de *spoofing* (*i. e.* de suplantación de la señal legítima de los satélites), que pueden causar daños graves dada la alta dependencia de multitud de servicios, tanto civiles como militares, de estos sistemas. En el Centro de Seguridad Espacial del INTA se persigue identificar las debilidades de estos sistemas a través de una aproximación de seguridad ofensiva, que ayude a identificar las necesidades de los nuevos desarrollos. SpAmming es un nuevo tipo de ataque de denegación de servicio que consiste en crear interferencias que impidan a un receptor recibir el

mensaje de navegación de satélites concretos, simulando una señal satelital legítima, o parte de ella. De esta forma, se lleva a la práctica un ataque de *jamming* selectivo, que puede servir de soporte para la ejecución de técnicas de ataque más avanzadas (p. ej. facilitando determinados escenarios de *spoofing*). Al ser un ataque dirigido, es más eficiente que un ataque de *jamming* convencional. Además, al enfocarse en un satélite concreto, es más difícil de detectar por los detectores de interferencias. Este tipo de ataque, a diferencia del *jamming* convencional, requiere de un conocimiento profundo de la señal GNSS y de qué parámetros son más críticos para realizar los procesos de adquisición y *tracking*, conceptos básicos que serán repasados en esta comunicación. También se presenta una prueba de concepto de SpAmming aplicada sobre el sistema Galileo, identificando contramedidas que ayuden a mitigar el impacto y detectar la presencia de este tipo de ataques.

ÁREA 3
Tecnologías comunes a bases, instalaciones, plataformas y combatiente

Recubrimientos multifuncionales Sol-gel: una plataforma tecnológica para la protección inteligente en defensa (DESEi+d, 2025: 45)

Olga Conejero (Fundación IDONIAL) y Lucía Florentino (Fundación IDONIAL).

El uso de recubrimientos funcionales basados en tecnología sol-gel representa una de las líneas de avance más prometedoras en la ingeniería de materiales para defensa. Su capacidad para generar películas delgadas con microestructuras altamente controladas, integrando múltiples funcionalidades en una única capa o en sistemas multicapa, los posiciona como una solución estratégica frente a los desafíos operativos actuales en plataformas terrestres, navales y aéreas. En esta comunicación se propone una visión transversal sobre el potencial de los recubrimientos sol-gel como herramienta de protección avanzada frente a condiciones ambientales extremas, corrosión acelerada y degradación superficial en sistemas de defensa. Se abordarán desarrollos en recubrimientos multifuncionales con propiedades anticorrosivas, hidrofóbicas, *antifouling* y barrera frente a agentes químicos agresivos, así como su adaptación a geometrías complejas mediante técnicas de deposición compatibles con procesos industriales. Se dará especial énfasis a las capas activas y sensorizadas, que integran funcionalidades inteligentes como la detección temprana de daño (p. ej. cambios de color, propiedades ópticas o conductividad), la liberación controlada de inhibidores o la activación de respuestas frente

a estímulos externos. Estas soluciones permiten una protección dinámica adaptativa, superando el concepto de recubrimiento pasivo y ofreciendo ventajas significativas en escenarios de operación prolongada sin mantenimiento. Asimismo, se discutirán casos representativos de aplicación en componentes críticos como carcasas electrónicas, sistemas de armas, estructuras metálicas expuestas y elementos móviles sujetos a ambientes salinos, desérticos o con alta humedad. La presentación incluirá ejemplos de recubrimientos multifuncionales desarrollados en IDONIAL, así como sistemas de recubrimientos dopados con microcápsulas funcionales que permiten desarrollar sistemas a medida. El objetivo es posicionar los recubrimientos sol-gel, no solo como una mejora tecnológica incremental, sino como una plataforma habilitadora para sistemas inteligentes de autoprotección, alineados con las futuras necesidades de operatividad, modularidad y fiabilidad en defensa. Se plantea, finalmente, una hoja de ruta para su consolidación como tecnología transversal en el diseño y mantenimiento de plataformas militares de nueva generación.

ATARI: inteligencia federada para gestión del ciclo de vida y mantenimiento predictivo en plataformas navales de defensa (DESEi+d, 2025: 151)

Sergio Zaera Mata (HI Iberia) y Roberto Gómez-Espinosa Martín (HI Iberia).

La superioridad operativa, la disponibilidad técnica y la resiliencia táctica de las plataformas navales dependen, cada vez más, de la capacidad para anticipar, diagnosticar y coordinar acciones de mantenimiento con precisión y seguridad. En este contexto, se presenta ATARI, una plataforma federada de inteligencia artificial especialmente diseñada para optimizar el ciclo de vida de los sistemas embarcados maximizando el rendimiento para el dominio naval de defensa e integrando tecnologías avanzadas de *federated learning, blockchain* y *smart contracts* en el ecosistema naval conectado.

Concebida para su despliegue en plataformas navales militares, ATARI habilita una arquitectura de entrenamiento distribuido de modelos predictivos a bordo, evitando la transferencia de datos sensibles fuera del perímetro de seguridad. Esta descentralización, basada en *federated learning*, permite consolidar inteligencia colaborativa sin comprometer la confidencialidad operativa y mejorar la resiliencia frente a entornos DDIL (*denied, degraded, intermittent, limited*). Las unidades navales pueden

generar modelos locales para estimar la *remaining useful life* (RUL) de sus sistemas, detectar patrones de fallo o planificar mantenimientos según contexto operativo, contribuyendo a extender la vida útil de equipos críticos y a maximizar la disponibilidad técnica en misiones de larga duración.

Los modelos de inteligencia artificial utilizados se diseñan para incorporar parámetros estructurales, perfiles de misión, condiciones ambientales del entorno marítimo-operacional y criterios de mantenimiento específicos del dominio naval. Este enfoque, basado en la integración de conocimiento experto y datos operacionales, permite construir representaciones más robustas y adaptadas a escenarios de alta exigencia táctica, como operaciones sostenidas, despliegues en zonas remotas o situaciones de alta carga operativa.

La arquitectura se refuerza con una red privada *blockchain* que actúa como capa de integridad y trazabilidad para todas las transacciones y eventos técnicos relevantes. Los *smart contracts* automatizan operaciones clave del ciclo de soporte logístico integrado, como la verificación de condiciones de fallo, la activación de órdenes de mantenimiento o la ejecución de acuerdos con entidades proveedoras bajo esquemas de logística contractual avanzada, garantizando tiempos de respuesta óptimos y trazabilidad auditable en entornos regulados.

ATARI proporciona así una plataforma digital soberana, segura y eficiente, alineada con los objetivos estratégicos del sostenimiento militar: reducir la carga logística, aumentar la autonomía táctica de las plataformas y garantizar una superioridad tecnológica sostenida en el tiempo. Su arquitectura modular lo hace apto para integración en sistemas C4I navales, y su orientación a la protección de datos sensibles refuerza la ciberdefensa y la interoperabilidad entre aliados.

Automatización inteligente del sostenimiento en buques mediante sensórica avanzada e IA (DESEi+d, 2025: 230)

Antonio J. Heredia (Dpto. Ingeniería de Computadores, Automática y Robótica, Universidad de Granada), Francisco V. Pérez (Universidad de Granada), Álvaro Novo (Dpto. Ingeniería de Computadores, Automática y Robótica, Universidad de Granada), Samuel F. Romero (Dpto. Ingeniería de Computadores, Automática y Robótica, Universidad de Granada), Gines Garcia Imbernon (COEX Smart Services, Navantia SA SME), José F. Ortega (COEX Smart Services - Navantia SA, SME), Víctor García (COEX Smart Services - Navantia SA, SME), Daniel Albaladejo (COEX Smart Services - Navantia SA, SME), Miguel Méndez (COEX Smart Services - Navantia SA, SME) y Francisco Barranco (Dpto. Ingeniería de Computadores, Automática y Robótica, Universidad de Granada).

En el marco de la colaboración europea en defensa y la cooperación estructurada permanente (PESCO) se están fomentando iniciativas como el programa EPC (European Patrol Corvette) para el desarrollo de una nueva generación de buques con tecnología avanzada. Entre los desafíos, se ha identificado la necesidad de implementar sistemas autónomos para optimizar las operaciones de sostenimiento y reducir la carga de las operaciones en la dotación como, por ejemplo, las de mantenimiento rutinario de primer escalón. Este trabajo presenta los resultados de un estudio colaborativo entre el COEX Smart Services de Navantia y la Universidad

de Granada (UGR), cuyo objetivo principal es la evaluación de sistemas de diagnóstico no invasivos para activos embarcados en entornos marinos mediante sistemas autónomos y sensores avanzados. Entre los desafíos encontrados, destaca la fiabilidad de los modelos en un entorno exigente como el de los buques, afectado por condiciones ambientales extremas, vibraciones y oscilaciones. Los primeros resultados obtenidos se han centrado en un sistema basado en inteligencia artificial que permita tanto la identificación de manómetros de presión y otros elementos analógicos en entornos industriales y marinos como métodos para la lectura, digitalización y almacenado de estos dispositivos, evaluando de la misma forma su grado de adecuación y fiabilidad. Todo esto pone de manifiesto el valor añadido de estos métodos frente a técnicas convencionales manuales. Adicionalmente, se ha estudiado cómo sensores avanzados de alta velocidad (sensores neuromórficos) pueden identificar anomalías a través del análisis de vibraciones mecánicas, con el objetivo de reducir la inversión e impacto de estos sistemas en entornos marinos.

La implementación de sistemas autónomos y tecnologías avanzadas en el mantenimiento de buques representa un avance significativo hacia la mejora de la eficiencia operativa, la seguridad a bordo y el refuerzo de la capacidad de las marinas europeas para enfrentar desafíos futuros con mayor resiliencia y adaptabilidad. Por ello, este trabajo explora soluciones basadas en el desarrollo de modelos de inteligencia artificial empotrados en sistemas autónomos no tripulados, equipados con computación de borde y diferentes modalidades sensoriales, que incluyen sensores ópticos convencionales y neuromórficos basados en retinas artificiales. Los desarrollos con estos últimos muestran el potencial para la detección temprana de fallos en equipos, defectos estructurales y fugas en motores y equipos auxiliares.

Fabricación aditiva y caracterización de CMCs de cordierita reforzados con RGO para soportes ópticos en aplicaciones espaciales (DESEi+d, 2025: 30)

Juan García-Martínez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Álvaro García Juárez (Universidad de Castilla-La Mancha, UCLM), Rafael García López (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Ingrid Esguerra Arce (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Sergio Ulargui de Diego (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Tomás Belenguer Dávila (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Javier García Hidalgo (Universidad de Castilla-La Mancha, UCLM), Gemma Herranz Sánchez-Cosgalla (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) y María García-Martínez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA).

La integración de sistemas ópticos en plataformas espaciales presenta importantes desafíos técnicos, siendo uno de los más relevantes la incompatibilidad térmica entre los materiales ópticos y sus estructuras de soporte tradicionales en metal. Estas diferencias de comportamiento térmico pueden provocar desalineaciones críticas en el servicio. En este contexto, los materiales cerámicos, y en particular los compuestos de matriz cerámica (CMC), ofrecen una alternativa viable por su baja expansión térmica y elevada resistencia al choque térmico. No obstante, las dificultades asociadas a la fabricación de geometrías complejas mediante

técnicas convencionales han limitado su implementación. La irrupción de la fabricación aditiva permite superar estos obstáculos, abriendo nuevas posibilidades para diseñar estructuras cerámicas avanzadas con propiedades adaptadas a entornos exigentes como los de defensa y espacio. En el marco del proyecto AERORECORD-3D, se ha desarrollado un material compuesto de cordierita reforzado con óxido de grafeno reducido (rGO), procesado mediante impresión 3D por extrusión (MEX, Material EXtrusion). Se han evaluado formulaciones con diferentes contenidos de refuerzo, procesadas mediante impresión 3D, eliminación y sinterización. Se han realizado ensayos mecánicos de flexión y compresión en un rango amplio de condiciones térmicas —baja, ambiente y alta temperatura—, así como tras ciclos de choque térmico. Además, los especímenes fueron caracterizados meso y microestructuralmente mediante microscopía óptica y electrónica. Esta combinación de análisis estructural y funcional ha permitido establecer la relación entre los defectos generados durante el proceso aditivo y el comportamiento mecánico final de los materiales. Como aplicación directa, se ha diseñado y fabricado un prototipo funcional de soporte cerámico para lentes ópticas de satélite, con el objetivo de reemplazar componentes metálicos como el Ti6Al4V. Este desarrollo busca minimizar los desajustes térmicos entre soporte y lente, mejorar la estabilidad dimensional y aligerar el sistema. Se prevén ensayos funcionales térmico-ópticos del conjunto una vez se haya perfeccionado el mecanizado en verde, cuidando las tolerancias dimensionales tras sinterización. Esta validación permitirá comprobar la viabilidad de estos CMCs en condiciones de operación orbital o en aplicaciones críticas de defensa. Los resultados obtenidos subrayan el potencial de la fabricación aditiva en el desarrollo de materiales cerámicos estructurales avanzados para el sector espacial y de defensa, donde la fiabilidad, precisión y rendimiento térmico son aspectos fundamentales.

Recubrimientos multifuncionales avanzados basados en nanomateriales para aplicaciones en defensa (DESEi+d, 2025: 71)

Alberto Tielas Macía (CTAG, Centro Tecnológico de Automoción de Galicia), Raquel Ledo (CTAG, Centro Tecnológico de Automoción de Galicia), Vanessa Ventosinos Louzao (CTAG, Centro Tecnológico de Automoción de Galicia), Denise García Murias (CTAG, Centro Tecnológico de Automoción de Galicia), Miguel Ángel de Dios Álvarez (CTAG, Centro Tecnológico de Automoción de Galicia), Carlos Bandrés Diéguez (CTAG, Centro Tecnológico de Automoción de Galicia) y Esteban Paredes Barros (CTAG, Centro Tecnológico de Automoción de Galicia).

Ante un nuevo paradigma mundial que involucra una creciente necesidad de soluciones avanzadas para el sector defensa, se requiere el desarrollo de soluciones a medida, adaptables y multifuncionales, así como fáciles de integrar y mantener, de cara a dar respuesta a los desafíos cruciales de este sector. En esa línea, este estudio aborda la investigación y desarrollo de nuevas soluciones en recubrimientos avanzados basados en dispersiones de nanopartículas para su aplicación sobre cualquier tipo de sustrato, dotándolo de nuevas funcionalidades que pueden ser interesantes para su uso en vehículos militares o bien en ropa de combate.

Los vehículos militares incorporan cada vez más dispositivos de comunicación y sensores integrados que suponen un reto creciente en materia de interferencias electromagnéticas, lo que supone un riesgo para la

seguridad del vehículo y sus ocupantes. Se necesita, por tanto, utilizar materiales aislantes en sus carcasas, que cuenten con propiedades específicas para el blindaje de interferencias electromagnéticas en el rango de uso habitual (30 MHz a 1,5 GHz), sin perder propiedades de robustez, fiabilidad y ligereza. Las soluciones actuales a menudo implican la integración de láminas metálicas o recubrimientos conductores basados en negro de humo o grafito que, o bien son muy pesadas y propensas a fallos por delaminación, o bien no son eficaces en ciertos umbrales de frecuencias bajas. Este estudio propone la integración de las propiedades de apantallamiento electromagnético en la propia estructura de la carcasa de protección de los dispositivos electrónicos gracias a la aplicación de una nueva formulación de recubrimiento basado en la combinación de nanopartículas carbonosas y ferromagnéticas.

Otra aplicación investigada en este estudio es la integración de propiedades calefactables en tejidos, gracias a una formulación adaptada de nanopartículas carbonosas y a la aplicación intrínseca de electrodos de alimentación utilizando un proceso avanzado de deposición química, de forma que se garantiza la homogeneidad de la temperatura a lo largo de la superficie a la vez que se mantiene la flexibilidad del tejido y un cierto grado de elongación.

La customización de la formulación de la dispersión del recubrimiento desarrollada en este estudio permite también el desarrollo de sensores integrados en cualquier superficie, dotándolas de propiedades capacitivas, resistivas o como sensor de temperatura o de campo cercano. De hecho, es posible crear soluciones multifunción a medida, de forma que sea posible combinar más de una propiedad en una sola aplicación (por ejemplo, sensor capacitivo y confort térmico).

Análisis del daño por cavitación en la tobera de una hélice de acero inoxidable austenítico e investigación de los cambios microestructurales asociados (DESEi+d, 2025: 76)

M. Victoria Biezma-Moraleda (Universidad de Cantabria), Roland Haubner (Technische Universität Wien, Viena, Austria), Susanne Strobl (2 Technische Universität Wien, Viena, Austria) y Paul Linhardt (2 Technische Universität Wien, Viena, Austria).

El presente estudio se focaliza en estudiar un segmento de tobera de la hélice de una draga de acero inoxidable austenítico AISI 316 gravemente dañada por efecto de la cavitación y desgaste, cuyo patrón de daño varía en la superficie de severo a insignificante, establecido gracias al empleo del microscopio digital 3D (3D-DM). Se llevó a cabo una selección de secciones transversales, observándose también picaduras de las que se extienden grietas sin ramificar hasta el material sin daño. El estudio metalográfico realizado, gracias a una preparación mediante pulido y ataque químico con reactivo Blöch-Wedl, permite apreciar diferentes microestructuras, a su vez, con distinto grado de deformación, plasmado en la aparición de maclas, que varían con la distancia a la superficie dañada. Todo ello permite concluir la aparición de un efecto del daño mecánico, cavitación y erosión, sobre las transformaciones de cambio de fase *in situ*

que experimenta el acero AISI 316 L, de austenita a martensita altamente deformada. Y ocurridas durante el servicio, asimismo, se pudo apreciar un aumento de la magnetizabilidad a medida que aumenta el grado de daño asociado a dicho cambio microestructural del material, lo que pone de manifiesto cómo un material puede cambiar su comportamiento y propiedades durante el servicio.

Optimizando el blindaje balístico: nuevos diseños de estructuras reticulares de aceros económicos (316lSi y H11) mediante fabricación aditiva WL-DED (DESEi+d, 2025: 94)

Carlos Peñalba Luna (Escuela Politécnica Superior del Ejército), Pablo E. Romero (Universidad de Córdoba), Ramón González Merino (Novaindef, Soluciones Sicnova), Manuel Lopera Rodríguez (Novaindef, Soluciones Sicnova) y Fernando Lasagni (Novaindef, Soluciones Sicnova).

La optimización de los sistemas de blindaje balístico es crucial en el ámbito de la defensa, buscando constantemente mejorar la protección manteniendo o reduciendo el peso y el coste. Los aceros de blindaje específicos, aunque efectivos, suponen una inversión económica considerable y un reto logístico para garantizar su disponibilidad en zonas de operaciones. Este trabajo explora alternativas más económicas y eficientes en términos de peso y abastecimiento en una situación de despliegue militar. El estudio presenta un doble enfoque. En primer lugar, se realiza una evaluación comparativa mediante simulación numérica del rendimiento balístico de aceros comerciales de menor coste frente a un acero de blindaje. Se seleccionan el acero inoxidable austenítico 316LSi y el acero de herramientas H-11 como candidatos debido a sus propiedades mecánicas y su menor coste relativo. Se simula el impacto de un proyectil

estándar OTAN 5.56x45 SS109 mm de cuatro gramos sobre placas macizas de estos materiales y del acero de blindaje de referencia. El objetivo es determinar y comparar los espesores mínimos requeridos para cada material que permitan detener eficazmente el proyectil, estableciendo así una línea base de rendimiento balístico y viabilidad como sustitutos. Esta simulación se validará mediante prueba experimental sobre el terreno. En segundo lugar, se aborda la optimización de la relación protección/peso mediante el diseño de estructuras reticulares metálicas. Estas geometrías complejas permiten una distribución más eficiente del material, mejorando potencialmente la capacidad de absorción de energía por unidad de masa en comparación con las placas sólidas. Los diseños propuestos se conciben específicamente para fabricación aditiva metálica, en particular con procesos de deposición de energía directa por láser e hilo (Meltio WL-DED). Se elige esta técnica por su versatilidad para trabajar con diferentes aleaciones metálicas relevantes para blindajes y su capacidad para construir geometrías complejas con relativa rapidez y eficiencia de material. Los resultados de este estudio proporcionarán datos comparativos sobre la eficacia de los aceros 316LSi y H-11 como alternativas para el desarrollo de placas balísticas y sentarán las bases para su mejora, reduciendo su peso mediante diseños basados en estructuras reticulares optimizadas. Esta investigación busca capacitar a las FAS, proporcionándole autonomía en la fabricación de placas balísticas a través de soluciones innovadoras que combinen la reducción de costes mediante el uso de materiales alternativos y la mejora de la eficiencia estructural a través del diseño avanzado y la fabricación aditiva, con potenciales aplicaciones en vehículos e infraestructuras de defensa.

Detección y clasificación de defectos en placas de acero mediante modelos visuales de lenguaje (DESEi+d, 2025: 106)

Enol Ayo Sando (Universidad Politécnica de Madrid), Lucía Cristina Martín Pérez (ISDEFE) y Carlos Roberto del Blanco (Universidad Politécnica de Madrid).

El acero es uno de los materiales más importantes en la industria militar debido a su extensiva utilización: vehículos, armamento, infraestructuras, blindaje, etc. No obstante, existe una serie de defectos que pueden aparecer en el proceso de fabricación de las placas de acero y que empobrecen las propiedades de este material, degradándolo por debajo del nivel de calidad que requiere el uso militar. Por tanto, la detección temprana y preventiva de tales defectos tiene mucha relevancia y ha sido objeto de numerosos trabajos. Existen métodos manuales para su detección, pero son lentos y costosos, por lo que es un campo en el que los sistemas basados en inteligencia artificial y aprendizaje profundo pueden aportar una solución de forma automática y rápida. El problema de algunos de estos métodos es que requieren grandes bases de datos anotadas para entrenarse, las cuales son muy costosas y complejas de crear. En este trabajo se explora el uso de los modelos visuales de lenguaje, que apenas se han utilizado en esta área. Concretamente, se utilizará un modelo que permite detectar y segmentar defectos a partir de una imagen de ejemplo o de un texto descriptivo y que, al estar basado en modelos fundacionales, se

ajusta al reto planteado por la escasez de datos en el campo de defectos en placas de acero. El sistema propuesto es capaz de clasificar a nivel de píxel la región de una imagen de placa de acero que contiene un defecto utilizando tan solo como entrada una imagen de referencia del defecto o texto descriptivo del mismo. Al no tratarse de un clasificador en el sentido tradicional, con un número de clases prefijadas, permite la incorporación de nuevas clases de defectos que no han sido consideradas con anterioridad, sin requerir el reentrenamiento del sistema, gracias al uso subyacente del modelo fundacional CLIP, que se utiliza para generar representaciones semánticas de la referencia del defecto y de la imagen donde se desea buscar el defecto. Dichas representaciones son usadas como entrada a un decodificador basado en una arquitectura *transformer* que genera un mapa de segmentación con instancias del defecto deseado en la imagen de entrada. El sistema, además, permite la novedad de usar simultáneamente varias referencias de defectos para obtener una segmentación. Para la evaluación del sistema se utilizará la base de datos Severstal junto con la métrica de segmentación DICE, realizando una comparación con otros trabajos del estado de la cuestión.

Integración de PCMs en equipamiento militar: optimización del camuflaje térmico y reducción de firma infrarroja (DESEi+d, 2025: 108)

Javier Díez Sierra (CIIAE, Centro Ibérico de Investigación en Almacenamiento Energético), Claudia Gómez Aguirre (CIIAE, Centro Ibérico de Investigación en Almacenamiento Energético) y Breogán Pato Doldán (CIIAE, Centro Ibérico de Investigación en Almacenamiento Energético).

El desarrollo de equipamiento militar basado en materiales avanzados que mejore el camuflaje térmico es crucial para optimizar la supervivencia, especialmente relevante en misiones encubiertas y operaciones en escenarios donde la detección por sensores térmicos representa una amenaza significativa. Este trabajo explora la reducción de la firma infrarroja del combatiente mediante la integración de materiales de cambio de fase (*phase change materials*, PCM) en textiles utilizados en equipamiento militar, como uniformes, cascos y pasamontañas. El objetivo es homologar la temperatura superficial del usuario a la del entorno, dificultando así su detección mediante cámaras térmicas.

Los PCM tienen la capacidad de absorber y liberar energía al cambiar de fase, permitiendo el control de la temperatura y, por lo tanto, la emisión de radiación. Para alcanzar la invisibilidad térmica, se propone utilizar PCMs con un intervalo de transición térmica entre aproximadamente 20 °C y 30 °C. Este rango posibilita que la temperatura superficial del

equipamiento se ajuste, de manera que se asemeje a la del ambiente. La técnica de microencapsulación permite incorporar de forma segura y duradera los PCM en las fibras textiles, sin comprometer la flexibilidad ni el confort del usuario. Además, la integración adecuada de PCM en el uniforme no solo minimiza la diferencia entre la temperatura corporal y la del entorno, sino que también ofrece protección al combatiente frente a variaciones ambientales extremas.

Se optará por formulaciones basadas en parafinas o sales hidratadas, microencapsuladas y se analizarán los retos técnicos, como los derivados de la durabilidad y la estabilidad de los PCM microencapsulados tras múltiples ciclos de fusión y solidificación, la respuesta del material ante cambios bruscos de temperatura y la integración con otros componentes de la indumentaria sin añadir peso o rigidez excesiva.

La implementación de PCM en equipamiento militar puede suponer un avance significativo en la reducción pasiva de la firma infrarroja y representa un enfoque tecnológico prometedor para mejorar el camuflaje térmico individual sin recurrir a sistemas activos complejos, con un impacto directo en la seguridad del combatiente.

Tecnología DED para fabricación quirúrgica en entornos operativos militares (DESEi+d, 2025: 133)

Ramón González (Novaindef, Soluciones Sicnova), Diana María Crego Vita (orthopedic surgeon in Ministry of Defense), Mónica Huecas Martínez (orthopedic surgeon in Ministry of Defense), Elena Sánchez-López (Department of Graphic and Geomatic Engineering, Campus of Rabanales, University of Córdoba), Manuel Lopera Rodríguez (Novaindef, Soluciones Sicnova) y Fernando Lasagni (Novaindef, Soluciones Sicnova).

La disponibilidad de instrumental quirúrgico en entornos de operación remotos constituye un desafío logístico relevante, especialmente en contextos militares donde las condiciones de suministro son limitadas. En este trabajo se presenta una solución basada en la fabricación aditiva (FA) por deposición de energía dirigida con láser e hilo (WL-DED), orientada a la producción directa de herramientas quirúrgicas en zona de operaciones. Se emplea acero inoxidable 316L, material reconocido por su biocompatibilidad y resistencia mecánica, como base para la construcción de instrumental funcional bajo condiciones controladas de impresión y posprocesado.

El enfoque propuesto permite abordar de forma directa la dependencia del suministro externo de dispositivos médicos, habilitando capacidades de reposición y personalización *in situ*. Esta estrategia aporta una ventaja significativa en términos de resiliencia logística y continuidad asistencial

en despliegues sanitarios del Ejército, donde el acceso a medios convencionales de reabastecimiento puede verse comprometido.

Desde la perspectiva técnico-científica, el estudio profundiza en la parametrización del proceso WL-DED aplicado a geometrías quirúrgicas, así como en los tratamientos posteriores necesarios para garantizar la conformidad con los requisitos funcionales y normativos de dispositivos médicos. Se analiza la viabilidad operativa del sistema Meltio para la fabricación en acero inoxidable en condiciones de campo, considerando factores como la estabilidad térmica del proceso, la precisión dimensional y la calidad superficial obtenida tras posprocesado mecánico y térmico.

La validación funcional del instrumental se orienta a asegurar su integridad estructural, su capacidad de esterilización y su comportamiento mecánico en escenarios clínicos simulados. Este enfoque permite no solo reducir el volumen de carga logística asociada al material médico, sino también habilitar una capacidad de respuesta ágil ante necesidades emergentes en entornos remotos o de difícil acceso.

La incorporación de esta tecnología representa un vector de innovación con impacto directo en la sostenibilidad operativa, la autonomía médica de los despliegues y la capacidad de adaptación táctica. Su implementación sienta las bases para futuras aplicaciones de FA metálica en el ámbito de la defensa, especialmente en la fabricación de dispositivos críticos donde la disponibilidad inmediata resulta determinante para la operatividad.

DED -lw / LPBF solución para fabricación aditiva de piezas de fortuna - impulsor de agua en circuito de refrigeración (Armada española JEMANDIZ Rota / Novaindef / CEDAEC Linares / APERAM) (DESEi+d, 2025: 163)

Raúl Torres Fernández (Armada española), Sergio de la Mota (Armada española), Javier Racero Catalan (Novaindef), Arnold Biehler (Novaindef), Francisco Javier Gonzalez (Novaindef), Fernando Adrián Lasagni (Novaindef), José Sivo Romero (Novaindef), Francesc Martínez Miron (Novaindef) y Marta Moya (Aperam Stailness Services y Solutions Iberica).

Los impulsores de tipo cerrado son piezas de desgaste que están en contacto con fluidos como agua dulce, agua salada o combustible, sufriendo desgaste mecánico y corrosión. Las piezas tradicionalmente fabricadas en fundición debido a los materiales elegidos (CuSn/CuNi/CuNiAl) pueden ser realizadas en materiales como aceros de tipo inoxidable como el 316L cuyo potencial de corrosión (316: 0.00,–0.10v (–0.35,–0.45 sin perder capa de pasivación) *vs*. al CuNi30 (–0.14,–0.25v Naval Bronze: –0.24,–0.34v) le permite instalarse en lugar de la pieza original sin que se produzca corrosión por par galvánico. Los plazos de fabricación en el caso de una pieza de fundición son dilatados y no permiten realizar una

sustitución inmediata en caso de rotura anticipada. Por esta razón gracias a la técnica de DED LW y PWF se pueden realizar piezas en cuestión de días con un nivel de acabado superficial equivalente al obtenido por proceso de fundición y una densidad de pieza por encima del 99%. El caso que presenta el artículo trata cómo la fabricación aditiva permite, en cuestión de días, integrar en la cadena de suministro una pieza válida para su uso, bien como solución temporal o permanente. Para llevar a cabo la fabricación de la pieza se parte de dos rutas de fabricación, una por tecnología de cama de polvo LPBF, y otra por tecnología de DED LW Meltio, ambas utilizando como material base el acero inoxidable 316L por su versatilidad y resistencia frente a la corrosión y desgaste. La dificultad de realizar un impulsor en DED, nunca antes fabricado por esta técnica, hace que, además, su coste de escala sea muy inferior a la pieza por fundición.

Comportamiento a cavitación del bronce al aluminio y manganeso en agua de mar (DESEi+d, 2025: 177)

Lourdes Merino Galván (Universidad de Cantabria), María Victoria Biezma Moraleda (Universidad de Cantabria) y Paul Linhardt (Technische Universität Wien, Vienna, Austria).

El bronce *manganese aluminium bronze* (MAB) es uno de los materiales más empleados en la fabricación de componentes claves para la integridad y seguridad de un buque en elementos tales como válvulas, rodetes de bombas y hélices navales debido a su excepcional resistencia a la cavitación, cavitación-erosión y corrosión. La degradación por cavitación del material de la hélice puede reducir significativamente el rendimiento propulsivo del buque, aumentando el consumo de combustible entre un 10% y un 15% en condiciones normales de navegación, con el consecuente impacto en términos económicos y ambientales. En este estudio, se ha simulado el efecto de la cavitación sobre probetas de MAB en estado de recepción, moldeo, y en dos intervalos de 45 minutos usando un baño ultrasónico de 40 kHz y 100 W de potencia, empleando diversos electrolitos para evaluar el comportamiento del material en diferentes condiciones de trabajo: agua de mar natural (SBW) y el agua de mar artificial (ASW), por ser el más empleado en la literatura científica. Asimismo, se empleó agua destilada (DW) y agua destilada con nanopartículas (DWP) para evaluar el efecto de la presencia de impurezas y la

corrosividad del electrolito sobre el material. Se emplearon técnicas de observación microscópica para estudiar el daño superficial del material. Considerando que el MAB es un material multifásico con fases ricas en Cuy Al, fases alfa y beta respectivamente, y compuestos intermetálicos de diferente composición química y morfología, fases κ, los resultados revelan que el MAB experimenta una notable erosión de fases κ y corrosión selectiva de la fase β, siendo particularmente agresiva el agua de mar natural, lo que denota la contribución del factor corrosión al proceso de la cavitación. De esta forma, se puede concluir que la respuesta del MAB frente a la cavitación está estrechamente vinculada con su microestructura y su capacidad de generar una capa protectora, siendo notable la influencia de las nanopartículas presentes en el agua destilada al ejercer un efecto continuo erosivo, sirviendo también, como sitios de nucleación durante el proceso de cavitación. El estudio comparativo de los diferentes electrolitos ha proporcionado una comprensión más profunda de los mecanismos de degradación del MAB, que resulta fundamental para optimizar la selección del material y desarrollar técnicas de modificación microestructural, todo ello orientado a mejorar el rendimiento en servicio y promover una navegación más sostenible y económicamente eficiente.

Recubrimientos Cr_2AlC (*MAX phase*) depositados por *sputtering* resistentes a la corrosión, al desgaste y a temperaturas extremas (DESEi+d, 2025: 205)

Raquel Bayón (TEKNIKER), Patricia Fernández (TEKNIKER), Oihane Hernández (TEKNIKER), Cristina Zubizarreta (TEKNIKER) y Eva Gutiérrez (TEKNIKER).

Los recubrimientos *MAX phase* son una familia única de materiales que combinan la conductividad metálica con propiedades cerámicas, ofreciendo un equilibrio excepcional de estabilidad a altas temperaturas, resistencia al desgaste y a la corrosión. Durante los últimos años, este tipo de compuestos ha experimentado un creciente interés como solución viable para proteger y alargar la vida de componentes críticos expuestos a condiciones extremas. Dentro de las diferentes composiciones de recubrimiento, los compuestos basados en Ti2AlC, Ti3AlC2 y Cr2AlC son capaces de formar una capa protectora de Al2O3 que resiste entornos agresivos a temperaturas entre (900 °C y 1400 °C) durante largos periodos de tiempo. En este trabajo se han desarrollado y caracterizado recubrimientos del tipo Cr2AlC-*MAX phase* depositados mediante PVD-*sputtering* sobre sustratos de Inconel. Tras la optimización de los parámetros de proceso empleando diferentes tipos de fuentes (DC, DC pulsada y HIPIMS), los recubrimientos se caracterizaron mediante difracción de

rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDS) para determinar sus características estructurales, morfológicas y composicionales. También se evaluó su comportamiento funcional mediante ensayos de oxidación a 700 °C, ensayos de corrosión a alta temperatura en presencia de atmósfera corrosiva y ensayos tribológicos de *fretting*-corrosión a varias temperaturas (400 °C-800 °C). Los resultados mostraron que los recubrimientos de Cr_2AlC mejoraron significativamente la resistencia a la corrosión y al desgaste a altas temperaturas del sustrato, lo que los convierte en una opción prometedora para proteger componentes que requieran trabajar en condiciones extremas.

Tecnología GEL-ELECTRODE para tratamientos de superficie localizados durante la reparación de componentes en misiones (DESEi+d, 2025: 233)

Pablo Santamaria (CIDETEC, Basque Research and Technology Alliance BRTA, 20014 Donostia-San Sebastián, España), Belén García (CIDETEC, Basque Research and Technology Alliance BRTA, 20014 Donostia-San Sebastián, España), Jorge Rodríguez (CIDETEC, Basque Research and Technology Alliance BRTA, 20014 Donostia-San Sebastián, España) y Amaya García (CIDETEC, Basque Research and Technology Alliance BRTA, 20014 Donostia-San Sebastián, España).

Los tratamientos de superficie de metales son una parte clave en los procesos de fabricación, y son comúnmente empleados por su capacidad de dotarlos de propiedades relevantes, entre las que destaca la resistencia a la corrosión por su claro efecto en el aumento de la vida útil de los componentes. Durante el proceso de fabricación, algunos de estos tratamientos de superficie, como el anodizado, se llevan a cabo típicamente en líneas de proceso especializadas en las que las piezas se sumergen secuencialmente en baños que contienen electrolitos líquidos. Durante la vida útil de los componentes, suelen producirse daños en la superficie, y la reparación de éstos es crucial para no comprometer la durabilidad de todo el componente. En estas situaciones, la posibilidad de disponer de tratamientos de superficie localizados es especialmente deseable, ya que

tener baños de tratamiento disponibles de forma constante para realizar estas reparaciones solo resulta viable en circunstancias excepcionales y es difícilmente implantable en misiones. En el caso concreto de anodizado, aunque existen varios métodos para la realización de tratamientos localizados (DALIC, SIFCO, PANTA…) estos presentan diversas limitaciones operacionales. En general, se trata de métodos de poca practicidad y medioambientalmente no sostenibles que consisten en equipos sofisticados que representan, además, riesgos importantes de seguridad por posibles fugas de electrolitos líquidos (generalmente productos con cierta toxicidad) durante su aplicación. Asimismo, algunos de estos métodos dejan residuos sobre la superficie después del proceso, lo que obliga a realizar una limpieza cuidadosa para eliminar estos residuos ácidos. Por último, son procesos difíciles de controlar y que generan recubrimientos de espesor no uniforme. Frente a estas limitaciones, CIDETEC ha desarrollado una prometedora tecnología de tratamientos superficiales para anodizado basada en electrolitos gelificados, que permite realizar tratamientos selectivos *in situ* sin necesidad de desmontar la pieza durante una reparación y sin requerir de pasos específicos previos de preparación superficial. Los procesos desarrollados han mostrado unas prestaciones finales comparables a las de los métodos convencionales por inmersión. Además, los electrolitos desarrollados, por encontrarse gelificados, son mucho más seguros, fácilmente aplicables a diferentes tamaños y geometrías de piezas y adaptables a diferentes procesos de tratamiento superficial químicos y electroquímicos. Además, una vez realizado el tratamiento, el gel es fácil de retirar y la superficie resultante se limpia con facilidad, quedando libre de residuos y sin arrastre de material.

Nuevos tiempos, nuevos materiales: ¡apósitos antimicrobianos al combate! (DESEi+d, 2025: 298)

Joaquin Fidalgo Pernía (Hospital General de la Defensa de Zaragoza), Sara Chiquero Valenzuela (Hospital Clínico Universitario Lozano Blesa de Zaragoza), Susana Zurro González (CS La Puebla, Palencia), María Jesús Diez Pardo (Central del compras y logística del Gobierno de Aragón) y Cristian Alquezar Larroya (CS de Binefar, Huesca).

La incorporación de nuevas tecnologías permite el desarrollo de apósitos con características especiales. La llegada de estos al mercado a través de diferentes productos comerciales da la posibilidad de su utilización en las Fuerzas Armadas. Los apósitos hidrófobos impregnados de cloruro dialquilcarbamoilo (DACC) tienen la capacidad de absorber y captar los gérmenes en las heridas por un método físico, sin utilizar principios activos químicos. Como características destacadas: pueden ser usados en todo tipo de heridas que se quieran prevenir o combatir la infección; aceleran la cicatrización por no producir muerte celular en el lecho de la herida; no producen sensibilizaciones o reacciones alérgicas que pueden tener los antimicrobianos tópicos; no requieren más espacio que una gasa tradicional pudiéndose incorporar con facilidad al equipo individual de combate (BIC). En cuanto a los objetivos, el principal es valorar la incorporación de apósitos, con las características necesarias para las Fuerzas Armadas. Ateniendo a los específicos, se busca valorar

casos concretos en el tratamiento con apósitos hidrófobos impregnados de DACC; valorar la incorporación de los mismos al botiquín individual de combate (BIC); valorar la incorporación a nivel de segundo y tercer escalón sanitario desplegado.

El material y método utilizado ha sido un estudio observacional directo y documentado a través de la escala de Resvech 2.0 adaptada en el tratamiento de heridas con este tipo de material. Además se ha analizado la utilización del apósito como primera capa sobre la herida combinándolo o fijándolo con vendajes u otros apósitos secundarios.

En los casos estudiados se observó un descenso en la escala de medición a partir de la primera cura, frenando la infección y acelerando la cicatrización. No hubo desarrollo de resistencias bacterianas ni irritaciones por contacto, no se adhirió al lecho de la herida al retirarlo y pudo mantenerse, sin cambio, hasta seis días.

Con todo ello, se concluyó que este es un producto único de absorción por captación de patógenos en heridas por un método físico que ayuda en la cicatrización. Además, se considera que se adapta a las necesidades de las Fuerzas Armadas en la actualidad, integrándose en el botiquín individual de combate y permitiendo aumentar la operatividad de los soldados en el teatro de operaciones gracias a sus características. Cabe destacar que puede ser administrado por personal no facultativo ni adiestrado. Puede, por tanto, incorporarse a la dotación de las formaciones sanitarias tipo Role2 y Role2+.

Análisis multicriterio para la integración de baterías de ion-litio en submarinos convencionales (DESEi+d, 2025: 12)

Augusto Conte de los Ríos (Armada, Cátedra Jerónimo de Ayanz), Alfonso Esteban Paredes (Armada, Escuela de Submarinos), Gonzalo José Acuña Fuentes (Navantia, Departamento de Pruebas) y Ernesto Madariaga Domínguez (Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Náutica).

El presente trabajo estudia la viabilidad de sustituir las actuales baterías de plomo-ácido por baterías de ion-litio en submarinos convencionales, orientado al futuro relevo de la serie S-80. El objetivo es definir la arquitectura preliminar del sistema de baterías y su sistema de control, mejorando la autonomía, la fiabilidad y la sostenibilidad del submarino. Para ello, se aplica el método *analytic hierarchy process* (AHP) comparando distintas tecnologías de ion-litio —NMC (níquel-manganeso-cobalto), LFP (litio-fosfato-hierro), NCA (níquel-cobalto-aluminio) y LTO (titanato de litio)— frente a las baterías de plomo-ácido actuales. El análisis considera criterios operativos y técnicos como energía específica, autonomía en inmersión, vida útil, seguridad, mantenimiento, consumo energético y adaptación a los espacios y sistemas auxiliares existentes en el submarino. Se tienen en cuenta también aspectos relacionados con la facilidad de integración y la necesidad de rediseño del submarino actual. Los resultados muestran que la transición a ion-litio permitiría aumentar

un 53 % la energía disponible y un 45 % las horas de inmersión respecto al plomo-ácido. Además, se mejorará la vida útil (>10 años), se reducen los coeficientes de indiscreción en tránsito y patrulla diésel-eléctrica hasta un 14 % y se disminuye el consumo de gasoil en un 12 %. La redundancia del sistema limita las pérdidas energéticas por fallos a menos del 1 %, frente al 10 % de las configuraciones actuales. La tecnología de ion-litio proporcionaría, por tanto, mejoras significativas en autonomía, eficiencia energética y seguridad, recomendándose su adopción como base para el futuro desarrollo de submarinos. Finalmente, se propone una primera definición detallada de la arquitectura del sistema de energía y propulsión, así como del sistema de gestión de baterías (BMS), adaptados a las futuras plataformas S-80 y sus posibles derivados.

Avances en el proyecto PCVEMI: diseños e integración de sistema de propulsión basados en pilas de combustible en vehículos militares (DESEi+d, 2025: 222)

José Ignacio Domínguez Carrero (Fundación CIDAUT), Manuel Salgado Alejo (Fundación CIDAUT), Miguel Ángel Morcillo López (Fundación CIDAUT), Adrián Martín Pintos (Fundación CIDAUT), Christian Salan Conde (Fundación CIDAUT) y Alfonso Horrillo Güemes (Fundación CIDAUT).

El proyecto PCVEMI, liderado por la fundación CIDAUT, avanza hacia la definición de vehículos militares más eficientes, con mayor eficacia operativa y menor huella ambiental gracias a la integración de sistemas de propulsión que empleen combinaciones de pilas de combustible de hidrógeno y baterías. Dicho proyecto permite generar el conocimiento y las metodologías de integración necesarias a partir de las cuales desarrollar tecnología nacional específica para el uso de pilas de combustible en vehículos militares, cumpliendo con los exigentes requerimientos y prestaciones de este entorno operativo de movilidad. En concreto, a partir del desarrollo del proyecto se han llevado a cabo estudios de diseño y simulación de estos sistemas de propulsión eléctrica para diferentes demandas energéticas. Tras una etapa inicial de definición y puesta a punto de los modelos de simulación, en la que se han seleccionado los

diferentes elementos del sistema de propulsión así como sus prestaciones, se han obtenido las primeras conclusiones de diseño y configuración para determinados tipos de vehículos militares, permitiendo abrir las siguientes líneas de investigación en cuanto a la integración física en los vehículos. De forma paralela, se ha trabajado en una metodología de estudio de comportamiento mecánico del conjunto pila de combustible ante vibraciones y exigencias del entorno operativo propio de estos vehículos militares. Dicha metodología va orientada al diseño y caracterización de comportamiento de los apoyos, soportes y protecciones necesarios a la hora de integrar estos sistemas en los vehículos militares. El objetivo final es minimizar las vibraciones que llegan a la pila de combustible para que se vea afectada lo mínimo posible tanto desde el punto de vista de integridad estructural como de prestaciones alcanzadas. El proyecto PCVEMI: «Desarrollo de un sistema de propulsión basado en una pila de combustible nacional para su uso en plataformas de vehículos terrestres militares» se desarrolla gracias a la convocatoria 2022 del programa COINCIDENTE del Ministerio de Defensa del Gobierno de España.

Integración a bordo de procesos de reformado y pila de combustible en aplicaciones militares (DESEi+d, 2025: 224)

Alfonso Horrillo Güemes (Fundación CIDAUT), Daniel Sopeña Escario (Fundación CIDAUT), Álvaro Pérez Rodríguez (Fundación CIDAUT) y José Ignacio Domínguez Carrero (Fundación CIDAUT).

Por su operación discreta, los vehículos con sistemas de propulsión basados en hibridaciones de pila de combustible y baterías resultan de gran interés en aplicaciones militares. Frente a aplicaciones basadas en motores térmicos en los que el volumen y peso del almacenamiento del combustible son pequeños debido a su gran volatilidad, los almacenamientos de hidrógeno requieren mayores volúmenes y pesos que dificultan su integración. En transporte terrestre es habitual almacenar H2 en depósitos a presiones de 700-350 bar, lo cual lleva a densidades energéticas en el depósito entre diez y veinte veces menores de las que se tienen con los combustibles líquidos. Presiones por encima de los 700 bar incrementan de forma muy importante las solicitaciones mecánicas sin un incremento importante de la masa almacenada por ser los coeficientes de compresibilidad muy elevados en estos niveles de presión. En cualquier caso, los depósitos de H_2 presurizado deben ser pequeños, con espesores de pared elevados y formas necesariamente cilíndricas para soportar este nivel de presión, lo cual lleva a volúmenes efectivos ocupados y masas de almacenamiento muy elevadas. Los requisitos importantes de potencia o

autonomía en el sistema de propulsión hacen inviable la utilización de los depósitos a presión como almacenamiento por necesitar mucho espacio. Frente al almacenamiento de H_2 a presión, existe la posibilidad de almacenar un combustible líquido, en cuyo caso, el requisito de tamaño crece con la raíz cuadrada del producto de la potencia por la autonomía. Así, a partir de unas determinadas necesidades energéticas, producto potencia-autonomía, resulta ventajosa la utilización de esta solución. Desde el punto de vista de consumo energético son comparables las necesidades energéticas para comprimir el H_2 y las que requiere el proceso de reformado de combustible líquido. Este tipo de integración es utilizado, por ejemplo, en grupos de AIP de tercera generación para la propulsión anaerobia de submarinos. Como ejemplo de utilización, en este trabajo se compara el volumen y masa ocupados por los sistemas de almacenamiento a presión de H_2 y el reformado con vapor de metanol para distintas necesidades de almacenamiento a bordo, condicionadas por la potencia del sistema de propulsión y la autonomía requerida. Los resultados muestran el interés de la aplicación de este planteamiento en diferentes aplicaciones de propulsión en el sector de defensa.

Metaanálisis comparativo de la transitabilidad en entornos sin camino: vista aérea frente a vista UGV (DESEi+d, 2025: 44)

César Ortego Navacerrada (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA).

Actualmente, la necesidad de identificar rutas en escenarios desconocidos se ha hecho más notable, en especial cuando hay obstáculos imprevistos o en entornos de ataque, como en el rescate de heridos, la exploración interplanetaria y los conflictos bélico-militares. Por ello, se hace más notable el estudio de la transitabilidad, es decir, el estudio de la probabilidad de paso de un vehículo concreto en cada zona de un entorno dado.

La transitabilidad lleva más de veinte años estudiándose en diversos ámbitos, pero el auge en la inteligencia artificial ha motivado su estudio en relación con la conducción autónoma. Las zonas de paso calculadas por la transitabilidad permiten trazar una ruta para el vehículo entre el origen y el destino que deseemos.

Se estudia en entornos estructurados, como interiores y ciudades, porque siempre puede haber obstáculos imprevistos, como baches o peatones imprudentes, pero su uso se vuelve necesario en entornos fuera de carretera para encontrar una zona de paso viable.

En entornos desestructurados los obstáculos son más diversos y difusos, por lo que son más difíciles de detectar y son muy dependientes de la perspectiva desde la que se analizan. La vista a nivel del suelo permite

observar los obstáculos de cerca, pero solo obtiene información de las inmediaciones del entorno y es incapaz de observar obstáculos ocultos bajo el suelo como zanjas. Los UAV, por otro lado, proporcionan una vista global desde las alturas, pero no identifica los obstáculos ocultos por árboles y su altura de vuelo es un factor determinante en su detección y neutralización por parte de enemigos.

En la literatura hay varias revisiones sobre el análisis de la transitabilidad en entornos fuera de carretera, pero ninguna trata la perspectiva desde la que se obtiene la información y analiza los estudios resaltando si se emplean vehículos aéreos para la adquisición de los datos.

En esta revisión sistemática, se ha estudiado el estado de la cuestión de los métodos de cálculo de la transitabilidad y se ha comparado según la perspectiva, comprobando cómo los métodos geométricos, visuales, propioceptivos, simulados y de cálculo de incertidumbre son más eficaces según el caso y cómo pueden beneficiarse de una colaboración multiplataforma. Además, se resalta la necesidad de estandarizar una métrica para el estudio de la transitabilidad independiente de la optimización de caminos y de la necesidad de construir un *dataset* sobre transitabilidad desde una perspectiva aérea.

Desarrollo de soluciones desplegables en fabricación aditiva para BDR - *battle damage repairs* (DESEi+d, 2025: 245)

Virgilio García (CEO Novaindef), Luis Rovés (director del programa para el Ejército del Aire y del Espacio), Fernando Lasagni (CTO), Ernesto Bonilla (comandante), David Pérez Jara (comandante), Ángel Otalora (capitán), Erik Lee (teniente), Andrés Suarez (teniente), Fran Carretero (técnico de soporte), Giorgio Olivieri (director de aplicaciones) y Javier Sánchez Luna (*project manager*).

La fabricación aditiva ha emergido como una de las tecnologías más disruptivas e influyentes. Su aplicación en el sector de defensa está marcando una revolución en la manera en la que se diseñan, fabrican y mantienen los equipos y sistemas militares. En el caso del sector aeronáutico, esta tecnología puede utilizarse para la producción de componentes complejos y ligeros que mejoran la eficiencia del combustible y el rendimiento de las aeronaves, actividad que se desarrolla en la fase de diseño y desarrollo de producto en nuevos programas. Por otro lado, esta tecnología permite la creación de piezas a demanda, mejorando la capacidad de respuesta ante emergencias y necesidades urgentes. No solo tiene la capacidad de reducir costos y tiempos de fabricación, sino que también permite la personalización de componentes según las necesidades específicas de cada misión, permitiendo incluso mejoras de diseño *ad hoc*. El Ejército del Aire y Espacio español, junto con las empresas Novaindef y Sicnova y

con la tecnología de MELTIO, ha desarrollado una solución desplegable de fabricación denominada como FAMU (*forward advanced manufacturing unit*). Para ello se ha desarrollado un contenedor aerotransportable (certificado), equipado con sistema de fabricación aditiva metal por DED-L (deposición de energía directa por láser), centro de mecanizado de cinco ejes, horno de tratamientos térmicos y otros equipos para el control y aseguramiento de la calidad e inspección. El contenedor desplegado en Alaska durante el ejercicio Artic Defender, enmarcado dentro de la misión Pacific Skies 2024, desarrollado de manera conjunta por el Ejército del Aire y Espacio español y su homónimo francés (Armée de l'Air et de l'Espace) y alemán (Luftwaffe), han permitido la fabricación de un repuesto temporal o BDR (*battle damage repair*) perteneciente a un Eurofighter español. El presente artículo describe tanto las capacidades de la solución desplegable desarrollada como el camino seguido para la fabricación y calificación de componentes y un ejemplo de aplicación.

Desarrollo de cuaderna puente crítica por PBF-L y validación aeronáutica (DESEi+d, 2025: 259)

Luis Roves (director de Programa para el Ejército del Aire y del Espacio), Virgilio García (CEO), Manuel Romera (ingeniero aeronáutico de procesos), Manuel Abellán (Escaneado 3D - Ingeniería inversa), Steven Lombana (técnico fabricación aditiva PBFL), Javier Vidal (técnico fabricación aditiva PBFL), Juan Carlos Cabezuelo (técnico mecanizado y programación), José Sivó (director Cedaec), Fernando Lasagni (CTO), Ernesto Bonilla (comandante), David Perez Jara (comandante), Erik Lee (teniente), Miguel Ampudia (responsable de I+D - dirección de innovación), Gonzalo Estapia (asistencia técnica en Maestranza Aérea de Albacete) y David López Vilela (*engineering support*).

La fabricación aditiva de componentes estructurales de alta criticidad para el sector aeronáutico requiere un enfoque integral basado en garantizar la trazabilidad y la gestión de información de procesos. Este tipo de piezas, sometidas a cargas estructurales y condiciones operativas extremas, demanda un nivel de exigencia máximo en cada fase del ciclo de vida del componente. Este trabajo, presenta el desarrollo de una cuaderna puente del F18 por tecnología PBF-L. El proceso comienza con el uso de la ingeniería inversa para recuperar la geometría original y comprender su comportamiento funcional. Posteriormente, se realiza una comparativa entre la versión original inicial y la versión mejorada de esta, así como el posicionado

orientado a la fabricación aditiva, optimizando tanto la geometría como la orientación del componente en la fase de impresión. Para este desarrollo se selecciona una aleación de aluminio AlSi10Mg. Una vez fabricado el componente, este es tratado térmicamente en la condición T6, y además se realiza una batería extensa de ensayos destructivos a nivel de probetas y de no destructivos, a nivel de componente. Este desarrollo se realiza según los estándares desarrollados por el Ejército del Aire y del Espacio español, y con conformidad a los requisitos planteados por otros estándares de la ESA (European Space Agency) y NASA (National Aeronautics y Space Administration), asegurando aspectos tales como la trazabilidad de los componentes y de materia prima, además de los protocolos de monitorización de procesos establecidos para el desarrollo de la cuaderna.

ÁREA 4
Bases e instalaciones

Diseño de estrategias defensivas en enjambres cooperativos para interceptar USV atacantes tecnológicamente superiores (DESEi+d, 2025: 20)

José Antonio González Prieto (profesor contratado doctor en Centro Universitario de la Defensa, ENM), Ana Ogando Martínez (profesor ayudante doctor en Centro Universitario de la Defensa, ENM) y Manuel Ángel Varela García (alumno 5.º curso ENM).

En el contexto geopolítico actual, el uso de enjambres de vehículos de superficie no tripulados (USV) en entornos marítimos se ha convertido en una herramienta clave para la defensa de unidades propias y aliadas. Estos sistemas permiten contrarrestar amenazas asimétricas en las que es frecuente que fuerzas con capacidades más limitadas deban enfrentarse y generar una defensa efectiva respecto a adversarios tecnológicamente superiores. Este trabajo propone el desarrollo de un sistema de enjambre de USV orientado a la defensa, investigando y aplicando algoritmos y técnicas que optimicen su comportamiento cooperativo. El objetivo es que los USV operen de manera autónoma, mejorando su capacidad de respuesta y efectividad en escenarios de interceptación contra amenazas. En particular, se aborda el problema de la interceptación de los USV atacantes, cuyo propósito es alcanzar un punto específico del escenario sin ser detenidos por parte de una serie de enjambres defensivos de USV

de menor capacidad de maniobra. En este trabajo se estudian diferentes estrategias cooperativas basadas en la generación de barreras defensivas y diseñadas para interceptar a los atacantes antes de que alcancen la zona protegida. Para ello, se introduce una jerarquía de tareas que descompone la misión defensiva a dos niveles: a nivel global, se optimiza la asignación de rutas para cada USV, mientras que, a nivel local, se ajustan las trayectorias para evitar tanto las colisiones entre unidades defensivas como con los obstáculos del entorno. Los resultados de múltiples simulaciones permiten estimar el rendimiento defensivo de cada estrategia cooperativa e identificar las más efectivas en distintas condiciones operativas. Este artículo presenta un enfoque innovador para la defensa cooperativa con enjambres de USV, combinando planificación jerárquica y control autónomo. Su aplicación se puede extender tanto al ámbito militar como a la seguridad marítima, ofreciendo estrategias para enfrentar amenazas en escenarios dinámicos y complejos.

Denegación de acceso mediante enjambres de drones (DESEi+d, 2025: 55)

Salvador Zaragoza Noguera (CUD-AGA), María Guinaldo Losada (UNED) y José Sánchez Moreno (UNED).

La protección de infraestructuras críticas, áreas geográficas y activos de gran valor ha evolucionado significativamente con la aparición de nuevas tecnologías. En particular, el uso de drones pequeños (UAS LSS - *unmanned aerial system low, small and slow*) o enjambres de estos para obtener información o atacar objetivos se ha convertido en una amenaza tangible y creciente. Estos drones, debido a su tamaño reducido, pueden evadir fácilmente las defensas tradicionales y representar un riesgo considerable para la seguridad. Para neutralizar esta amenaza, se han desarrollado diversas estrategias que van desde la interferencia de señales de control y sistemas de navegación basados en GNSS, hasta el uso de medios letales como láseres, microondas de alta energía e incluso munición convencional. La efectividad de estas soluciones varía considerablemente según el número, las características y el equipamiento de los UAS hostiles, así como el entorno en el que se despliegan (campo abierto o ambientes urbanos). Este artículo propone una solución C-UAS (*counter-unmanned air systems*) alternativa y complementaria a las existentes: el uso de un enjambre de drones defensores. Estos drones adoptan una formación de escudo semiesférico para negar el acceso a UAS hostiles al objetivo protegido. La clave de esta estrategia radica en el diseño de una ley de

control distribuida que permite a los drones defensores seguir trayectorias, mantener la posición y orientarse en el espacio preservando en todo momento la forma del escudo en función de la ubicación y velocidad del enjambre hostil. Esta ley de control distribuída se ha definido para dinámicas modeladas por un integrador simple y un doble integrador, permitiendo movimientos lineales y angulares acelerados del escudo. Se basa en la triangulación de Delaunay que permite la comunicación y coordinación entre los drones defensores, así como la rigidez de la formación. El enfoque propuesto no solo ofrece una solución innovadora y flexible para la defensa contra drones hostiles, sino que también abre nuevas posibilidades para la protección tanto de infraestructuras críticas como objetivos en movimiento en diversos escenarios. La capacidad de los drones defensores para adaptarse dinámicamente a las amenazas en tiempo real representa un avance significativo en el campo de la seguridad y la defensa. Además, el uso de enjambres de drones defensores puede ser escalable y adaptable a diferentes tamaños de áreas protegidas, desde pequeñas instalaciones hasta grandes regiones geográficas.

Desarrollo de una metodología armonizada para la evaluación de tecnologías de almacenamiento y conversión de energía en infaestructuras críticas (DESEi+d, 2025: 147)

David Muñoz-Torrero (Fundación IMDEA Energía), Jesús Palma (Fundación IMDEA Energía), Enrique García-Quismondo (Fundación IMDEA Energía), Rosa Rengel (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Jesús Rey (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Eduardo López (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) y Francisca Hernández Úriz (ARPA Equipos Móviles de Campaña).

El despliegue de tecnologías de almacenamiento energético en aplicaciones de alta exigencia, como infraestructuras críticas o despliegues militares, requiere herramientas que garanticen la fiabilidad, reproducibilidad y comparabilidad de los datos obtenidos en condiciones operativas relevantes. En este contexto, resulta imprescindible establecer una metodología homogénea para la evaluación y comparación de diferentes tecnologías, orientada a su integración en sistemas energéticos intensivos, como los propios del ámbito de la defensa. Este tipo de metodologías permite definir criterios técnicos, operativos y de confiabilidad estandarizados, que facilitan una comparación objetiva entre diferentes soluciones tecnológicas. Asimismo, favorece la incorporación estratégica de sistemas energéticos resilientes, al tiempo que contribuye a minimizar riesgos operativos y

a cumplir con normativas regulatorias y ambientales cada vez más exigentes. Para abordar esta tarea, este trabajo presenta el desarrollo de una metodología armonizada para la caracterización integral de dispositivos de almacenamiento y conversión energética, aplicable tanto a tecnologías consolidadas como a soluciones emergentes. Entre ellas, se incluyen baterías de iones de litio, pilas de combustible y baterías de iones de sodio. La propuesta abarca todas las etapas necesarias para una evaluación completa de celdas y *packs*: ensayos de capacidad y polarización, pruebas de carga rápida, caracterización mediante pulsos de alta potencia, descarga a potencia constante y protocolos de envejecimiento acelerado. La metodología ha sido validada experimentalmente mediante su aplicación tanto a tecnologías de baterías de iones de litio de alta madurez tecnológica como NMC (níquel-manganeso-cobalto), LFP (fosfato de hierro-litio) y LTO (litio-titanato), así como a tecnologías emergentes como baterías con cátodos mejorados, baterías de iones de sodio y pilas de combustible de tipo PEM, no utilizadas en aplicaciones de defensa hasta la fecha, con el objetivo de evaluar la versatilidad y adaptabilidad del protocolo a distintos principios electroquímicos. Tras validar la metodología, se ha aplicado a las tecnologías empleadas en el proyecto europeo NOMAD (*novel energy storage technologies usable at military deployments in forward operating bases*, EDF-2021-ENERENV-D-2). En este proyecto se plantea el uso de tecnologías de almacenamiento de fabricación europea o con cadenas de suministro estables para su aplicación en infraestructuras críticas o despliegues militares. El trabajo realizado ha permitido obtener resultados para determinar las condiciones de funcionamiento más adecuadas para cada tecnología, así como caracterizar sus prestaciones en términos de energía, potencia y degradación bajo escenarios de operación exigentes. Estos hallazgos respaldan la idoneidad de la metodología desarrollada para su aplicación en entornos críticos y de alta demanda energética.

Diseño y fabricación de una pizarra táctica retroiluminada para lanchas de instrucción (DESEi+d, 2025: 247)

Pedro Fernández de Benito (Escuela Naval Militar), Araceli Regueiro Pereira (Centro Universitario de la Defensa), Carlos Pérez Collazo (Centro Universitario de la Defensa) e Iván Iglesias Sánchez (Centro Universitario de la Defensa).

El adiestramiento práctico a bordo constituye un pilar fundamental de la formación de los futuros oficiales de la Armada. En ese marco, el principal objetivo de este trabajo es abordar el diseño, fabricación e instalación de una pizarra táctica retroiluminada para las lanchas de instrucción A-120, concebida como herramienta de apoyo durante la navegación y los ejercicios tácticos de los alumnos de la Escuela Naval Militar. Se busca, no solo dar servicio a una carencia con la que los usuarios se encuentran en sus salidas al mar, sino también mejorar la calidad de vida de la dotación. La solución desarrollada integra tecnologías de diseño CAD con procesos de fabricación digital, combinando el corte láser de polipropileno multicapa para el marco con la impresión 3D de soportes personalizados en PLA. Para llevar a cabo el diseño de cada uno de los componentes de la pizarra se utiliza el *software* CAD Autodesk Inventor y los soportes personalizados se fabricaron en una impresora Ultimaker 3 Extended. Para pasar los archivos STL que facilita el *software* CAD a Gcode, que es el código que leen las impresoras, se utiliza Ultimaker Cura. El sistema, concebido para

una instalación no invasiva, se adapta a las restricciones estructurales del buque mediante abrazaderas que evitan modificaciones permanentes y hacen fácil su montaje y desmontaje en función de las diferentes situaciones que se puedan dar. La retroiluminación LED, conmutable entre luz blanca y roja, permite su uso en condiciones nocturnas sin comprometer la visión de la dotación. El trabajo se incluye un análisis estructural por simulación, la pizarra se valida funcionalmente mediante pruebas reales a bordo y, además, se evalúan diferentes conceptos mediante una encuesta al personal que hace uso de las lanchas. Más allá del desarrollo técnico, el trabajo busca enriquecer la experiencia formativa de las futuras promociones, empleando recursos propios del Centro Universitario de la Defensa. La pizarra se configura, así como un instrumento didáctico y operativo que refuerza la profesionalización, la autonomía y la cultura de innovación en la formación naval.

ÁREA 5
Plataformas terrestres

ROCÍN: red de capacidades interoperable para sistemas autónomos terrestres (DESEi+d, 2025: 124)

David Robles (General Dynamics European Land ystems), José Eugenio Naranjo (INSIA - Universidad Politécnica de Madrid), Juán Nicolás (General Dynamics European Land Systems), Felipe Jiménez (INSIA - Universidad Politécnica de Madrid) y Alfrerdo Valle (INSIA - Universidad Politécnica de Madrid).

El uso de sistemas autónomos terrestres en misiones de apoyo en áreas de desastre o en misiones militares está cada vez más extendido. Sin embargo, el planeamiento, ejecución, monitorización y control aún requieren de un componente manual importante, lo que afecta a su efectividad. El reto actual, por tanto, consiste en conectar las operaciones llevadas a cabo por estos sistemas autónomos con las operaciones de sistemas tripulados o incluso con las de otros sistemas autónomos de manera ininterrumpida, y optimizar así su coordinación. Igualmente, es importante resaltar que los sistemas autónomos van a requerirse, cada vez más, en entornos altamente cambiantes, por lo que es necesario dotarles de capacidades de percepción y de decisión, aumentando, por tanto, el reto técnico y tecnológico. El proyecto ROCIN se enfoca en este reto y plantea una arquitectura y unos módulos funcionales para Unmanned Ground Vehicles, que pueden ser desarrollados y verificados de manera independiente con dos visiones claras: 1) Mantener una arquitectura abierta que se centre

en funcionalidades generales y abstractas de manera que la aplicabilidad de los módulos desarrollados sea extensa y no tenga dependencias fuertes con las plataformas autónomas ni con los sensores, actuadores y controladores principales y 2) establecer un entorno de desarrollo y experimentación concurrente, incluido HW y SW *in-the-loop*, que agilice una futura validación y certificación de sistemas autónomos basada en casos de usos y operaciones específicas. El proyecto ROCIN, desarrollado conjuntamente entre GDELS y la Universidad Politécnica de Madrid, con apoyo económico del Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI), parte de los desarrollos iniciales llevados a cabo dentro de la plataforma REMOTE-DRIVE, y tiene como objetivo fundamental el desarrollo de sistemas para dar soporte a plataformas autónomas terrestres, ligeras, medias y pesadas, permitiendo la realización de misiones autónomas o teleoperadas, así como su integración en los flujos de información táctica. Tal y como se ha descrito, aunque la arquitectura de ROCIN es abierta, se contempla una serie de casos de uso, que permiten ganar madurez al diseño y acercar el sistema a una futura certificación. Estos, están orientados a operaciones de abastecimiento autónomas y de reconocimiento:

- Seguimiento autónomo de personas y vehículos (capacidad *follow-me*).
- Seguimiento autónomo de rutas preestablecidas incluyendo terrenos no estructurados y situaciones de denegación del servicio GPS.
- Detección de obstáculos y ejecución de estrategias de evasión.
- Integración del UGV en red táctica para su coordinación con otros sistemas, tanto tripulados como autónomos.

ÁREA 6
Plataformas navales

Desarrollo de una embarcación con *hydrofoils* y propulsada con hidrógeno (DESEi+d, 2025, 51)

Juan Antonio Pérez Socorro (Universidad Politécnica de Madrid) y Rodrigo Pérez Fernández (Universidad Politécnica de Madrid).

En el presente artículo técnico se realiza el diseño y construcción de una embarcación para competir en la categoría SeaLab del Monaco Energy Boat Challenge. Esta embarcación es pionera en España al ser la primera en implementar una unidad de potencia 100 % eléctrica, compuesta por una pila de combustible de hidrógeno y una batería, además de un conjunto de *hydrofoils* con flaps controlados por un sistema automático de vuelo. Tiene capacidad para tres tripulantes.

El casco y la estructura han sido desarrollados mediante diseño paramétrico en *grasshopper* y dimensionados para ser construidos en fibra de carbono. Dentro de este laminado, se integrarán sensores de fibra óptica para medir directamente deformaciones y tensiones. La embarcación contará con un sistema de comunicación 5G que permitirá leer y almacenar en tiempo real toda la información recopilada por los sensores. Entre los sistemas más innovadores que implementa, destaca un sistema de predicción de olas mediante sensores ultrasónicos y procesamiento a través de un filtro de Kalman. Se ha creado un VPP (*velocity prediction program*) para simular diversos sistemas a bordo de la embarcación, acelerando el tiempo de diseño y reduciendo los costos asociados.

Esta embarcación y el proyecto Green Foiling Spain sirven como base para el desarrollo de embarcaciones pioneras que permitirán la creación de un concepto de embarcaciones más eficientes y sostenibles, no solo aplicadas al sector del transporte civil. Además, este proyecto abrirá la puerta al desarrollo de drones más rápidos, ágiles y silenciosos, diseñados para apoyar a embarcaciones nodrizas, sirviendo como avanzadilla o cubriendo tareas de alta exigencia. Esto representa un avance significativo en la integración de tecnologías limpias y de alto rendimiento en el ámbito marítimo, impulsando la innovación hacia un futuro más sostenible y tecnológicamente avanzado.

Estudio experimental de la variación de viscosidad efectiva por inyección de burbujas para aplicaciones navales (DESEi+d, 2025: 112)

Pablo López-Gavilán (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas), Miguel Gómez Santa Marta (Universidad Politécnica de Madrid, ETSIDI), Gabriel Stöbel Gallego (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas), Suthyvann Sor (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas) y Adelaida García-Magariño (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas).

Los esfuerzos viscosos constituyen una de las mayores fuentes de consumo energético derivadas de propulsar una plataforma naval civil o militar, por lo que la reducción neta de dichos esfuerzos contribuye directamente a reducir su consumo energético y, por tanto, a aumentar su autonomía. De entre las técnicas para reducir la resistencia viscosa en superficies mojadas una de las más prometedoras es la técnica de reducción de esfuerzos viscosos por inyección de microburbujas (MBDR), que presenta la ventaja de reducir de forma significativa los esfuerzos viscosos (hasta un 80 % en placa plana) con un menor aporte energético, lo que daría como resultado un aumento de la eficiencia neta. Actualmente no existe un marco teórico firme que explique la complejidad de los mecanismos, existiendo mucha controversia en la literatura acerca de sus

fundamentos. Para comprender mejor dichos fundamentos, se pretende estudiar el impacto de dichas microburbujas en el establecimiento de flujos, en concreto su impacto en el transporte de cantidad de movimiento en el interior de la capa límite y el impacto de esta en la viscosidad cinemática. Para ello, se propone un estudio experimental novedoso basado en el problema de Stokes o problema de Rayleigh en el que una placa plana permanece sumergida en reposo en el interior de un tanque de solución acuosa y es sometida a un arranque impulsivo tras el cual se desplaza a velocidad constante y comienza a generar microburbujas. Considerando la solución analítica del caso monofásico, es posible obtener información del impacto en la distribución de burbujas y sus características físicas en el desarrollo y evolución de esta capa de cortadura. Se pretende que los resultados permitan comprender mejor el mecanismo de MBDR a través de un enfoque novedoso como es el arranque impulsivo. Esto contribuiría a mejorar la precisión de los modelos numéricos aplicados, que dependen habitualmente de la calibración de sus parámetros con base en resultados experimentales, y a explorar el impacto de las técnicas de MBDR en el contexto de flujos acelerados. Dicho impacto, que no ha sido previamente abordado, permitiría estudiar posibles aplicaciones en cuerpos sumergidos donde la aceleración pudiera ser relevante, por lo que se pretende que la plataforma experimental desarrollada y los resultados obtenidos en el estudio puedan ser ampliados a cuerpos de formas hidrodinámicas más complejas, como es el caso de armas submarinas, torpedos o vehículos submarinos autónomos.

Estudio experimental de la influencia del gradiente de presión en la técnica de reducción de resistencia por burbujas para propulsores marinos (DESEi+d, 2025: 117)

Suthyvann Mendi (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas), Adelaida García-Magariño (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas), Patricia Díaz-Torrijos (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas), Mar Urdiales (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas) y Pablo Gavilán (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas).

El aumento de la eficiencia de los propulsores en plataformas navales, tanto civiles como militares, supone una reducción en la emisión de contaminantes, adecuándose a la *Hoja de ruta sobre cambio climático y defensa* promovida por el Servicio de Acción Exterior Europeo (EEAS). El estudio de técnicas para reducir la resistencia de las plataformas navales mediante la incorporación de flujos bifásicos en la capa límite de la superficie en contacto con el agua ha logrado resultados importantes en las últimas décadas, llegando a reducciones de hasta el 80 % de la resistencia viscosa. Este tipo de técnica que reduce la resistencia de fricción mediante la inyección de microburbujas en la capa límite, conocida por sus siglas en inglés como MBDR, se aplica generalmente al casco de las plataformas navales, por lo que su aplicación a los sistemas propulsivos

resulta muy novedosa. En trabajos anteriores se estudió esta reducción de resistencia de fricción en las hélices de forma teórica, llegándose a un modelo que determina la reducción en un perfil con base en la cantidad de burbujas introducidas, su distribución, la estructura de la capa límite y el gradiente de presiones. Para poner a punto el modelo permitiendo su uso, es necesario caracterizar de forma experimental algunos coeficientes de dicho modelo y validar las hipótesis consideradas. Para ello, se ha diseñado y construido un pequeño túnel de agua de sección de ensayos 20 mm x 20 mm x 200 mm, donde una de las paredes del túnel tiene la pendiente necesaria para originar un gradiente de presión similar al obtenido en el exterior de una capa límite de un perfil. En este trabajo se presenta el diseño, fabricación y caracterización de dicho túnel, así como los resultados preliminares obtenidos. Se espera que los resultados en dicho túnel permitan en un futuro poner a punto un modelo que pueda ser utilizado para el diseño de esta aplicación a hélices de plataformas navales.

Propuesta de ensayos en canal y medición en el buque para el análisis del movimiento del centro de flotación y su influencia en la seguridad (DESEi+d, 2025: 161)

Ignacio Requena Rodríguez (ADVANTARIA).

El estudio de la estabilidad del buque, mediante el análisis de su altura metacéntrica (función de las posiciones del centro de gravedad y del centro de carena), es un aspecto fundamental del diseño de cualquier embarcación, que resulta bien conocido, habiendo sido reflejado en gran cantidad de documentación técnica y en numerosas directivas internacionales de ensayo, diseño y operaciones navales.

Los desarrollos actuales de *software* permiten la incorporación de herramientas predictivas y de control, tales como sistemas automáticos y autónomos de navegación, gemelo digital, sistemas de simulación de accidentes y emergencias, entrenamiento de tripulaciones, etc.

El desarrollo de estos sistemas incluye la utilización de modelos computacionales con una parametrización específica, a partir de la cual se derivan las ecuaciones del movimiento y del comportamiento del buque frente a distintas condiciones demandantes, como pueden ser fuerzas externas relevantes (p. ej. fuerte oleaje, vientos o corrientes), desplazamientos de cargas, inclinación excesiva, resonancia paramétrica, inundación por una vía de agua, etc. En varios de estos modelos se interpreta el centro de

flotación como el origen de coordenadas donde se cruzan los ejes de las rotaciones de cabeceo o escora generadas.

Un análisis detallado de esta hipótesis refleja discrepancias entre estos modelos y los fundamentos experimentales y teóricos conocidos relativos a la estabilidad metacéntrica, pudiendo tener repercusiones, por tanto, en la seguridad del buque.

En este documento se presenta una propuesta de ensayos y recolección de datos para el análisis detallado del comportamiento del centro de flotación en diferentes condiciones y su tratamiento con modelos de cálculo específicos. Para ello, se propone dos estrategias. Por un lado, ensayos a realizar mediante modelos a escala ya existentes en el Laboratorio de Dinámica Del Buque de un centro de experiencias hidrodinámicas (como el CEHIPAR), induciendo de forma controlada condiciones de balanceo por resonancia. Por otro lado, se propone la recogida de datos experimentales durante una navegación real, mediante el embarque de módulos IMU (que incorporan acelerómetros, giróscopos y magnetómetros), de modo que se puedan extraer, al final de la misma, datos genéricos relativos al movimiento del barco sin interferir con su operación habitual. En este caso, se propone a modo a modo de ejemplo su utilización en el nuevo buque multipropósito A 62 Cartagena de la Armada, que incluye entre sus misiones actividades de carácter experimental.

Se busca, de este modo, realizar un análisis detallado del comportamiento dinámico del centro de flotación que pueda servir de referencia adecuada para la parametrización de modelos computacionales.

Sistemas de propulsión naval eficientes mediante técnicas avanzadas de modelado e inteligencia artificial (DESEi+d, 2025: 63)

José M. Moreu Gamazo (HI-Iberia Ingeniería y Proyectos S. L.), Pol Escola (HI-Iberia), Roberto Gómez-Espinosa Martín (HI-Iberia), Javier López Nuñez (COEX Smart Services, Navantia SA SME), Javier Martínez Escondrillas (COEX Smart Services, Navantia SA SME), Andrés Carrillo Barranco (COEX Smart Services, Navantia SA SME), Miguel Méndez Macías (COEX Smart Services, Navantia SA SME), Guillermo Rodríguez Llorente (HI-Iberia), Rodrigo Morant Navascués (HI-Iberia), Lucas Magariños Rodríguez (HI-Iberia) y Galo Gallardo (HI-Iberia).

En el contexto de las operaciones navales modernas, los buques enfrentan demandas energéticas cada vez mayores debido a sistemas avanzados como armamentos, sensores y propulsión eléctrica. En este contexto, El proyecto SISPROVE dentro del PERTE Naval y compuesto por empresas referentes en su sector: Navantia, Repsol, HI-Iberia, estudia alternativas de sistemas de propulsión y generación mediante técnicas avanzadas de diseño, combustión y operación, garantizando la disponibilidad operativa, eficiencia y sostenibilidad. Dentro del proyecto, se estudia el uso de la inteligencia artificial (IA), con un énfasis especial en *deep reinforcement learning* (DRL), para el control avanzado de la planta eléctrica del buque. Este método se integra con técnicas avanzadas de modelado y simulación, lo cual permite desarrollar un enfoque innovador. Dicho

enfoque no solo optimiza el funcionamiento de la planta durante las misiones operativas, sino que también ofrece ventajas significativas en la fase de diseño del buque. Con esta metodología, es posible validar de manera precisa los dimensionamientos de las plantas eléctricas. Además, se facilita la integración de soluciones adaptativas capaces de responder de forma dinámica a las variaciones en la demanda energética, mejorando así la eficiencia global del sistema. En este trabajo se presenta la plataforma SPECTRUM, centrada en la integración de agentes de control basados en DRL, los cuales permiten la selección y el uso estratégico de distintas fuentes de energía de acuerdo con las necesidades en tiempo real. La plataforma permitirá entrenar estos agentes ante diferentes perfiles operativos del buque y diferentes posibles configuraciones de la planta eléctrica, según una función de recompensa adaptable a los objetivos buscados (maximizar la autonomía, controlar la firma acústica, optimizar el consumo, etc.). Además, con el fin de validar experimentalmente los desarrollos del proyecto, se ha implementado una planta eléctrica prototipo donde se integrarán los agentes, previamente entrenados por los modelos, para ensayos reales. Los resultados obtenidos en ambiente simulado y experimental serán determinantes para demostrar la eficacia de las técnicas DRL, abriendo la puerta a sistemas de energía más inteligentes, resilientes y sostenibles durante toda su vida operativa.

Posicionamiento alternativo al GNSS: determinación de posición y tiempo (DESEi+d, 2025: 57)

Pedro Azorín Montesinos (Universidad de Zaragoza y Armada, Escuela Naval Militar), Daniel Casanova Ortega (Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Academia General Militar, Zaragoza.), Celia Rodríguez Sánchez (Alumna Escuela Naval Militar, Armada), José González Coma (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, Marín) y Pedro Carrasco Pena (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, Marín).

Este trabajo se desarrolla a partir del artículo presentado por Azorín y Casanova en el congreso DESEi+d 2023, en respuesta al creciente interés por métodos alternativos al sistema de posicionamiento global (GNSS, del inglés *global navigation satellite system*). Interés que ha cobrado mayor importancia después de las diferentes situaciones ocurridas durante el conflicto de Ucrania. Esta preocupación creciente se refleja, entre otros ejemplos, en el Proyecto PESCO4E. Este contempla como capacidad esencial de las futuras fragatas europeas el posicionamiento para buques en el mar con sistemas alternativos a GNSS. Asimismo, cabe destacar los estudios en los que colabora el CUD-ENM en el campo de la denegación y la decepción de las señales GNSS. Es importante analizar las limitaciones de las alternativas existentes actualmente, ya que muchas de ellas se basan en la obtención de situaciones sobre estima, lo que supone una

amplificación de errores. Actualmente, los únicos métodos de posicionamientos que proporcionan una posición verdadera e independiente son el GNSS, posicionamiento astronómico y las referencias de costa. En este trabajo se profundiza en la determinación de la vertical para el cálculo de la posición. Se propone una función que relaciona los parámetros de los sensores del buque con los elementos clave para este cálculo, lo que permite identificar las condiciones óptimas de uso, las condiciones de contorno necesarias para la resolución del problema y las posibles restricciones. Entre todas las variables estudiadas, es necesario tener en cuenta el tiempo. El momento de la observación y la posición calculada están íntimamente relacionadas, ya que un error en una variable se puede trasladar a la otra y viceversa. No obstante, esta forma de trabajar necesita aclaraciones, en especial sobre cómo esto puede afectar a la precisión en tiempo y posición. Finalmente, se presenta un análisis del estado de la cuestión y la realidad sobre cámaras que puedan observar de día o en condiciones meteorológicas no favorables (cielos cubiertos). Este punto puede suponer la disminución de un factor negativo del posicionamiento mediante astros, ya que se aumentaría la disponibilidad de uso al mitigar los efectos atmosféricos. Como línea futura, se propone continuar con estudios teóricos y experimentales mediante la toma de imágenes a bordo de buques y el análisis de los datos de movimiento registrados, con el fin de validar las hipótesis planteadas.

Sistema SENDA de navegación para buques de la Armada (DESEi+d, 2025: 210)

Carlos Quesada Moldón (GMV), Teresa Jiménez Vaquero (GMV) y Daniel Montero Yéboles (GMV).

GMV, en colaboración con el Ministerio de Defensa, está desarrollando el sistema de navegación SENDA para las fragatas F-110 y para el buque BAM-IS. El objetivo principal es ofrecer una solución de navegación nacional que se adapte a los requisitos de la Armada española. SENDA incorpora tecnología GNSS multiconstelación (GPS, Galileo y GLONASS) y multifrecuencia, integra servicios SBAS (Satellite Based Augmentation System) y algoritmos de monitorización de integridad, lo que permite ofrecer capacidades avanzadas de posicionamiento, navegación y sincronización temporal (PNT - *position navigation and timing*) íntegra y precisa. SENDA incorpora sensores de alta tecnología, como son los receptores GPS SAASM (evolucionable a código M) y PRS Galileo, y una algoritmia que explota toda la información que proporcionan dichos sensores, adaptándose a escenarios complejos como puede ser situaciones de suplantación de señales *spoofing*. Adicionalmente, el sistema se integra con antenas CRPA (*controlled reception pattern antenna*) proporcionando capacidad de detección y resiliencia frente a interferencias de tipo *jamming* en las señales GNSS. SENDA implementa una algoritmia de hibridación *tighly coupled* combinando datos crudos del sistema de navegación inercial del buque con datos GNSS, mejorando tanto la resiliencia

del sistema frente *spoofing* y *jamming* como la precisión de la solución de navegación que ofrece. Asimismo, permite la hibridación con los datos disponibles de cualquier otro sensor disponible (eLoran, correderas…), aumentando la independencia de la solución frente a una navegación solo GNSS. El uso de un sistema de tiempos basado en oscilador de rubidio permite a SENDA ser una fuente de tiempo precisa y fiable incluso en condiciones prolongadas de operación en áreas con señal denegada de GNSS. La configuración de SENDA para F-110 es altamente redundante, con dos subsistemas completos (ubicados en popa y proa), cada uno dotado de diversos receptores GNSS y una unidad inercial, y con intercambio de datos en tiempo real, lo que, mediante el manejo avanzado de esta alta redundancia, garantiza la monitorización en tiempo real del sistema, la supervivencia del mismo en caso de fallo de algún componente y la determinación de la unidad inercial más precisa. El sistema SENDA está culminando el proceso de certificación IMO-SOLAS, incluyendo la complejidad de cumplir adicionalmente con las normas MIL-STD. GMV tiene previsto realizar en 2025 las Pruebas de aceptación en fábrica de los sistemas de la fragata F-111 y BAM-IS este año, tras las cuales serán entregados a Navantia para su integración a bordo.

ÁREA 7
Plataformas aéreas

Estudio de perfiles no convencionales para RPAS de uso civil-militar (DESEi+d, 2025: 70)

Juan Carlos Matías García (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Estela Barroso (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Jaime Fernández (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) y Rafa Bardera (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA).

Los sistemas de aeronaves pilotadas de forma remota (RPAS, *remotely piloted aircraft system*) representan una tecnología con un gran potencial debido a su capacidad de operar en diversos ámbitos. Su uso es especialmente relevante en escenarios de defensa y seguridad, ya que permiten llevar a cabo misiones sin poner en riesgo la vida del piloto. Estos vehículos son capaces de operar en entornos de difícil acceso o en zonas peligrosas, como áreas contaminadas por sustancias tóxicas, donde las operaciones tripuladas resultarían inviables o altamente arriesgadas. Además de su aplicación en el ámbito militar, los RPAS desempeñan un papel fundamental en el ámbito civil, en misiones de vigilancia fronteriza o lucha contra incendios forestales, entre otras. Durante la última década, se han desarrollado múltiples prototipos de RPAS de uso dual, algunos de los cuales, incorporan geometrías inspiradas en las aves. Estas configuraciones no convencionales buscan beneficiarse de las ventajas aerodinámicas y de estabilidad que caracterizan a estos animales, con el objetivo de realizar misiones de forma más eficiente en entornos militares y de seguridad. En esta línea, el presente trabajo trata de analizar

experimentalmente distintos perfiles aerodinámicos no convencionales para su implementación en RPAS de pequeño tamaño. Estos perfiles, que hasta ahora no han sido empleados en la aviación comercial, presentan características aerodinámicas de interés que, según estudios previos, podrían mejorar parámetros clave como la eficiencia aerodinámica del vehículo. El objetivo principal se centra en evaluar el comportamiento de estos perfiles bajo condiciones de bajo número de Reynolds, propias de RPAS de pequeñas dimensiones. Para ello, los perfiles se han fabricado mediante impresión 3D, utilizando ácido poliláctico (PLA), material que combina alta durabilidad y bajo coste, resultando ideal para su empleo en ensayos en túnel de viento. Se han medido fuerzas aerodinámicas (sustentación y resistencia aerodinámica) empleando una balanza externa de dos componentes, y se han obtenido los contornos de velocidad mediante velocimetría por imágenes de partículas (PIV).

Desarrollo de composites de matriz cerámica CMC (DESEi+d, 2025: 16)

María Jesús Pérez-Martín (ITP Aero) y Iñaki Madariaga (ITP Aero).

Los compuestos de matriz cerámica, CMCs, del tipo SiC-SiC, están formados por un entramado de fibras continuas de SiC embebidas en una matriz de este material también. A diferencia de la fragilidad observada en las cerámicas monolíticas, los CMCs son capaces de mostrar una leve ductilidad gracias a la introducción de una fina capa de intercara entre las fibras de SiC y la matriz. En presencia de carga, en estas intercaras se produce un fenómeno de deslizamiento entre fibra y matriz previo a la rotura de las fibras, con lo que se consigue un aumento de la energía necesaria para poder romper el CMC, aumentando su resistencia. Existen diversos métodos para la infiltración de la matriz, pero en las actividades descritas en este estudio, este proceso se ha realizado mediante un método de infiltración química en fase vapor (CVI). Mediante esta técnica se consigue la deposición de una matriz de SiC estequiométrico en torno a la superficie de las fibras. Los parámetros de deposición del SiC y el sistema de apilado de las capas de tejido de fibras, son claves para conseguir un CMC denso con una microestructura y comportamiento mecánico adecuados. En este estudio se recoge el resultado de las diferentes pruebas de fabricación realizadas con el propósito de lograr un CMC con un alto contenido de fibras y una porosidad reducida. Se han evaluado diferentes métodos de generación de geometrías 3D a partir de tejidos planos de fibras de SiC de segunda

generación, con textura del tipo 5HS. Las primeras pruebas se realizaron con geometrías sencillas tipo placa, para pasar posteriormente a geometrías de prototipos de vanos de turbina y pétalos de tobera. Las diferentes iteraciones de proceso realizadas se han evaluado microestructuralmente y en muestras seleccionadas se han realizado ensayos mecánicos. Los resultados obtenidos muestran una clara mejora de proceso tanto desde el punto de vista de la microestructura como de la resistencia del material.

Batería modular redundante y convertidores de potencia para propulsión en plataformas aéreas de alta fiabilidad (DESEi+d, 2025: 86)

Antonio Mollfulleda (IDNEO), Javier Ballestín (Fundación CIRCE), Delmir Ulldemolins (IDNEO), Enric Comas (IDNEO) y Antonio-Miguel Muñoz (Fundación CIRCE).

La fiabilidad en los sistemas de gestión de energía es un aspecto crucial para aeronaves de propulsión eléctrica con baterías de alta tensión, ya sea para vehículos de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR-eDron); para misiones tácticas (eTUAV), o para vehículos de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL). Un fallo aislado de una celda provocado por el estrés de las condiciones operativas puede comprometer la integridad de la aeronave y de su entorno. Las soluciones actuales contemplan la redundancia del sistema de almacenamiento como mecanismo de mitigación del riesgo.

El presente trabajo se centra en un sistema de batería configurable por *software* en tiempo real con el objetivo de utilizar los módulos redundantes, no solo como elementos alternativos en caso de fallo, sino para mejorar la eficiencia y reducir la probabilidad de fallo en función de la demanda de energía en cada etapa de vuelo. El sistema de batería propuesto incorpora múltiples ramales de módulos conectados al bus de potencia a través de su propio convertidor DC/DC. Cada ramal está compuesto por una serie de módulos conectados en serie. Los módulos redundantes están integrados tanto a nivel de módulo dentro de un ramal

como en el número de ramales en paralelo. Dada la capacidad de regular individualmente la potencia entregada por cada módulo, se puede realizar un control preciso de la temperatura de operación. El artículo presenta un análisis térmico que muestra una mejora de eficiencia, así como un análisis probabilístico de inferencia bayesiana para modelar de la probabilidad de fallo del sistema.

Adicionalmente, uno de los retos clave en el sector aeronáutico es la reducción del peso del sistema. En este trabajo se propone el uso de GaN y la sustitución de los núcleos magnéticos tradicionales, basados en materiales ferromagnéticos, por componentes basados en aire, aumentando la densidad gravimétrica del sistema. Esta estrategia, junto con el diseño eficiente del convertidor, con una eficiencia esperada superior al 98%, permite una regulación eficaz de la potencia entre diferentes ramales.

Como resultado, se estima una disminución de las pérdidas energéticas del sistema completo en un 10% aproximadamente, lo cual se puede traducir tanto en un incremento de autonomía como en una disminución de la probabilidad de fallo.

Sistema de almacenamiento de energía formado por baterías estructurales para la mejora de la eficiencia y alcance de vehículos aéreos no tripulados de aplicación militar (DESEi+d, 2025: 157)

Javier de Prado (Universidad Rey Juan Carlos, URJC), Eduardo Manuel López (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Laura Vargas (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), José Antonio Ceballos (SCR Sistemas de Control Remoto S. L.), Marcos Estévez (SCR Sistemas de Control Remoto S. L.) y Alejandro Ureña (Universidad Rey Juan Carlos, URJC).

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV según sus siglas en inglés) o drones han despertado gran interés gracias a los avances en tecnologías de detección, microprocesadores y procesamiento de datos. Los UAV eléctricos, alimentados por baterías, son preferidos para misiones de corto alcance por su eficiencia, fiabilidad, bajo coste, bajas firmas acústicas y térmicas, y facilidad de adaptación al control automático. Sin embargo, las baterías limitan el tiempo de vuelo debido a la energía almacenada. Aumentar el número de baterías no es práctico por el incremento de peso y restricciones de espacio. Una batería estructural (BE) es un sistema multifuncional que almacena energía eléctrica y soporta solicitaciones mecánicas simultáneamente. Sus propiedades mecánicas y de almacenamiento

de energía combinadas reducen la necesidad de baterías y materiales convencionales, disminuyendo la masa o el volumen total del sistema. Las baterías estructurales combinan capacidades de almacenamiento de energía, como las baterías de iones de litio, con las propiedades mecánicas de materiales compuestos, como los polímeros reforzados con fibra de carbono. El proyecto AMEBAE, llevado a cabo por la Universidad Rey Juan Carlos (URJC), Instituto Nacional de Técnicas Aeroespaciales (INTA) y Sistemas de Control Remoto S. L. (SCR), busca desarrollar e introducir una batería estructural multifuncional en distintas partes de un vehículo eléctrico (exterior, interior, estructura), utilizando desarrollos propios de SCR como el modelo TUCAN. Esto resolvería el problema de la baja energía específica de las baterías y potencialmente reduciría la masa del vehículo y aumentaría su autonomía. El proyecto pretende transformar todos los elementos de un material compuesto de fibra de carbono (fibra, matriz, intercara) en componentes de la batería eléctrica (ánodo, cátodo, separadores). Se realizarán modificaciones en las fibras de carbono mediante recubrimientos activos para que, manteniendo su funcionalidad mecánica, puedan actuar como electrodos y colectores de corriente. También se evaluará la transformación de la matriz del material compuesto en un electrolito polimérico sólido mediante mezclas de resinas con sales de litio y nanopartículas cerámicas. El desarrollo de un material compuesto con eficiencia multifuncional en soportar cargas mecánicas y almacenar energía permitirá fabricar un prototipo de batería estructural que será ensayado y validado mecánica y electroquímicamente en condiciones reales de vuelo.

Diseño y fabricación de un motor a reacción tipo pulsorreactor (DESEi+d, 2025: 255)

Francisco Jiménez Durán (Escuela Politécnica Superior del Ejército), Juan Bautista Ruiz-Yherla García (Escuela Politécnica Superior del Ejercito) y Martín Díaz Cuesta (Escuela Politécnica Superior del Ejercito).

El proyecto se centra en el diseño, simulación y fabricación de un pulsoreactor tipo Termojet, abarcando dos configuraciones: una con válvulas reed y otra sin válvulas (*valveless*). El enfoque es integral, incluyendo estudio teórico, simulaciones numéricas en Ansys Fluent y la posterior fabricación física del prototipo con fibra de carbono como material estructural principal.

En la versión con válvulas, el motor se basa en la combustión intermitente controlada por válvulas de Reed que permiten el ingreso de aire fresco durante la fase de depresión y se cierran por sobrepresión tras la ignición, generando así un flujo oscilante. Se ha analizado el fenómeno de resonancia acústica del tubo de escape, ajustando su longitud para maximizar el empuje generado en cada ciclo. Las simulaciones contemplan modelos CFD que incorporan cinética de combustión, turbulencia y dinámica de válvulas, observando variables clave como presiones, temperaturas, velocidades y oscilaciones en el sistema.

En paralelo, se estudia el diseño de un pulsoreactor sin válvulas, donde la geometría del motor cumple la función de regular los ciclos de admisión y expulsión de gases. En este caso, el sistema se basa en un diseño

asimétrico entre la entrada y la salida: una entrada corta con menor sección que permite la admisión durante la fase de depresión, y un escape largo que actúa como tubo de resonancia, favoreciendo la salida de gases calientes. Este tipo de motor presenta ventajas como mayor robustez, menor mantenimiento y ausencia de partes móviles, aunque requiere una sintonización precisa para que el ciclo funcione de forma autooscilante y sostenida.

En ambos casos, la simulación mediante Ansys Fluent juega un papel esencial para validar el comportamiento pulsante, con especial énfasis en los fenómenos no lineales y transitorios. Se han planteado modelos simplificados para etapas iniciales y modelos completos con malla dinámica y combustión transitoria para fases avanzadas.

En cuanto a la fabricación, se utilizará fibra de carbono para la carcasa externa por su ligereza y resistencia, con revestimientos internos térmicos en zonas críticas. Se prevé construir ambos prototipos y comparar su rendimiento en pruebas reales, incluyendo parámetros como frecuencia de oscilación, empuje neto, estabilidad de combustión y eficiencia térmica. El objetivo final es avanzar hacia soluciones de propulsión sencillas, ligeras y eficientes, aplicables a drones, pequeños cohetes o sistemas experimentales.

Vuelo en formación de UAVs: estrategias, desafíos y aplicaciones para operaciones en entornos complejos (DESEi+d, 2025: 50)

Ignacio José Calomarde Heras (UAV Navigation - Grupo Oesía S. L.), Francisco Milán Cabrera (UAV Navigation - Grupo Oesía S. L.), Alberto Villarrubia de Juan (UAV Navigation - Grupo Oesía S. L.) y Miguel Ángel de Frutos Carro (UAV Navigation - Grupo Oesía S. L.).

El vuelo en formación de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) representa un avance significativo en el ámbito de las operaciones autónomas en defensa y seguridad. Esta funcionalidad, que se implementa en sistemas de control de vuelo español como el VECTOR FCS de UAV Navigation Grupo OESIA, permite a un conjunto de aeronaves mantener posiciones relativas precisas durante el vuelo, operando bajo la lógica de un líder y uno o varios *wingman*. El líder transmite su información de navegación en tiempo real, permitiendo a los *wingman* ajustar su posición y velocidad para mantener la formación. La capacidad de operar en formaciones predefinidas, como Wedge o Fighting Wing, aporta ventajas tácticas evidentes en misiones de reconocimiento, escolta o penetración en espacio aéreo hostil. Además, la posibilidad de definir zonas de seguridad en torno a la posición del líder garantiza la integridad de la formación y permite la ejecución de maniobras seguras ante escenarios dinámicos o amenazas imprevistas. El sistema permite también cambios dinámicos en la formación durante el vuelo, así como abortar la maniobra de forma

segura y autónoma si se detecta la pérdida de condiciones de seguridad. La implementación de vuelo en formación plantea retos tecnológicos y operativos relevantes. La necesidad de sincronización precisa de velocidades y trayectorias, la gestión de las comunicaciones y la detección de fallos en tiempo real son aspectos críticos que requieren de sistemas robustos y algoritmos avanzados de control y navegación. El presente trabajo abordará los principios de diseño y operación de la funcionalidad de vuelo en formación para UAVs, sus aplicaciones en misiones de defensa y seguridad, y los principales desafíos tecnológicos asociados. Asimismo, se propondrán líneas de investigación futura para la mejora de esta capacidad, incluyendo la integración con sensores avanzados para la navegación relativa, la operación en entornos GNSS-denegados y su aplicación en escenarios de enjambre.

VLA: kit de navegación visual (DESEi+d, 2025: 258)

Jorge Seoane (ITG Technology Center), Analía López Fidalgo (ITG Technology Center) y Daniel Gutiérrez (ITG Technology Center).

VLA es el kit de navegación visual desarrollado por ITG para guiar a los RPAS de tipo VTOL en las maniobras de despegue y aterrizaje de precisión. VLA se ha diseñado para maximizar la eficacia operativa al permitir que los drones regresen automáticamente a su estación base siendo asistidos de forma precisa en la maniobra de aterrizaje incluso en entornos sin señal GNSS. Esto no solo reduce la necesidad de intervención humana, sino que también disminuye significativamente los costos operativos y los tiempos de respuesta. VLA está basado en algoritmos propios de visión artificial que se han validado en múltiples escenarios reales donde han mostrado robustez en diferentes condicionales atmosféricas y de iluminación proporcionando a los RPAS capacidades necesarias para su despliegue remoto sin necesidad de piloto en la zona de aterrizaje.

El sistema de aterrizaje forma parte del concepto *drone-in-a-box*, una solución integral que incluye despliegue automático, recuperación y recarga de drones. Esta tecnología permite optimizar las operaciones sin interrupciones, asegurando que los UAVs estén siempre listos para la próxima misión.

Beneficios clave:

- Basado en visión artificial: aterrizajes seguros sin necesidad de señal GNSS.
- Precisión: aterrizajes seguros y exactos en cualquier entorno.
- Reducción de costos: menor dependencia del personal operativo.
- Eficiencia operativa: mayor rapidez en el ciclo completo de vuelo.
- Fiabilidad: operaciones continuas sin margen para errores.

Indicador de complejidad *complex* para operaciones RPAS aplicadas en misiones de emergencia (DESEi+d, 2025: 4)

Francisco Pérez Moreno (Universidad Politécnica de Madrid), Uxía Casal Andrade (Universidad Politécnica de Madrid), Raquel Delgado-Aguilera Jurado (Universidad Politécnica de Madrid), César Gómez Arnaldo (Universidad Politécnica de Madrid) y Jaime Torrecilla Puebla (ISDEFE).

Los drones han emergido como una tecnología disruptiva, con aplicaciones que abarcan desde la logística y la agricultura hasta la seguridad y la gestión de emergencias. Las operaciones con drones están aumentando constantemente. ENAIRE asegura un aumento del 370 % de las operaciones con drones en 2021 respecto al año anterior. Además, se prevé que estas operaciones sigan aumentando en el futuro. En este entorno, donde la tecnología de drones supone un gran avance en el transporte aéreo, su utilización en un ámbito de defensa y emergencias puede suponer un gran beneficio.

Concretamente, la Unidad Militar de Emergencias (UME) podría beneficiarse en gran medida de las operaciones con drones, pudiendo realizar misiones con objetivos variados, incrementando la seguridad de su personal y sin ver comprometido el éxito de la misión.

Para ayudar al avance de las operaciones con drones, especialmente en el ámbito militar, donde la urgencia es un factor fundamental, la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), como parte de la Red Horizontes, está

tratando de desarrollar el indicador COMPLEX. Este es un indicador de complejidad de operaciones de drones que permitirá medir la dificultad que una ruta pueda tener en función de diferentes parámetros relacionados con el entorno, el vehículo y la propia operación.

COMPLEX tiene el objetivo de poder explorar, en función del objetivo de la misión, una ruta óptima considerando otras necesidades. Para ello, desde la UPM e ISDEFE se está planteando el desarrollo de un indicador de complejidad dinámico que pueda ser utilizado en diferentes horizontes temporales y que permita la selección de rutas para analizar la cuál es la óptima, considerando aspectos como la meteorología o el objetivo de la misión, los cuales, en el ámbito de misiones militares, serán de especial interés.

El indicador COMPLEX puede permitir, en un horizonte estratégico, táctico o inmediato, la planificación de misiones. Esto podría ayudar a organismos como la UME, permitiendo planificar su misión en un horizonte temporal adaptable a la emergencia de la situación. Con las consideraciones necesarias, la UME podría aplicar el indicador COMPLEX durante la planificación de la misión para conocer la ruta óptima y así tratar de aumentar las probabilidades de éxito de la misión antes de realizarla.

Transición de vuelo vertical a vuelo para avance convencional en un RPAS de alas basculantes (DESEi+d, 2025: 74)

Loreto Vázquez de Rey Perdomo (AERTEC), Sergio Vigorra Treviño (AERTEC) y Rafael E. Márquez Jiménez (AERTEC).

El artículo presenta de forma sintética el trabajo realizado en el estudio, modelización y simulación de las maniobras de transición de una aeronave de ala fija y capacidad de despegue y aterrizaje vertical (VTOL) con tipología de alas basculantes o *tilt-wing*. Estas maniobras, que permiten el paso de una configuración de vuelo vertical a otra para vuelo de avance convencional, suponen uno de los mayores desafíos a la hora de diseñar este tipo de plataformas, tanto por la complejidad aerodinámica como por la coordinación que se requiere entre los sistemas de control y propulsión.

A lo largo del desarrollo, se ha trabajado en la creación de un modelo que se ajusta al comportamiento real del sistema, integrando los efectos aerodinámicos, propulsivos e inerciales, así como las interacciones entre ellos. Mediante herramientas de simulación adaptadas desarrolladas en el entorno de Matlab&Simulink, se han estudiado en detalle los aspectos clave que afectan a la maniobra de transición, como lo son la distribución del empuje, los regímenes de vuelo intermedios o el comportamiento dinámico de la aeronave durante el cambio de configuración. Más allá de entender mejor esta fase crítica, el estudio también ha servido para

diseñar las particularidades de la propia maniobra de transición, desarrollar las leyes de control y algoritmos que la implementan y proponer posibles mejoras en el diseño del vehículo en etapas tempranas.

La configuración de alas basculantes añade una serie específica de retos adicionales a los ya existentes en el guiado, navegación y control de un sistema no tripulado de ala fija. Esto ocurre porque aumenta la complejidad del diseño al incluir los elementos necesarios para pivotar las alas, se aumenta peso inducido por los componentes adicionales necesarios para el mecanismo de inclinación y se incluyen requisitos extra de mantenimiento. Todos estos aspectos se describen también en el desarrollo del artículo.

Los resultados obtenidos del estudio de estas maniobras han sido parte de las investigaciones realizadas por AERTEC para el desarrollo de su nuevo modelo TARSIS HVTOL de propulsión híbrida iniciado en verano de 2023. Está previsto que el nuevo TARSIS HVTOL realice sus primeros vuelos en el segundo semestre de 2026.

Sistema de guiado autónomo para paracaídas mediante IA en operaciones de despliegue aéreo táctico (DESEi+d, 2025: 192)

Carlos García Flórez (Universidad de Leon), Diego Domínguez (Universidad de Leon), Adrián García Gutiérrez (Universidad de Leon), Deibi López (Universidad de Leon) y Alejandro de la Cruz Garijo (Invicsa Airtech).

Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de guiado autónomo para paracaídas basado en inteligencia artificial, con especial aplicabilidad en operaciones militares. El sistema ha sido diseñado para mejorar la precisión del despliegue de cargas desde aeronaves tácticas, asegurando entregas más precisas y eficientes incluso en entornos complejos y variables, como zonas de conflicto o áreas de difícil acceso. El proyecto toma como base un modelo de simulación dinámica en Simulink que representa el comportamiento de un paracaídas durante el descenso. Tras comprobar la precisión del modelo con simulaciones con control mediante PIDs, se adaptó dicho modelo para entrenar un modelo de inteligencia artificial no supervisada basándonos en la técnica del entrenamiento por refuerzo mediante la cual, la IA entrena en este simulador y es recompensada o penalizada según unas directrices preestablecidas. El modelo es capaz de ejecutarse en tiempo real en el sistema embarcado en la carga, de forma que se adapta a las diferentes situaciones de vuelo para guiar la carga hasta

un punto de aterrizaje predeterminado. El entrenamiento del modelo se realizó teniendo en cuenta la gran variedad de situaciones de vuelo, considerando factores como altitud de lanzamiento, condiciones de viento, peso de la carga y posibles desviaciones en los frenos. El modelo de entrenamiento por refuerzo fue optimizado con técnicas como la implementación de PPO, ajuste de hiperparámetros, uso de normalización y ajuste de la recompensa. Los resultados obtenidos demuestran un alto grado de precisión en la predicción de las acciones de control necesarias, con bajos márgenes de error respecto a las trayectorias ideales. Este sistema representa un avance significativo respecto a los métodos tradicionales, como los controladores PID, ofreciendo mayor adaptabilidad, fiabilidad y autonomía. La tecnología propuesta puede ser integrada en misiones de defensa para el despliegue preciso de suministros, sensores, equipos de comunicaciones o incluso vehículos no tripulados. Además, permite minimizar el riesgo para el personal operativo y aumentar la eficacia logística en operaciones especiales, humanitarias o de combate. Este proyecto sienta las bases para el desarrollo de sistemas inteligentes de guiado aplicados a plataformas aéreas de defensa, con potencial para transformar las capacidades de despliegue táctico en el ámbito militar moderno.

Daliah UTM: plataforma UTM (*unmanned traffic management*) (DESEi+d, 2025: 261)

Jorge Seoane (ITG Technology Center), Analía López Fidalgo (ITG Technology Center) y Daniel Gutiérrez (ITG Technology Center).

Daliah UTM, la plataforma UTM (*unmanned traffic management*) desarrollada por ITG, es una de las más avanzadas de Europa y está diseñada para gestionar de manera segura y eficiente el tráfico aéreo no tripulado en espacios compartidos por múltiples drones. Esta herramienta ha sido probada con éxito en campañas nacionales e internacionales, consolidándose como una solución pionera en su campo. Daliah ofrece servicios esenciales y opcionales dentro del marco U-Space (denominación del UTM en el marco europeo), como información de tráfico, identificación en red, geoconsciencia, autorización de planes de vuelo, información meteorológica y monitoreo de conformidad. Además, incluye funcionalidades avanzadas como la resolución de conflictos en fase táctica y simulaciones de vuelo. Estas capacidades permiten a los operadores realizar operaciones complejas mientras cumplen con los estándares regulatorios. La plataforma ha sido utilizada en proyectos innovadores como los proyectos europeos AMU-LED y U-elcome o la integración del tráfico aéreo no tripulado durante el primer vuelo de un aerotaxi en Costa Rica, gestionado por Bluenest. Este despliegue demostró la capacidad de Daliah para monitorizar operaciones en tiempo real y garantizar la interoperabilidad entre diferentes proveedores de servicios U-*space*. Asimismo, Daliah

ha sido clave en pruebas logísticas cerca de hospitales y aeropuertos en Madrid, mostrando datos críticos como posición y rumbo mediante sistemas remotos certificados. Daliah representa un avance significativo en la democratización del *U-space*, facilitando el acceso a servicios de movilidad aérea urbana para industrias y ciudadanos. Su enfoque automatizado reduce riesgos operativos y costos asociados con métodos tradicionales. Además, su interfaz intuitiva permite a los usuarios gestionar datos complejos de manera sencilla y eficiente. El ITG continúa trabajando para certificar tecnologías asociadas a Daliah y expandir su uso a nivel nacional e internacional.

iTRIAXEM: triaje de heridos autónomo basado en robots e IA (DESEi+d, 2025: 264)

Jorge Seoane (ITG Technology Center), Marco A. González Fernández (ITG Technology Center) y Analía López Fidalgo (ITG Technology Center).

iTRIAXEMS es una solución global para triaje autónomo que pretende simplificar la gestión sanitaria de los heridos en un conflicto bélico. Con este fin, se incorporarán a la solución elementos como los siguientes:

- Plataforma en la nube: que nos permite aprovechar todo el potencial que ofrece esta tecnología, garantizando la sostenibilidad y escalabilidad del proyecto desde un punto de vista tecnológico y simplificando la arquitectura de implementación, basada en una instancia única capaz de dar soporte simultáneamente a las diferentes zonas.
- Dispositivo de etiquetado de triaje: en el contexto de combate, ser capaz de llevar los signos vitales y los datos de monitoreo en tiempo real a un sistema central y realizar el triaje de forma visual y digital, gracias a las comunicaciones inalámbricas, mejorará la calidad de la gestión y atención de las víctimas.
- Visión artificial: se propone un sistema para identificar individuos y realizar una clasificación inicial de sus lesiones externas visibles en las partes del cuerpo a partir de las primeras inspecciones realizadas por el UAV en el lugar del desastre, para obtener una etiqueta de triaje preliminar.

– NLP (procesamiento de lenguaje natural): este sistema incorporará un asistente virtual inteligente (IVA) para capturar automáticamente más información sobre la condición clínica del paciente a partir del diagnóstico realizado por los primeros intervinientes, mediante su voz y con mínima interferencia en el trabajo del técnico.
– Sistemas aéreos y terrestres no tripulados: para optimizar las operaciones en términos de coste y tiempo, y aumentar la cantidad y calidad de la información utilizada para la coordinación y toma de decisiones.
– Transporte con UAV: transporte de medicinas y dispositivos médicos con drones para soporte sanitario.

ÁREA 8
Sistemas espaciales

EDF-REACTS: o cómo poner en servicio en 72 horas una capacidad espacial (DESEi+d, 2025: 49)

David Marote Álvarez (Airbus Defence and Space SAU).

El proyecto EDF-REACTS (Responsive Space System) tiene como propósito definir la ruta para alcanzar capacidades de defensa disruptivas y colaborativas para la Unión Europea y Noruega mediante el desarrollo de una red resiliente y escalable de sistemas espaciales reactivos. El objetivo es poner en órbita en 72 horas un activo espacial, ya sea por un reemplazo de uno ya existente o para aumentar las capacidades de los Estados miembros. Las iniciativas ya existentes que se pueden tomar como modelo son Victus Nox y Victus Haze, desarrolladas por SDA en EE. UU. España, a través de Airbus Defence and Space, coordina la participación nacional en este estudio, involucrando a INTA y PLD. El punto de partida son los siguientes requisitos de alto nivel definidos por la Unión Europea y los Ministerios de Defensa de trece países:

– El tiempo transcurrido entre la solicitud de lanzamiento y su posicionamiento en órbita debe ser inferior a 72 horas.
– Capacidad para colocar un satélite de hasta 250 kg, en una órbita V-LEO, LEO, desde órbitas ecuatoriales a polares-heliosíncronas.

La participación española cubre los tres segmentos: lanzador, espacio y segmento terreno. En el segmento lanzamiento, la participación

española se centra en estudiar cómo mejorar la versatilidad y tiempo de respuesta de lanzamiento gracias al uso de los aviones europeos A400M y A330MRTT como portadores del lanzador y su entrega aérea. El lanzador adecuado para ambos aviones tiene una longitud de unos 14 m, diámetro de 1,2 m, y consta de dos etapas de combustible sólido y una potencial tercera híbrida, todo ello en 16 Tm. En el segmento espacio, el foco está puesto en estudiar diferentes tipos de misiones tales como SAR, SIGINT, Telecomunicaciones, Servicios en órbita, SSA, y cómo el uso de OTVs (vehículos de transferencia orbital) permiten una puesta en órbita más rápida y precisa de uno o varios satélites. Desde el punto de vista de España, los tipos de satélites del estudio son los basados en la plataforma ARROW-150, con una capacidad de unos 250 kg. El estudio se está enfocando en una aproximación que cumpla con los requisitos a nivel gubernamental o de acuerdos bilaterales, extendiendo este modelo a otros que involucren a un mayor número de Ministerios de Defensa. REACTS es considerado como el nexo entre diferentes iniciativas EDF, PESCO, OTAN y el futuro EDIP.

Defendiendo el espacio: basura espacial y transferencias orbitales (DESEi+d, 2025: 52)

Daniel Casanova Ortega (Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza - Academia General Militar), Ángeles Dena Arto (Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza - Academia General Militar) y Elvis Lacruz Calderón (Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón).

La creciente acumulación de basura espacial constituye uno de los mayores retos para la exploración y explotación del espacio en la actualidad. El Ministerio de Defensa, a través de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID) 2020, aborda esta problemática en la sección 8, dedicada a los sistemas espaciales. En particular, el apartado 8.2, «Segmento terreno», y más concretamente el subapartado 8.2.3, titulado «Sistemas para la vigilancia y seguimiento de basura espacial» (SST o SSA), se centra en el desarrollo y la mejora de tecnologías destinadas a la detección y el monitoreo de objetos en órbita, incluidos los desechos espaciales.

En este trabajo se utilizan datos observacionales de diferentes nubes de basura espacial (https://celestrak.org/). Posteriormente, mediante el uso de un propagador numérico que incorpora las principales perturbaciones que afectan a dichos objetos, se determina la evolución temporal de cada uno de ellos. A continuación, se calcula el máximo de las mínimas distancias entre cada par de objetos de la nube de basura espacial, con el objetivo de identificar cuáles se encuentran más próximos entre sí. A partir de

este análisis, es posible determinar diferentes «líderes» dentro de la nube, así como los objetos cercanos (asociados) a cada uno de ellos. De este modo, el estudio del líder permite analizar el comportamiento conjunto de un grupo de objetos que se mantienen en proximidad.

Finalmente, tras analizar la evolución temporal del conjunto y considerando la necesidad de mitigar los riesgos derivados de la presencia de escombros espaciales —a fin de prevenir la pérdida de capacidades o daños en activos en órbita—, se propone una estrategia para alcanzar dichos escombros mediante transferencias orbitales. Es decir, partiendo de una órbita inicial en la que se encuentra el instrumento de mitigación, se planifica su traslado a la órbita final, donde se localizan el líder y sus asociados, con el objetivo de posibilitar su eliminación.

Herramienta web de monitorización de señales de navegación por satélite: GNSSense (DESEi+d, 2025: 61)

Óscar Gamallo Palomares (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Carlos Hernando Ramiro (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Javier Junquera Sánchez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Sergio Angulo Cosín (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) y José Antonio Gómez Sánchez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA).

Los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) proporcionan servicios de posicionamiento, navegación y tiempo (PNT) esenciales tanto para aplicaciones civiles como militares. La creciente dependencia de estas señales las convierte en un activo a vigilar, ya que sus prestaciones pueden verse degradadas por fallos en el propio sistema, por condiciones de entorno hostiles, e incluso por interferencias intencionadas (*jamming*) y suplantaciones (*spoofing*), comprometiendo la disponibilidad y la integridad de los datos de PNT. En este contexto, el Centro de Seguridad Espacial del INTA ha desarrollado GNSSense, una herramienta web de monitorización de señales de GNSS, con el fin de verificar su correcto funcionamiento y detectar indicios de potenciales ataques.

Esta herramienta web se articula en torno a tres funcionalidades principales. En primer lugar, ofrece una monitorización en tiempo real del estado y características de las señales de GNSS. En este sentido, GNSSense

se apoya en la antena instalada en el Centro de Seguridad Espacial del INTA, localizado en el campus del Torrejón de Ardoz, para capturar las señales satelitales de las constelaciones de los cuatro GNSS operativos (GPS, GLONASS, BeiDou y Galileo). Posteriormente, GNSSense las procesa para mostrar información de parámetro relevantes, como número de satélites, posiciones orbitales, relación señal-ruido (SNR), factor de dilución de la precisión (DOP) y error de posicionamiento en dos y tres dimensiones. Además, se proporciona un registro histórico de estas variables, con el fin de analizar su evolución en el tiempo, evaluar cambios e identificar anomalías.

En segundo lugar, la aplicación permite al usuario incorporar sus propios archivos de señales de GNSS, adquiridos con cualquier receptor en formato NMEA, para extraer y visualizar la misma información de interés comentada anteriormente. De esta manera, el usuario puede analizar las características y prestaciones de las señales de GNSS para cualquier otro escenario. Por último, GNSSense también puede emplearse para fines formativos y de divulgación, tanto en el ámbito civil como militar. La implementación de ejemplos y resolución de ejercicios con GNSSense permite concienciar de una manera práctica y visual sobre la importancia y las capacidades de los GNSS, con especial énfasis en el sistema europeo Galileo. Al aumentar la comprensión pública y la aceptación de los GNSS en general, y de Galileo en particular, se fomenta su adopción y maximiza su potencial.

ÁREA 9
Combatiente

Influencia de la experiencia en el rendimiento motor bajo estrés en unidades paracaidistas (DESEi+d, 2025: 84)

Vicente Javier Clemente-Suárez (Universidad Europea de Madrid), José Juan Robles Pérez (USAC San Cristobal), José Franciscto Tornero Aguilera (KOS. Generating Health), María Stergiu (Universidad Europea de Madrid) y Arian Aladro (Universidad Europea de Valencia).

Este estudio examinó la influencia de la experiencia operativa en las respuestas psicofisiológicas y en las habilidades motoras finas de paracaidistas militares varones expuestos a una situación de estrés agudo. Un total de 132 soldados fueron evaluados y distribuidos en dos grupos: el grupo no experimentado (≤ 6 saltos) y el grupo experimentado (> 50 saltos). La intervención consistió en un salto táctico automatizado desde una altitud de quinientos metros, con evaluaciones realizadas tanto 2,5 horas antes como inmediatamente después del aterrizaje. Las variables analizadas incluyeron fuerza de tren inferior (mediante salto vertical), fuerza isométrica de la mano dominante, activación cortical (a través del umbral de fusión crítica del parpadeo), ansiedad cognitiva y somática, autoconfianza (mediante el cuestionario CSAI-2R), y una prueba de habilidad motora fina que consistió en recargar un cargador de pistola de quince cartuchos. Los resultados revelaron diferencias significativas entre ambos grupos. Los participantes no experimentados presentaron mayores niveles de ansiedad anticipatoria, una activación cortical más elevada antes

del salto y un rendimiento inferior en la tarea de recarga del cargador. Por el contrario, los paracaidistas experimentados mostraron una mayor estabilidad psicofisiológica, mantuvieron el rendimiento en tareas motoras finas, mejoraron su activación cortical tras el salto y evidenciaron un incremento significativo en autoconfianza. Ambos grupos mejoraron en la fuerza del tren inferior, probablemente como respuesta al incremento simpático inducido por la situación de salto; sin embargo, solo los no experimentados mostraron mejoras en la recarga del cargador, lo cual puede relacionarse con el efecto de aprendizaje inmediato. Estos hallazgos refuerzan la hipótesis de que la experiencia operacional actúa como modulador de la respuesta al estrés, amortiguando sus efectos negativos sobre el rendimiento motor fino. En este sentido, se subraya la necesidad de implementar programas de entrenamiento específicos para personal con menor experiencia, que contemplen no solo el desarrollo técnico, sino también estrategias de control psicofisiológico y fortalecimiento de la resiliencia emocional, con el objetivo de optimizar la respuesta y el rendimiento en escenarios de alta exigencia táctica.

Análisis de la actividad alpha y theta del EEG durante la simulación de vuelo: un estudio piloto (DESEi+d, 2025: 97)

Germán Rodríguez Bermúdez (CUD - San Javier), Hugo Barbe (ECOLE AIR), María Victoria Sebastián Guerrero (CUD - Zaragoza), Elvira Navarro Palacio (CUD - Zaragoza), Carlos Ruiz Pérez (CUD - Zaragoza) y José María Iso Pérez (CUD - Zaragoza).

El manejo de aeronaves militares está considerado como una tarea compleja cuyo nivel de ejecución está relacionado de forma directa con el estado de activación cerebral en que se encuentre el sujeto durante su desarrollo. Para registrar la activación cortical se puede utilizar el EEG, técnica ampliamente estandarizada en el ámbito clínico y en investigación básica. El objetivo principal de esta comunicación es presentar el estudio piloto llevado a cabo por este grupo de investigación para el análisis de las señales electroencefalográficas (EEG) recogidas a un grupo de alumnos voluntarios de la Academia General del Aire y del Espacio (AGA). Para cada uno de los sujetos se han grabado señales de entre tres y cinco minutos de duración de distintos tipos de EEG, en estados basales y durante la simulación de diferentes fases de vuelo con distintos niveles de dificultad y diferentes demandas de atención y destreza, así como de carga de trabajo (despegue, aterrizaje…). El simulador utilizado recrea condiciones prácticamente idénticas a las reales. Las señales se han grabado con un electroencefalógrafo portátil Enobio 8 (Neuroelectrics) con

el programa Nic2. El trabajo se centra en el estudio frecuencial de las señales EEG, examinando las variaciones observadas en las bandas de frecuencias alpha y theta de las señales EEG. Las variaciones de la banda de frecuencia alpha (8-12 Hz) pueden estar relacionadas con la atención, el procesamiento de información, la memoria y la relajación. La banda theta (3,5-7,5 Hz) se considera un índice bien conocido de carga mental. Una vez procesadas las señales y obtenidos los valores de las bandas de frecuencia del espectro de potencia, se realizará un estudio estadístico completo de los resultados obtenidos. Se estudiará la existencia de posibles diferencias significativas en los parámetros obtenidos en los distintos tipos de EEG en cada canal, así como entre los grupos en estudio.

Evaluación de la influencia de los campos electromagnéticos en los factores humanos: un estudio en el INTA (DESEi+d, 2025: 123)

Alberto San Segundo (Instituto Nacional de Tecnica Aerospacial), Inma Mohino-Herranz (Instituto Nacional de Tecnica Aerospacial), María García Gallego (Instituto Nacional de Tecnica Aerospacial), Sagrario Alonso Díaz (Instituto Nacional de Tecnica Aerospacial) y Jaime García Gallegos (Instituto Nacional de Tecnica Aerospacial).

El avance tecnológico y la creciente presencia de dispositivos inalámbricos han incrementado notablemente la exposición humana a campos electromagnéticos (CEM), generando un interés creciente por comprender su impacto real en la salud y el rendimiento humano. Si bien los efectos de la exposición prolongada han sido estudiados, persisten incertidumbres relevantes en torno a exposiciones breves, intermitentes y en condiciones reales de uso, especialmente en entornos con alta densidad de señales.

Desde el Centro de metrología y Calibración del INTA, se está desarrollando un estudio innovador centrado en la interacción entre CEM y factores humanos, combinando experiencia en metrología, bioinstrumentación y análisis cognitivo. Esta investigación parte de una revisión exhaustiva de la literatura científica que evidencia discrepancias entre estudios sobre radiación no ionizante. A diferencia de la radiación ionizante, cuyos efectos térmicos son bien conocidos, la radiación no ionizante carece de un

consenso claro respecto a los posibles efectos no térmicos, a pesar de su incremento exponencial en el entorno.

El enfoque que se da aquí propone identificar umbrales comunes de exposición mediante el análisis comparativo de estudios en animales y humanos, así como la realización de mediciones reales en distintas instalaciones del INTA. Uno de los componentes más innovadores de este trabajo es la creación de una base de datos experimental con tareas cognitivas, sensoriales y de carga mental bajo diferentes niveles de exposición. Durante estas sesiones, se recogen variables fisiológicas clave como ECG, EEG, impedancia torácica y actividad electrodermal.

Debido a las restricciones en la generación artificial de CEM, se ha optado por caracterizar salas reales de uso habitual, seleccionadas por sus condiciones de campo electromagnético naturales. Con estos datos, se busca entrenar modelos de inteligencia artificial que permitan detectar, con base en la respuesta fisiológica y cognitiva de los participantes, la exposición a diferentes niveles de CEM.

Este proyecto representa un esfuerzo multidisciplinar pionero, con implicaciones tanto en el ámbito de la defensa como en la salud pública. El objetivo de este trabajo es contribuir a una mejor comprensión de los riesgos potenciales, no solo en los efectos térmicos, sino también en aquellos no térmicos que podrían influir en la capacidad cognitiva, el rendimiento operativo y el bienestar general de los individuos en contextos cotidianos y de aplicación en entornos militares y civiles.

Sistema de mochila para transporte de misiles Spike con amortiguación e integración asistida por exoesqueleto (DESEi+d, 2025: 129)

Daniel Fernández (PAP TECNOS).

El proyecto tiene como objetivo el desarrollo de un innovador sistema para el transporte de lanzadores y misiles Spike (25 a 30 kg). Este sistema combina una mochila equipada con amortiguación de carga y la asistencia de un exoesqueleto, proporcionando una solución efectiva para reducir la carga física sobre el usuario y aumentar su capacidad operativa. Este sistema es dual, teniendo amplias aplicaciones militares y civiles.

El diseño se centra en el modularidad, la adaptabilidad y la tecnología avanzada mediante la integración de un exoesqueleto que asiste el movimiento y alivia la carga soportada. El sistema podrá ser utilizado por personas de distintas estaturas, complexiones y tipos de calzado, sin necesidad de ajustes personalizados. Esto asegura una alta flexibilidad operacional, superando posibles barreras por limitaciones físicas o diferentes capacidades, y facilita su uso por un amplio rango de usuarios, optimizando la eficiencia en escenarios de operación.

Características:

– Versatilidad: MTS (mochila transporte Spike), diseñada específicamente para transportar lanzadores y misiles Spike; MTA (mochila táctica asistida), pensada para el transporte de otros equipos y materiales,

siendo útil en aplicaciones como las operaciones de la Unidad Militar de Emergencias (UME); MAMU (mochila asistida multiuso), diseñada para uso en operaciones civiles de rescate, asistencia médica o cualquier transporte de material pesado.

– Innovación y ergonomía: el sistema transfiere la totalidad del peso de la carga al suelo, permitiendo al usuario desplazarse caminando o corriendo a velocidades de 10-12 km/h sin experimentar el peso de la carga. Desarrollado con base en la biomecánica corporal, optimiza la ergonomía, reduce el impacto físico y minimiza la fatiga del usuario.
– Integración y adaptabilidad: proceso rápido y sencillo de acople entre la mochila y el exoesqueleto. Compatible con cualquier modelo y talla de calzado sin modificaciones, aumentando significativamente su practicidad y usabilidad.
– Eficiencia operacional: disminución drástica del peso que debe soportar el usuario de manera directa. Menor consumo metabólico y fatiga física, lo que incrementa la capacidad de respuesta en misiones operativas.

El desarrollo de este sistema surge de la necesidad de aliviar la carga física de los soldados y ampliar la capacidad de transporte de misiles Spike, permitiendo llevar hasta tres unidades por operador. Este ambicioso proyecto cuenta con el respaldo de la unidad paracaidista BRIPAC y se encuentra actualmente en fase de desarrollo.

El foramen arqueado como factor de riesgo anatómico en los pilotos de combate (DESEi+d, 2025: 25)

Francisco J. Albert-Bisbal (GIAVAL Research Group, Faculty of Medicine, Universidad de Valencia, 46001 Valencia, España), Juan J. Valenzuela-Fuenzalida (Facultad de Medicina, Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile), Guinevere Granite (F. Edward Hebert School of Medicine, Uniformed Services University of the Health Sciences, Bethesda, Maryland, USA) y Juan A. Sanchís-Gimeno (GIAVAL Research Group, Faculty of Medicine, Universidad de Valencia, 46001 Valencia, España).

El foramen arqueado (FA), también llamado *ponticulus posticus*, es una variante anatómica que se presenta en el arco posterior del atlas o vértebra C1, donde se produce un crecimiento óseo sobre el tercer segmento de la arteria vertebral. Este crecimiento se localiza posterior a la masa lateral del arco posterior y se forma debido a la calcificación de la membrana atlantooccipital oblicua en la unión entre la columna vertebral y el cráneo. La formación de este puente óseo crea un foramen que contiene a la arteria vertebral y el nervio suboccipital. El FA se detecta mediante radiografías de cabeza y cuello en proyección lateral, pero no permiten diferenciar si es unilateral o bilateral, siendo necesario el uso de la tomografía computarizada para valorar si es uni o bilateral. Asimismo, puede presentarse como completo o incompleto, dependiendo de si la osificación genera un puente óseo cerrado o no. La literatura científica sugiere

que la prevalencia general del FA es de aproximadamente el 17% y suele ser asintomático. El problema con el FA es que se ha reportado que aproximadamente entre el 5% y el 7% de los casos, al realizar movimientos de rotación o flexión lateral del cuello, se manifiestan signos y síntomas de insuficiencia vertebrobasilar, así como migraña cervicogénica, pérdida auditiva neurosensorial, tinnitus, vértigo, dolor de cuello, hombro y brazo, aparición del síndrome de Barré-Lieou, relación con el síndrome de Bow Hunter, mayor riesgo de disección de la arteria vertebral, pérdida del tono muscular postural y de la consciencia. Todo lo anterior es crítico para un piloto en situación/simulación de combate porque someten a su columna cervical a unas condiciones extremas que, hipotéticamente, podrían favorecer la aparición de síntomas en caso de tener FA. En estos casos la insuficiencia vertebrobasilar, que implica la disminución del flujo sanguíneo al cerebro, puede deberse a la compresión de la arteria vertebral a su paso por el FA, especialmente durante los movimientos de flexión, extensión y rotación externa del cuello o por compresión por fuerzas G, como ocurre durante las maniobras de combate, pudiendo resultar en la pérdida de sus capacidades de combate que pueden resultar fatales para sus vidas. Por ello, se sugiere investigar la presencia del FA en los pilotos de combate con la finalidad de prevenir posibles complicaciones clínicas que afecten su salud o su propia vida.

ÁREA 10

Nrbqe

Proyecto ENASUS: análisis de señal en sensores MOx mediante la transformada de Mellin (DESEi+d, 2025: 41)

Raúl López Sánchez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), David Baza Herrero (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Roberto Díez Castellanos (Universidad de Valladolid, UVa), Marisol Vega Alegre (Universidad de Valladolid, UVa) y Luis Mariano Debán Miguel (Universidad de Valladolid, UVa).

Los sensores de óxido metálico, MOx, presentan una elevada sensibilidad a gases. Sin embargo, su aplicación está limitada por el elevado tiempo que requieren para equilibrar su respuesta (*i. e.*, región estacionaria $4\tau>30$ s). Por otra parte, el periodo que tarda la señal en estabilizarse de denomina región transitoria de la señal (*i. e.*, $t<4\tau$) y, aunque no se utilice para cuantificar el analito, permite realizar análisis que proporcionen información sobre la naturaleza química del analito. Sin embargo, la mayor parte de los análisis en la región transitoria suelen implicar funciones matemáticas complejas, con elevados tiempos de análisis o, por el contrario, implican simplificaciones excesivas (p. ej., normalización logarítmica), que derivan en una pérdida relevante de la poca información disponible. En el presente documento se aplica una nueva metodología de análisis en la región transitoria basada en la transformada de Mellin, lo que permite realizar análisis dinámicos sobre la señal de tres MOx de tipo cualitativo y cuantitativo. Para ello, se ha utilizado un modelo de

respuesta basado en dos procesos competitivos: la adsorción y la desorción del analito sobre la superficie del MOx. Esta metodología aumenta de forma importante la información contenida en los parámetros (n. t. *features*) y, probablemente, represente la primera estimación documentada de la concentración de un vapor en la región transitoria de un MOx. El análisis matemático de la señal está dirigido a aumentar el grado de madurez (*i. e.*, TRL) de una nariz electrónica para la detección de explosivos en escenarios realistas.

Proyecto ENASUS: generación de atmósferas contaminadas para la caracterización de sensores Mox (DESEi+d, 2025: 42)

David Baza Herrero (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Roberto Díez Castellanos (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Raúl López Sánchez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Mariasol Vega Alegre (Universidad de Valladolid, UVa) y Luis Mariano Debán Miguel (Universidad de Valladolid, UVa).

Un control preciso sobre la concentración de un analito en fase vapor es esencial para calibrar la respuesta en los sensores de gases. En el presente trabajo se evalúan dos métodos para la generación de contaminantes en fase vapor, con el objetivo de caracterizar un *array* de tres sensores de óxido metálico, MOx. Desde un punto de vista matemático, la respuesta del sensor se denomina función de salida, la cual depende tanto de la función de entrada (FE) como de la función de transferencia (FT), siendo esta última la que, de conocerse, facilitaría el análisis de la respuesta de los MOx, independientemente de posibles fluctuaciones en el flujo de entrada a los sensores. La primera metodología ensayada emplea caudalímetros de flujo másico (MFC) que permiten FE de tipo escalón. En segundo lugar, se ofrece un acoplamiento novedoso de un equipo de desorción térmica (ATD) y un cromatógrafo de gases (CG) con detector de conductividad térmica (TCD), permitiendo generar FE del tipo delta de Dirac. Estas técnicas han permitido generar vapores de contaminantes

para diversos disolventes orgánicos como etanol, acetona y hexano entre otros. Al final del documento se realiza una discusión razonada sobre la reproducibilidad y utilidad de ambos sistemas de generación de atmósferas, tanto para la caracterización de sensores como en su aplicación para la identificación de explosivos y drogas.

Soluciones avanzadas basadas en IA, autonomía y plataformas integradas para la detección y neutralización de amenazas explosivas (DESEi+d, 2025: 81)

Vicente Javier de Ayala Parets (GMV Aerospace and Defence), Elena Mora (GMV Aerospace and Defence), Carolina Marta Bustillo Moran (GMV Aerospace and Defence) y Begoña Rojo Carralero (GMV Aerospace and Defence).

En los últimos años, los artefactos explosivos improvisados (AEI), (o, por sus siglas en inglés *improvised explosive devices*, IED), las municiones sin explotar (MUSE) (*unexploded ordnance*, UXO en inglés) y las minas, se han convertido en una de las principales causas de bajas entre el personal militar, además de poner en riesgo a la población civil, a las infraestructuras críticas y obstaculizar seriamente las operaciones militares y humanitarias. Ante esta situación, y en el marco del Fondo Europeo de Defensa (EDF), surgen iniciativas como los proyectos CONVOY y GENIUS, cuyo objetivo es desarrollar soluciones punteras para hacer frente a este tipo de amenazas. La Unión Europea, a través del EDF, impulsa el desarrollo conjunto de tecnologías avanzadas que refuercen su autonomía estratégica y mejoren la interoperabilidad entre Estados miembros. Estos proyectos combinan sensores avanzados integrados en plataformas no tripuladas (UAV, Unmanned Aerial Vehicles; UGV, Unmanned

Ground Vehicles) para una detección y localización precisa de amenazas explosivas. La información recogida se procesa y fusiona mediante algoritmos de inteligencia artificial (AI, *artificial intelligence*), mejorando los procesos de caracterización y clasificación. Estas plataformas actúan de forma coordinada gracias a una arquitectura abierta y modular, que facilita su interoperabilidad con sistemas de mando y control (C2, *command and control*), sistemas de gestión de combate (BMS, *battle management system*) y sistemas de combatiente desmontado (DSS, *dismounted soldier system*). El sistema propuesto supone una solución integral contra amenazas, destacando por:

– Arquitectura abierta, modular e interoperable, que integra sensores, plataformas, efectores y componentes de AI en una nube táctica desplegable, permitiendo la conexión de todos los nodos y el intercambio seguro y en tiempo real de información.
– Sensores avanzados integrados en UAVs y UGVs, capaces de detectar, mapear y monitorizar amenazas ocultas en tiempo real.
– Fusión de datos multisensor y análisis con AI, para mejorar la precisión en clasificación, localización y reducción de falsas alarmas.
– Sistema de contramedidas electrónicas (ECM) con *jamming* adaptativo, que inhibe amenazas sin interferir con sistemas aliados.
– Neutralización autónoma, mediante tecnología láser, manipuladores robóticos y dispositivos de impulso electromagnético junto con el uso de plataformas desechables de bajo coste para la neutralización directa de amenazas. El desarrollo de estos dos proyectos contribuye al avance tecnológico e industrial europeo, promoviendo la cooperación entre países y actores clave del sector defensa, y buscando mejorar la capacidad de actuación sobre el terreno.

Proyecto europeo TICHE para la detección de minas y dispositivos improvisados enterrados (DESEi+d, 2025: 135)

Alejandro del Hoyo Vijande (Universidad de Oviedo), Yuri Álvarez López (Universidad de Oviedo), Jaime Laviada Martínez (Universidad de Oviedo), Fernando Las Heras Andrés (Universidad de Oviedo), Daoíz Zamora (Mobility Ion Technologies S. L., MION) y Miguel Manrique Esteban (UAV Navigation - Grupo Oesía, UAVNGO).

Las minas terrestres y los artefactos explosivos improvisados (IEDs) suponen una gran amenaza tanto para el personal militar y civil como para el equipamiento, siendo una de las principales causas de bajas de las fuerzas europeas durante las operaciones. El proyecto europeo Threats Identification by Collaborative vehicles for Human lifesaving against Explosives (TICHE), financiado por el Fondo Europeo de Defensa (EDF), pretende contrarrestar estas amenazas ocultas para aumentar la seguridad en las zonas de operaciones y mejorar la eficacia operativa. El objetivo es desarrollar una solución colaborativa y (semi)autónoma en la que se utilicen diferentes tecnologías de detección con sistemas embarcados en vehículos terrestres (UGVs) o aéreos (UAVs) no tripulados. De esta forma se reduce el riesgo humano y se aprovecha la información proporcionada por los distintos sensores para poder detectar amenazas en entornos complejos. El consorcio del proyecto está formado por doce entidades de cinco países de la Unión Europea. Tres de estas entidades

son españolas. Por un lado, el grupo de investigación TSC-UNIOVI de la Universidad de Oviedo, aporta su tecnología de radar de penetración en tierra (GPR), o georradar, para escanear una determinada región en busca de amenazas como minas o IEDs usando UAVs. El sistema combina la tecnología GPR con técnicas de procesado de radar de apertura sintética (SAR) para generar imágenes tridimensionales de alta resolución de la región explorada. Por otro lado, la empresa MION está aplicando su tecnología de detección de vapor basada en su DMA (*differential mobility analyzer*) para detectar las emanaciones de vapor generadas por los explosivos de las minas e IEDs enterrados, para lo cual se requiere una extrema sensibilidad (menor a las PPQS), que es la concentración que se genera en las inmediaciones del enterramiento de las minas. La tercera entidad española es UAV Navigation, que habilita el despliegue operacional de estas tecnologías gracias a la tecnología de guiado, navegación y control (GNC) de UAVNGO, que aporta algoritmos robustos y colaborativos para el control y la planificación completa de la misión de detección/escaneado, empleando de forma simultánea múltiples UAV y colaboración con un UGV. Este proyecto, junto con otros tres proyectos aprobados en la misma convocatoria (DeterMine, CONVOY y AIDEDex), pasa anualmente diversos tests (*dry-run test* y *online test*) para comprobar el rendimiento de las soluciones expuestas. La organización de las pruebas las realiza un quinto consorcio (HiTDOC) compuesto por cinco entidades públicas europeas.

Inertización de materiales energéticos para su estudio con seguridad en la identificación mediante el uso de tecnología Raman (DESEi+d, 2025: 183)

Roberto Díez Castellanos (Policía Nacional), Marisol Vega Alegre (Universidad de Valladolid), Luis Debán Miguel (Universidad de Valladolid), Raúl López Sánchez (INTA), David Baza Herrero (INTA), Rocío Cano Morillo (Policia Nacional), Marcos Rocha Ruiz (Policía Nacional) y Mario Luquero Parro (Policía Nacional).

En la lucha contra el uso y la posesión ilícita de materiales energéticos y sus precursores, la identificación temprana mediante *screening* operativo es una fase operativa/táctica de gran relevancia para la obtención de resultados exitosos en la contención del riesgo que estos suponen en bienes materiales y vidas de ciudadanos y especialistas intervinientes. Una de las técnicas de análisis químico que está alcanzando mayores cotas de utilización en el *screening* operativo por parte de las fuerzas de seguridad, es la espectroscopía Raman, aplicada con equipos compactos que ofrecen resultados analíticos robustos, portabilidad, poca o nula preparación de muestras, cortos tiempos de análisis, y que cuentan con librerías de compuestos de interés. Esto permite obtener relevantes resultados de identificación por personal sin alta cualificación analítica. La espectroscopía Raman, basada en la interacción de radiación luminosa con la materia

mediante procesos de dispersión de la luz, precisa que los fotones de la radiación incidente transfieran la suficiente energía a las moléculas objetivo como para que estas pasen a un estado superior de energía, seguido, a continuación, de un proceso de relajamiento energético en el que se da la emisión de fotones de diferente energía a los de la radiación incidente. Esta radiación emitida durante el proceso de relajación es lo que se conoce como radiación Raman y tiene la propiedad de ser característica de cada compuesto, lo que es aprovechado para generar huellas de identificación de compuestos. Como contrapartida a las bondades de estas tecnologías Raman para el *screening* operativo, su necesidad intrínseca de precisar la excitación de las moléculas supone para algunos materiales energéticos, frecuentes en el uso ilícito, que estos alcancen su estado energético de activación y se produzcan deflagraciones y detonaciones accidentales. En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos en la inertización a la detonación y deflagración de materiales energéticos al ser excitados para la obtención de su espectro Raman, desarrollando metodologías de trabajo basadas en la creación de *slurries* y mezclas de materiales energéticos con diferentes compuestos seleccionados por tener baja actividad Raman y naturaleza polar o apolar; tratando de evitar la disolución, la quimiolisis y minimizar la injerencia de los compuestos soporte seleccionados en la identificación.

Recientes avances en la fabricación de semiconductores ternarios del tipo CdxZn1-xTe para su aplicación en detectores portátiles de radiación gamma que funcionan a temperatura ambiente para la detección temprana de material radiactivo (DESEi+d, 2025: 219)

José Luis Plaza (Universidad Autónoma de Madrid) y Alejandro Braña (Universidad Autonoma de Madrid).

La prevención de la expansión de armas nucleares, así como la detección de las mismas o de terrenos contaminados con residuos radiactivos, es una prioridad principal para el mundo. El material nuclear especial (SNM) es el foco principal debido a que es el componente más importante en un dispositivo explosivo nuclear. Tanto el U-235 en uranio altamente enriquecido como el plutonio y U-233 pueden ser utilizados para sostener una reacción en cadena nuclear explosiva en masas. Por ello, hay una necesidad reconocida para el desarrollo de nuevos sistemas para detectar, caracterizar y tomar imágenes de SNM. Esta línea de desarrollo de nuevos dispositivos portátiles de detección temprana de material nuclear es el objetivo principal de este trabajo. El principio de detección radiológica es

el uso de materiales que emiten, o bien luz (centelleadores), o bien carga eléctrica (semiconductores) cuando son atravesados por radiación de alta energía (rayos-X, rayos-gamma, etc.). Si bien hasta la fecha la mayoría de los dispositivos disponibles se basan en materiales centelleadores, los materiales semiconductores ofrecen, en principio, una mayor resolución, tanto espacial como energética, además de una conversión directa radiación-señal eléctrica. Dentro de los materiales semiconductores, los mejores resultados hasta la fecha son obtenidos con el silicio o germanio ultrapuros. No obstante, el uso de este material obliga a emplear técnicas de criogenia. Por otra parte, los materiales basados en CdxZn1-xTe y, muy recientemente, el CdxZn1-xTeySe1-y (Roy *et al*., 2020; Rejhon *et al*., 2019) son dos semiconductores muy interesantes debido a su funcionamiento a temperatura ambiente con tamaños de dispositivos aptos para su uso en campo. En este trabajo se detallan recientes avances realizados por este grupo de investigación (Martínez Herraiz, Braña y Plaza, 2021; Martínez Herráiz y Plaza, 2022) en relación con el crecimiento y caracterización de cristales de CdxZn1-xTe y CdxZn1-xTeySe1-y mediante la técnica de enfriamiento por gradiente vertical (VGF, por sus siglas en inglés), así como la caracterización de los mismos mediante técnicas de microscopía de infrarrojos (M-IR), microscopía electrónica de barrido (SEM), elipsometría y microscopía de fuerzas atómicas (AFM).

Bibliografía

Martínez-Herraiz, L.; Braña, A. F. y Plaza, J. L. (2021). *Journal of Crystal Growth*. 573, 12 629.

Martínez-Herraiz, L. y Plaza, J. L. (2022). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 516, pp. 55-67.

Rejhon, M.; Dedic, V.; Beran, L.; Roy, U. N.; Franc, J. y James, R. B. (2019). *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 66(8), pp. 1952-1958.

Roy, U. N.; Camarda, G. S.; Cui, Y. y James, R. B. (2020). *Journal of Crystal Growth.* 546, 125 753.

DIEDRO - detección aérea inteligente de IEDs (DESEi+d, 2025: 246)

Jorge Seoane (ITG Technology Center), Carmen González (ITG Technology Center) y Analía Lopez (ITG Technology Center).

DIEDRO es una solución avanzada orientada a la detección aérea de artefactos explosivos improvisados (IEDs) mediante el uso combinado de inteligencia artificial (IA) y vehículos aéreos no tripulados (UAVs). Este sistema ha sido diseñado para operar en entornos complejos, mejorando la seguridad y eficiencia en misiones de reconocimiento y detección de posibles amenazas.

Durante las fases de desarrollo y validación, se emplearon diversos sensores embarcados en UAVs, incluyendo cámaras multiespectrales, térmicas y ópticas. Esta combinación permitió analizar el comportamiento de los IEDs en distintas bandas del espectro electromagnético, bajo diferentes condiciones ambientales y tipos de terreno. La integración de estos datos fue fundamental para entrenar y validar los algoritmos de detección, asegurando su robustez y precisión en situaciones reales.

En su configuración final, la solución DIEDRO integra cámaras térmicas y ópticas, seleccionadas por su eficacia operativa y capacidad de integración en plataformas UAV ligeras. Estos sensores permiten la captación de imágenes en tiempo real con gran nivel de detalle. El sistema cuenta con una base de datos propia de imágenes de IEDs recolectadas en escenarios operativos, lo que fortalece y mejora la tasa de detección. Los datos

capturados son procesados en tiempo real mediante algoritmos avanzados de visión, que permiten la identificación, clasificación y geolocalización de posibles amenazas. Los resultados se visualizan en un mapa georreferenciado que incorpora niveles de confianza asociados a cada detección, ofreciendo así una herramienta sólida para apoyar la toma de decisiones sobre el terreno. DIEDRO representa un avance significativo en las operaciones críticas de seguridad y defensa, ya que reduce de manera considerable la exposición del personal a situaciones de alto riesgo. La solución mejora la eficiencia en misiones de reconocimiento y detección, al mismo tiempo que asegura un manejo más eficaz de las amenazas gracias a la combinación de tecnología punta. De esta forma, no solo se mejora la seguridad operativa, sino que también se optimizan los tiempos de respuesta, contribuyendo a un entorno más seguro para los equipos de intervención y las poblaciones en las que operan.

Descontaminación de agentes de guerra químicos y biológicos mediante plasma frío: resultados con agentes reales (DESEi+d, 2025: 93)

Antonio Menéndez (IBATECH Tecnología), Sergio Montero (IBATECH Tecnología), Beatriz Ambrosio (IBATECH Tecnología), F. Cristian Salemi (IBATECH Tecnología), Ángeles Trillo (IBATECH Tecnología) y Maciej Adam Moskal (IBATECH Tecnología).

La descontaminación de agentes de guerra biológicos y químicos (BQ), para material sensible requiere desarrollar tecnologías compatibles con estos activos vulnerables a los medios tradicionales de descontaminación basados en agentes químicos dispersos en grandes volúmenes de agua.

En este caso, los elementos a descontaminar son equipos, materiales, dispositivos electrónicos, instrumentos ópticos, trajes de protección, documentos, armamento, sensores y superficies críticas, utilizados en operaciones expuestas a atmósferas de riesgo NBQ.

En este trabajo se presenta el desarrollo y validación del nuevo prototipo a escala relevante para la descontaminación BQ específica de agentes de guerra reales por medio de plasma no térmico (NTP) o comúnmente denominado *plasma frío*.

El principio de la descontaminación por plasma frío en cámara de presión, parte de la ionización monopolar o bipolar, la cual produce oxidación

fotocatalítica en forma de especies químicas reactivas sin necesidad de medios materiales como agua ni reactivos químicos de limpieza. Estas técnicas permiten descontaminar material sensible, al no alterar la estructura de los dispositivos electrónicos.

Los modelos objeto del estudio, a través de la técnica de micro descarga superficial (SMD), se basan en la utilización de un generador de corriente y frecuencia apto con una cámara de 1 m^3 de aire a presión atmosférica, donde se genera el plasma y se lleva a cabo el proceso de descontaminación BQ.

En el trabajo se exponen las principales características del prototipo, así como los resultados y conclusiones que se han obtenido para verificar el rendimiento del sistema. En el estudio se han utilizado agentes reales químicos (GD, VX, HD) y biológicos (ántrax, peste) de alta toxicidad. Para ello, se emplearon diferentes matrices de prueba utilizados por dos laboratorios externos autorizados para llevar a cabo este tipo de pruebas.

Los resultados de estas pruebas muestran el potencial de esta tecnología, no solo para descontaminación BQ, sino también en otras aplicaciones como la prevención y gestión de emergencias, el control de fronteras, la industria alimentaria o la sanitización médica.

Estos resultados permiten el desarrollo de nuevas líneas de investigación en este campo como, por ejemplo, la generación de plasma frío, catálisis oxidativa, mediante ionización sin necesidad de cámara, aplicado en espacios interiores o el desarrollo de estaciones móviles de descontaminación NBQ, como sistemas independientes de baja carga logística.

Este sistema se ha desarrollado en el proyecto QUIXOTE II, en el marco de programa de I+D, COINCIDENTE del Ministerio de Defensa-Dirección General de Armamento y Material (DGAM).

Aptámeros y su aplicación en el diagnóstico de saxitoxina (DESEi+d, 2025: 128)

Sergio García Martínez (Alten Soluciones Productos Auditoria e Ingeniería, S. A. U.), Matilde Gil García (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) e Inés Peraile Muñoz (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA).

La saxitoxina es una neurotoxina sintetizada por ciertas especies de cianobacterias y dinoflagelados cuyo mecanismo de acción se basa en el bloqueo reversible de los canales de sodio dependientes de voltaje del sistema nervioso. Su importancia en la salud humana, animal y ambiental tiene un papel dual, ya que, además de ser considerada como arma biológica y química (lista 1 de la Organización para la Prohibición de las Armas Químicas), también es responsable de intoxicaciones alimentarias accidentales producidas por la ingesta de moluscos y pescados contaminados con esta toxina, asociado a la proliferación de estos dinoflagelados y cianobacterias en los *blooms* o floraciones algales. En la actualidad, el diagnóstico de esta toxina se realiza a través de dispositivos denominados biosensores, entre los que destacan los aptasensores. Estos sensores utilizan como molécula de biorreconocimiento los aptámeros: moléculas de ADN monocatenario que, debido a su secuencia y conformación tridimensional característica, son capaces de reconocer a una molécula diana de manera específica y con elevada afinidad. Los aptámeros ofrecen una serie de ventajas frente a los anticuerpos como molécula de

reconocimiento, como son un menor tamaño que facilite la biofuncionalización del sensor, una mayor capacidad de reconocer toxinas de pequeño tamaño con baja inmunogenicidad y una mayor estabilidad química, entre otros. La implementación de las nuevas tecnologías facilita el estudio y optimización de estos aptámeros a través de los denominados análisis de simulación o análisis *in silico*, los cuales predicen de modo computacional, mediante diferentes *software* y herramientas informáticas, la capacidad de reconocimiento de un aptámero sobre su molécula diana, lo que reduce tanto el tiempo como el consumo de los recursos materiales del laboratorio. El Área de Defensa Biológica, del departamento de Sistemas de Defensa NBQ, de la Subdirección General de Sistemas Terrestres, del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), está desarrollando un aptasensor de campo para el diagnóstico de saxitoxina *on site*. Para ello, se han llevado a cabo diversos análisis de simulación de aptámeros que reconozcan saxitoxina, para ser utilizados en el desarrollo de este aptasensor para su uso *on site*.

Deep learning force fields: innovación tecnológica para la detección avanzada de amenazas químicas (DESEi+d, 2025: 48)

Miguel Urbiztondo (Centro Universitario de la Defensa, CUD-AGM) y Óscar de la Iglesia (Centro Universitario de la Defensa, CUD-AGM).

La detección rápida y precisa de compuestos químicos peligrosos, especialmente agentes empleados en guerra química, continúa siendo un reto significativo en seguridad y defensa. Actualmente, los sensores químicos se enfrentan a importantes limitaciones debido a que suelen ser evaluados mediante simulantes en lugar de agentes reales, cuya toxicidad extrema impide ensayos directos. Esto provoca incertidumbre en cuanto a la eficiencia real de estos detectores en situaciones operativas reales, haciendo necesario desarrollar métodos alternativos que sean seguros, efectivos y económicamente viables. En este contexto, la simulación computacional avanzada emerge como una herramienta esencial. Los campos de fuerza basados en *deep learning* (*deep learning force fields*, DLFF) representan una innovadora metodología en el ámbito de la química computacional, capaces de modelar con alta precisión las interacciones moleculares mediante redes neuronales entrenadas. A diferencia de métodos tradicionales, que pueden ser lentos o limitados por aproximaciones, los DLFF combinan la precisión del cálculo cuántico con la velocidad y escalabilidad de la inteligencia artificial, facilitando simulaciones exhaustivas y realistas de sistemas complejos a nivel atómico. En este trabajo, se

presenta la aplicación de DLFF para explorar las interacciones químicas detalladas entre nanomateriales funcionalizados, como los Metal-Organic Frameworks (MOF), grafenos modificados y nanopartículas híbridas, con gases nerviosos y otros compuestos químicos altamente tóxicos utilizados en conflictos bélicos. Estos materiales avanzados poseen características estructurales y químicas específicas que les permiten ser utilizados en sensores altamente sensibles y selectivos. Gracias a la capacidad predictiva de los DLFF, es posible evaluar con gran precisión parámetros clave, incluyendo la energía de adsorción, la afinidad química y la estabilidad estructural bajo diversas condiciones operativas. El enfoque basado en DLFF no solo elimina los riesgos inherentes al manejo experimental directo de agentes químicos reales, sino que también permite una optimización precisa y sistemática del diseño de los detectores, mejorando significativamente su rendimiento en escenarios operativos complejos. De este modo, la incorporación de técnicas avanzadas de inteligencia artificial a la investigación en defensa química ofrece una oportunidad excepcional para superar limitaciones actuales, potenciando la preparación tecnológica ante amenazas emergentes y reforzando la seguridad nacional.

Destrucción de *biofilms* de *Vibrio cholerae* mediante la adición de una molécula señal universal (DESEi+d, 2025: 138)

Nushin Alba Dabbagh-Escalante (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas, INTA), Paloma Lorenzo-Lozano (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas, INTA), Inés Peraile-Muñoz (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas, INTA) y Matilde Gil-García (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas, INTA).

El uso de agentes de guerra biológica supone un problema de seguridad a gran escala en la actualidad. El rápido avance en las técnicas de biotecnología ha simplificado el desarrollo y la producción de armas biológicas, que pueden ser potencialmente dirigidas contra la población, los cultivos o el ganado, provocando efectos devastadores en la salud y en la economía de los países. En un incidente biológico, es crucial llevar a cabo actuaciones inmediatas que permitan la mitigación rápida de la amenaza. La respuesta debe incluir el control del escenario por parte de los equipos de primera intervención, con el fin de detener el ataque y limitar su impacto, evitando así que se propague a otras áreas. Los *biofilms* son comunidades microbianas adheridas a una superficie inerte o un tejido vivo y embebidas en una matriz de exopolisacáridos producidos por sus individuos. El crecimiento en forma de *biofilm* es el más extendido en el ciclo de vida de las bacterias, ya que les permite mejorar su crecimiento

y supervivencia al actuar como una barrera protectora frente a condiciones adversas o componentes antimicrobianos. La capacidad de formar *biofilms* tiene una gran importancia en el ciclo de vida de las bacterias patógenas en términos de patogenicidad e infectividad. La formación y destrucción de *biofilms* bacterianos se regula mediante mecanismos de comunicación celular en los que intervienen moléculas señal, también llamadas autoinductores. El Área de Defensa Biológica del Departamento de Sistemas de Defensa NBQ de la Subdirección General de Sistemas Terrestres del INTA, ha puesto a punto un protocolo para inducir *in vitro* la destrucción rápida de *biofilms* de *Vibrio cholerae*, un potencial agente de guerra biológica, mediante la adición de una molécula de señalización bacteriana o autoinductor. En este caso, el utilizado es una molécula señal universal, presente en numerosos géneros bacterianos, pudiendo ampliarse su utilización a otros patógenos. Este protocolo permitiría el control y la mitigación de la dispersión del agente en un escenario de ataque biológico.

Desarrollo de un método rápido y seguro para la determinación de la viabilidad de esporas utilizadas en guerra biológica (DESEi+d, 2025: 152)

Ines Peraile Muñoz (INTA-Campus La Marañosa), Nushin Alba Dabbagh-Escalante (INTA-Campus La Marañosa) y Matilde Gil-García (INTA-Campus La Marañosa).

Bacillus anthracis es un agente biológico considerado por los Centros de Control de Enfermedades (CDC) de EE. UU. dentro del grupo A de alta prioridad. Pertenece al grupo de agentes biológicos de riesgo 3, según el RD 664/1997 y ha sido usado históricamente como arma biológica. Esto es debido a sus características de alta patogenicidad, alta diseminación, fácil producción y alta resistencia. Esta alta resistencia es debida a su capacidad de formación de esporas que, en condiciones adversas de desecación, temperaturas extremas, falta de nutrientes, etc. les permiten sobrevivir durante mucho tiempo. Cuando las condiciones son nuevamente propicias, como ocurre al llegar a un hospedador adecuado, germinan y son capaces de producir graves infecciones. En la identificación inequívoca de un agente de guerra biológica, no solo es necesario un diagnóstico confirmativo mediante varias técnicas de laboratorio, sino la verificación de su viabilidad. En el caso de una forma esporulada, es necesaria la germinación de dichas esporas y el crecimiento de sus formas

vegetativas, lo que conlleva mucho tiempo y riesgo, puesto que implica la activación y multiplicación exponencial de agentes biológicos altamente patógenos. El Área de Defensa Biológica del Departamento de Sistemas de Defensa NBQ, de la Subdirección General de Sistemas Terrestres, del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), trabaja en la adaptación y optimización de un ensayo de laboratorio rápido, que permita la verificación de la viabilidad de esporas del género *Bacillus*, en menos de una hora y de manera controlada y segura, sin necesidad de cultivar el patógeno. Este método, denominado *endospore viability assay* (EVA), está basado en la detección del ácido dipicolínico (DPA), liberado por las esporas en presencia de ciertos germinantes y condiciones óptimas de humedad y temperatura. El DPA se determina mediante su autofluorescencia utilizando una cantidad mínima de suspensión de la forma esporulada. La utilización de esta técnica EVA permite, por lo tanto, que la manipulación sea segura y que la respuesta frente a un ataque biológico con un agente esporulado, como *Bacillus anthracis*, sea más rápida y precoz, lo que es fundamental para la aplicación de las medidas de seguridad y tratamientos médicos más adecuados.

Detección y cuantificación de autoinductor en cultivos de *Vibrio cholerae* para el desarrollo de un biosensor *on site* (DESEi+d, 2025: 153)

Jesús de Alonso Náger (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Paloma Lorenzo Lozano (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Nushin Alba Dabbagh Escalante (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA) y Matilde Gil García (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA).

El uso de agentes biológicos como arma es una amenaza creciente en la actualidad debido a la globalización mundial y al gran avance que se ha producido en la biotecnología, facilitando su producción y diseminación. La detección e identificación precoz del agente causante de un incidente biológico es fundamental para aplicar, en el menor tiempo posible, medidas específicas tanto de contención como de tratamiento a las víctimas, mitigando su efecto negativo en la sociedad. Por este motivo, el desarrollo de dispositivos de detección e identificación de agentes biológicos *on site*, rápidos, sensibles y de fácil uso es un objetivo prioritario. En este sentido, por un lado, los inmunobiosensores, basados en la unión antígeno-anticuerpo, permiten una identificación rápida y sensible de un agente biológico. Por otro lado, las bacterias patógenas presentan mecanismos bacterianos de comunicación celular o Quorum Sensing (QS) que regulan la síntesis de factores de virulencia en función de la densidad celular, utilizando unas moléculas señal o autoinductores. El Área de

Defensa Biológica del Departamento de Sistemas de Defensa NBQ de la Subdirección General de Sistemas Terrestres del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (NTA), ha desarrollado un modelo de identificación de *Vibrio cholerae*, potencial agente de guerra biológica, mediante el inmunobiosensado de una exoproteina específica denominada hemaglutinina/proteasa (HA/P), que se secreta al medio extracelular a través del sistema de secreción bacteriano de tipo 2 (T2SS) mediante regulación por Quorum Sensing. En este modelo, *in vivo*, la producción y secreción de HA/P ocurre en la fase de crecimiento estacionario, por lo que, para poder ser inmunocapturada en un periodo breve de tiempo, es necesario inducir *in vitro* su producción y secreción mediante la adición de una molécula señal o autoinductor (AI-2). Para ello se ha detectado y cuantificado esta molécula señal AI-2 en sobrenadantes de cultivos de diferentes cepas de *Vibrio cholerae*, mediante cromatografía líquida de alta resolución acoplada a espectrometría de masas simple cuadrupolo (HPLC-SQ), con el objeto de determinar la concentración mínima de AI-2 necesaria para inducir *in vitro* la producción y secreción de HA/P al medio de cultivo. Este desarrollo constituye la base de un biosensor *on site*, que no solo identificará la presencia de *Vibrio cholerae* en muestras sospechosas, sin necesidad de cultivo y en un periodo de tiempo breve, sino que también confirmará la viabilidad del agente biológico

Calibración y adecuación de Sistemas UXV para la detección de contaminación radiactiva (DESEi+d, 2025: 189)

Francisco Manuel Andrada (A. Paukner S. A.), José Manuel Caballero Andrada (LAUREX, Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Extremadura, Dpto. Física Aplicada), Francisco Javier Guillén Gerada (LAUREX, Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Extremadura, Dpto. Física Aplicada), Sandra Balás Sánchez (LAUREX, Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Extremadura, Dpto. Física Aplicada), Juan Baeza Mirralles (LAUREX, Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Extremadura, Dpto. Física Aplicada) y Alejandro Salas García (LAUREX, Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Extremadura, Dpto. Física Aplicada).

Dada la actual coyuntura internacional, cabe la posibilidad de que se pueda producir una contaminación significativa de radiactividad en diferentes entornos —urbanos, rurales o de otro tipo— como consecuencia de accidentes con material nuclear; ya sea de carácter intencionado o no, o a partir de nubes radioactivas procedentes de terceros países. En las primeras etapas de un incidente nuclear, es de vital importancia la caracterización isotópica de la radiactividad acumulada en dicho entorno con el fin de dimensionar el plan de respuesta a la emergencia, pero sin descuidar la adecuada protección radiológica de las unidades desplazadas. El

uso de vehículos no tripulados (UXV) para la detección de radionucleidos en estos escenarios, puede evitar la exposición del personal asignado a la amenaza, al tiempo que se realiza la caracterización radiológica de la zona. Específicamente, el uso de diferentes espectrómetros gamma —CsI(Tl), LaBr3(Ce) y NaI(Tl)—, ajustando su diseño a la tipología del UXV en particular, permite la identificación cualitativa de los radionucleidos depositados, así como una estimación cuantitativa de la contaminación, que se recibe en tiempo real en el puesto de mando avanzado. La selección de sistemas UXV para este tipo de labores, así como la adecuación del espectrómetro a las características del vehículo y su calibración, es crucial para llevar a cabo un cálculo correcto. Factores como la altura, la densidad del aire o la velocidad de vuelo, en el caso de aeronaves no tripuladas (UAV, por sus siglas en inglés), afectan a la sensibilidad y la resolución espacial; al igual que la humedad del suelo, la temperatura o la radiación de fondo, que influyen directamente en las mediciones. En este contexto, el tipo de vehículo, su capacidad portante o las características C4ISR, van a condicionar desde el tamaño del cristal embarcado a la capacidad de procesamiento y potencia de cálculo.

Caracterización molecular del aerobioma mediante secuenciación masiva y sus aplicaciones en la defensa biológica (DESEi+d, 2025: 203)

Sandra Gusi Martínez (INTA), Raquel Villamuera del Sordo (INTA), Olga Bassy Álvarez (ISDEFE) y María Victoria Ortega-García (INTA).

Las técnicas basadas en genómica ofrecen múltiples oportunidades para la defensa biológica, incluyendo respuestas más rápidas y mayor sensibilidad, especificidad y rentabilidad. A modo de prevención, estas herramientas también pueden ser de utilidad para realizar una monitorización y vigilancia de posibles amenazas biológicas similares a los brotes naturales que pueden ocurrir en los ecosistemas. Las técnicas empleadas en este estudio no solo permiten monitorizar la composición del aire, sino que también suponen una potente herramienta para acelerar la detección de agentes biológicos inusuales con precisión, sin recurrir a métodos tradicionales. Concretamente, se ha utilizado la secuenciación del gen 16S rRNA del aerobioma con nanoporos (Oxford Nanopore Technologies, Oxford, Reino Unido), una técnica analítica semindependiente de cultivo, con el objetivo de proporcionar una metodología experimental y computacional para determinar el perfil microbiológico de muestras de aire. Mediante estrategias bioinformáticas, las secuencias obtenidas sirven para determinar la composición bacteriana natural de

muestras de aire con mayor precisión. Tras clasificar las secuencias y someterlas a análisis multivariantes en R (v. 4.3.1), determinadas especies relacionadas con la presencia humana (como *Staphylococcus hominis*, o epidermidis) se encontraron en mayor proporción en entornos de interior, mientras que especies relacionadas con suelos y vegetación (como pueden ser diferentes especies de *Bacillus spp.* o *Rummeliibacillus stabekisii*) aparecieron mayoritariamente en el exterior. Estas especies resultaron significativas para diferentes análisis de identificación de especies asociadas con una u otra localización, lo que puede ser útil para determinar la salubridad de una muestra aérea conocida su procedencia. Además, se analizaron los impactos del cambio de estación sobre las poblaciones a fin de comprender las fluctuaciones que estas podrían sufrir a lo largo del año. Sin embargo, solo se encontraron diferencias significativas en la diversidad alfa, indicando un efecto negativo sobre la riqueza de especies encontradas en temporadas frías. Como posibles aplicaciones de esta metodología en biodefensa, se encontraría la caracterización bacteriana del aire en diferentes ambientes (p. ej., zonas donde se ha producido un incidente biológico, así como laboratorios y hospitales, tanto en zona de operaciones como en territorio nacional). Asimismo, esta metodología se podría extrapolar en un futuro para otros tipos de microorganismos (virus, hongos, etc.) y otros ecosistemas (agua y suelos). Este estudio, que forma parte de un Grupo de Trabajo de Investigación de la OTAN (RTG), mejora la precisión del perfilado microbiano del aire, un entorno que juega un papel clave en la seguridad biológica global.

Entrenamiento personal sanitario en aula de inmersión en realidad virtual en diversos entornos (DESEi+d, 2025: 276)

Valentín González Alonso (Escuela Militar de Sanidad de la Academia Central de la Defensa), María del Carmen Usero Pérez (Escuela Militar de Sanidad de la Academia Central de la Defensa), María Jesús Hernández Goñi (Escuela Militar de Sanidad de la Academia Central de la Defensa), Raúl Rodríguez Arriaza (Escuela Militar de Sanidad de la Academia Central de la Defensa) y María Aranzazu Nieva Moreno (Escuela Militar de Sanidad de la Academia Central de la Defensa).

El proyecto SIMUR es una herramienta de entrenamiento para los oficiales médicos y enfermeros del Cuerpo Militar de Sanidad basada en aulas de inmersión VIROO de realidad virtual (RV). Dicho prototipo se desarrolló gracias al programa de i+D de Defensa (programa COINCIDENTE) con el objeto de generar un *hardware* y un *software* para el desarrollo de una plataforma de entrenamiento aprovechando las ventajas de la tecnología VR. Las posibilidades de entrenamiento se desarrollan en tres entornos diferentes de asistencia sanitaria como son: la asistencia sanitaria en combate (*tactical combat casualty care*, TCCC), la asistencia sanitaria en incidentes con múltiples víctimas intencionados (*tactical emergency casualty care*, TECC) y la asistencia en incidentes con agentes nucleares, biológicos, químicos y radiológicos (NBQR). Este proyecto se basa en un simulador de realidad virtual multiusuario a gran escala desplegado en

el galardonado VIROO, que permite generar sesiones de entrenamiento realistas e intuitivas dirigidas al personal médico de la EMISAN. Gracias a VIROO, el Ministerio de Defensa español puede reducir el coste, el riesgo y el tiempo en sus procesos de aprendizaje y formación. Este proyecto supone solo el comienzo de la próxima generación de simuladores para de un programa de entrenamiento más amplio para las fuerzas armadas españolas. En dicha plataforma, el usuario puede sumergirse en una experiencia de aprendizaje y entrenamiento en primera persona, tomando decisiones en el manejo de diversas bajas sanitarias en diferentes escenarios, condicionados cada uno de ellos por características especiales. Cada usuario puede interactuar con los avatares de los otros miembros del equipo sanitario y con los avatares de los pacientes, debiendo establecer la secuencia de actuación y manejo de pacientes de diversas características de un modo correcto. Este simulador permite, al final de la sesión de entrenamiento, generar un informe sobre la consecución de los objetivos de este y del cumplimento de las acciones sobre cada uno de los pacientes. El Ministerio de Defensa español es un ejemplo más de cómo esta tecnología, y VIROO en particular, puede impulsar la innovación y el aprendizaje, así como mejorar la eficiencia.

ÁREA 11
Tecnologías de la información, comunicaciones y simulación

Algoritmo de Guerra; caracterización de la estrategia (DESEi+d, 2025: 3)

Gerardo Minguela Castro (ISDEFE).

El teatro de operaciones se caracteriza por entornos cada vez más complejos, sofisticados, asimétricos y exigentes, con nuevas amenazas, donde el extraordinario desarrollo tecnológico que se está experimentando establece nuevas formas, como el «algoritmo de guerra», que son resultado de la combinación de la inteligencia artificial y las capacidades militares. Es el algoritmo que está detrás de la capacidad predictiva, del comportamiento de los sistemas autónomos o de la toma de decisiones, entre otros, y por el que obtiene ventaja militar.

Con este fin, se propone un mecanismo que proporciona la capacidad predictiva y el desarrollo de la toma de decisiones consecuente del «algoritmo de guerra», mediante la evaluación de los escenarios de batalla y aplicado a los niveles de mando estratégico y operativo. Para llevarlo a término, se tienden puentes entre los fundamentos históricos de la modelización del combate personificados por los modelos de Lanchester, y la intrincada dinámica del combate de la guerra contemporánea, recurriendo a la combinación de las redes neuronales profundas y los modelos de combate que proporcionan la capacidad predictiva, orientando la operación militar y las decisiones ciclo OODA que, junto con la doctrina de combate de los ejércitos españoles y el análisis resultado-consecuencia, permite al «algoritmo de guerra» la toma de decisiones efectivas y adaptativas en

situaciones adversas, creando una mejora competitiva, conocida como «superioridad de ciclo» y con una utilidad clara en la automatización del adversario, el combatiente propio o combatiente aliado entre otros, así como en las simulaciones constructivas y en los sistemas de apoyo a la decisión que se enfrentan hoy, a un futuro cambiante y complejo, en el que comprender el entorno operativo y tomar decisiones rápidamente es un requisito esencial.

Por último, se informará de la evaluación empírica del modelo propuesto y desarrolla un caso de prueba «la batalla de Creta» que ejemplariza la propuesta y determina su utilidad práctica.

Enhancing defence network resilience: advanced fault-tolerant design and ndt-driven simulation with e-lighthouse network planner (DESEi+d, 2025: 66)

Pablo Pavon (E-lighthouse Network Solutions), Fabiano Pimenta (E-lighthouse Network Solutions), F. Javier Moreno (E-lighthouse Network Solutions), Enrique Fernández (E-lighthouse Network Solutions), Barbara Rodríguez (E-lighthouse Network Solutions), Antonio Buendía (E-lighthouse Network Solutions), Ramón Pérez (E-lighthouse Network Solutions) y M. Victoria Bueno (E-lighthouse Network Solutions).

In the contemporary landscape of defence operations, the robustness and adaptability of communication networks are critical to mission success. Coming from E-lighthouse I+D+i projects and telecommunications network experience, embodying clear dual-use technological characteristics, E-lighthouse Network Planner (ENP) emerges as an innovative solution, offering advanced capabilities tailored to the complex requirements of defence network planning and management. The core of ENP revolves around the creation of network digital twins (NDT), virtual replicas of physical network infrastructures. This technology enables comprehensive simulations that accurately reflect real-world network behaviours under diverse operational scenarios. By employing these NDTs, defence strategists can conduct "what-if" or "fault-tolerant"

analyses, facilitating proactive identification and mitigation of potential vulnerabilities. This approach not only enhances network resilience but also supports informed decision-making in dynamic environments. Likewise, ENP is fully powered by artificial intelligence (AI) to optimize resource allocation and predict network incidents. By exploiting the AI's potential in a secure environment, ENP forecasts probable failures and performance bottlenecks, enabling pre-emptive corrective actions. This predictive capability is fundamental in defence operations, where maintaining uninterrupted communication channels is imperative. ENP also offers a unified, vendor-agnostic platform that supports multi-layer network design across IP/MPLS, optical transport, and Radio Access Networks (RAN). This flexibility allows seamless integration with existing infrastructures, reducing reliance on proprietary systems and promoting interoperability among diverse network components. Such adaptability enables defence networks to operate cohesively across diverse technologies and platforms. Furthermore, ENP offers detailed analytical reports encompassing failure analysis, key performance indicators (KPI) assessments, including latency, bandwidth, availability and physical impairments, and evaluations of capital and operational expenditures (CAPEX and OPEX). These insights are instrumental in strategic planning, facilitating cost-effective network upgrades and ensuring reliable and optimized operations. Incorporating ENP into network planning empowers defence organizations to enhance the resilience, efficiency, and security of their communication infrastructures. By leveraging NDT technology and AI-driven intelligence, ENP addresses the multifaceted challenges of modern defence operations, providing a robust framework for future-ready network management.

Propuesta de un modelo ontológico en sistemas federados con base en taxonomías JC3IEDM (DESEi+d, 2025: 23)

Carlota María Muñoz de Luna Eusebio (Cátedra ISDEFE Defensa y Seguridad Universidad Politécnica de Madrid), Xavier Larriva-Novo (Dpto. Ingeniería Sistemas Telemáticos, ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España), Carmen Sánchez Zas (Dpto. Ingeniería Sistemas Telemáticos, ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, España) y Mateo Burgos García (Cátedra ISDEFE Defensa y Seguridad Universidad Politécnica de Madrid).

La nube de combate (o *combat cloud*) es un sistema integrado de información y comunicación diseñado para operaciones militares modernas. Actúa como una red inteligente que conecta todos los elementos de un campo de batalla entre los diferentes dominios (mar, aire, tierra y «ciber») en tiempo real, orientado a compartir datos, analizar amenazas y tomar decisiones rápidas con ventaja estratégica.

La creciente complejidad de las operaciones militares demanda soluciones innovadoras que reconcilien dos imperativos críticos: la interoperabilidad táctica y la soberanía de datos. Este trabajo presenta un marco ontológico que permite la traducción del dominio «ciber» basado en el entrenamiento colaborativo de modelos de IA mediante aprendizaje federado (FL) a un modelo de estándar militar basado en JC3IEDM mediante un sistema de traducción semántica avanzada.

JC3IEDM (*joint consultation, command and control information exchange data model*) es un modelo de datos relacional diseñado para facilitar la interoperabilidad y el intercambio de información entre sistemas militares de distintos países y organizaciones.

Estos estándares permiten que se hable un lenguaje común entre las partes interesadas.

El núcleo de esta contribución es un traductor ontológico bidireccional que actúa como puente entre:

– Una ontología de dominio específico para aprendizaje federado diseñada para modelar las capas Edge, Fog y Cloud de la *combat cloud*. Esta ontología integra entidades clave, así como sus relaciones, garantizando interoperabilidad entre sistemas heterogéneos y permitiendo un comando y control coordinado interoperable.
– El modelo JC3IEDM, estándar de interoperabilidad militar con más de 195 entidades y 785 atributos.

El traductor ontológico opera como un sistema de mediación semántica activa, resolviendo asimetrías conceptuales entre dominios. Por ejemplo, un dron en la ontología FL no se limita a mapearse a la clase OBJECT-ITEM del modelo JC3IEDM, sino que desencadena una serie de inferencias: sus atributos «autonomía» y «ubicación» se traducen a «*object-item-capability*» y «*object-item-location*» con precisión contextual.

El marco propuesto integra *combat cloud* y aprendizaje federado (FL) para crear un modelo que actúe como puente entre sistemas tecnológicos y militares, facilite la interoperabilidad y mejore la toma de decisiones en tiempo real. Con ello, no solo se garantiza la comunicación efectiva entre sistemas heterogéneos, sino que también se refuerza la soberanía de los datos y la precisión en la interpretación de la información, aspectos cruciales para el éxito de operaciones militares multinacionales.

Modelos de lenguaje para navegación autónoma: casos prácticos de uso (DESEi+d, 2025: 26)

J. de Curtò (Barcelona Supercomputing Center / Universidad Pontificia Comillas / UOC) e I. de Zarzà (Universidad de Zaragoza / UOC).

Este artículo presenta una experimentación inicial realizada como parte del Earth Rover Challenge del congreso ICRA 2025, siendo el objetivo explorar estrategias innovadoras de navegación autónoma mediante modelos de lenguaje (LLMs). La experimentación involucra robots Earth Rover Zero de FrodoBots, operando en condiciones ambientales reales caracterizadas por desafíos significativos como lluvia, terreno irregular y obstáculos dinámicos. Se describe aquí una metodología en la que los datos de telemetría y análisis de escena en tiempo real se integran e interpretan mediante un marco de toma de decisiones impulsado por LLMs. El marco guía eficazmente las decisiones de navegación del róver, como evitar obstáculos y seleccionar la ruta, basándose en los *inputs* ambientales y los datos de los sensores de a bordo. El rendimiento del sistema se evalúa en múltiples escenarios realistas en distintas localizaciones del mundo, con estructuras de hormigón, obstáculos vegetales y condiciones variables del terreno. Los resultados indican que el sistema basado en LLMs es capaz de ajustarse dinámicamente a las restricciones ambientales en situaciones desafiantes, con recomendaciones que se alinean estrechamente con las estrategias guiadas por humanos. Los desarrollos futuros

apuntan a refinar la precisión de las decisiones, la capacidad de respuesta y explorar la planificación asincrónica de múltiples subprocesos para mejorar aún más las capacidades autónomas y la eficiencia del róver.

Sistema de geolocalización en tiempo real para activos militares en zonas de baja cobertura basado en LoRaWAN (DESEi+d, 2025: 38)

Álvaro Marco (Centro Universitario de la Defensa Zaragoza. Carretera Huesca s/n, 50090 Zaragoza), Miguel Ángel Guilliomía (Centro Universitario de la Defensa Zaragoza. Carretera Huesca s/n, 50090 Zaragoza), Carlos Trasviña (CETYS Universidad Campus Ensenada. Camino Microondas Trinidad s/n, 22863 Ensenada B. C., México), Roberto Casas (I3A Universidad de Zaragoza. Mariano Esquillor s/n, 50018 Zaragoza), Andrés Cortés (I3A Universidad de Zaragoza. Mariano Esquillor s/n, 50018 Zaragoza) y Daniel Ubieto (I3A Universidad de Zaragoza. Mariano Esquillor s/n, 50018 Zaragoza).

La localización en tiempo real de activos militares en entornos con escasa cobertura de red representa un desafío operativo de gran relevancia. Este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema de geolocalización modular basado en tecnología LoRa/LoRaWAN, concebido para ofrecer una solución eficiente, segura y de bajo consumo energético que permita monitorizar en tiempo real la posición de personal y equipos en zonas donde las redes convencionales no están disponibles o resultan poco fiables. El sistema se compone de nodos móviles con receptor GPS y conectividad LoRa, un *gateway* encargado de recibir y transmitir los datos, y una infraestructura *software* desarrollada sobre un servidor LoRa

privado y la plataforma de visualización Thingsboard. Esta arquitectura garantiza tanto la integridad como la confidencialidad de los datos transmitidos, mediante mecanismos de autenticación mutua y cifrado AES-128, elementos fundamentales en entornos con potenciales amenazas electrónicas. Una de las principales ventajas del sistema es su escalabilidad. Se ha diseñado para poder incorporar varios receptores fijos o móviles que extiendan la cobertura en terrenos de alta orografía o con obstáculos naturales. Además, su naturaleza modular permite la integración futura de sensores adicionales, como acelerómetros o sensores fisiológicos, habilitando su evolución hacia una red IoT táctica con mayores capacidades. Durante su desarrollo, se ha priorizado el uso de *hardware* comercial disponible, minimizando los costes de implementación y permitiendo una mayor interoperabilidad entre componentes de diferentes fabricantes. Este enfoque ha facilitado una integración ágil y ha permitido concentrar los esfuerzos del equipo en la validación y adaptación del sistema a escenarios reales de uso militar. El sistema no solo ofrece beneficios en operaciones tácticas, sino que también tiene aplicaciones directas en el ámbito de la formación militar. En particular, puede emplearse en ejercicios topográficos para mejorar la seguridad de los alumnos y proporcionar datos objetivos para la evaluación de sus recorridos. Además, su implementación en contextos docentes permite realizar validaciones progresivas en escenarios controlados, antes de su despliegue completo en campo. Esta comunicación describe en detalle la arquitectura del sistema, su proceso de diseño y las decisiones tecnológicas adoptadas, constituyendo la base para futuros trabajos centrados en los resultados de las pruebas de campo y su validación operativa.

Diseño del sistema digital de entrenamiento de tripulación para la futura defensa naval europea (DESEi+d, 2025: 136)

Aitor Facio Valero (Navantia), Luis Antonio Hernández Ibañez (Universidade A Coruña), Viviana Barneche Naya (Universidade A Coruña), Germán Santos Fuentes Landi (Navantia) y Iván Andrés Pena Regueiro (Navantia).

El proyecto EDINAF, financiado por el European Defence Fund (EDF), tiene como objetivo el diseño de una arquitectura digital de referencia para buques, que ofrezca un conjunto coherente de recursos, servicios y soluciones de datos que respalden las operaciones principales del buque. El objetivo es proporcionar una base común para las capacidades de defensa naval en el ecosistema europeo. Los procesos, metodologías y herramientas de esta propuesta se centran en un enfoque digital por diseño. En este contexto, el adiestramiento se convierte en una capacidad vital para los futuros buques de combate europeos. Las soluciones únicas y *ad hoc*, así como las arquitecturas rígidas, limitan los sistemas y a los participantes a ejercicios prefijados que resultan imprácticos o inviables para adaptarse al escenario de defensa en constante cambio. La flexibilidad de una arquitectura orientada a servicios y habilitada con agentes inteligentes es un aspecto diferenciador, cuando el *buque digital* se enfrenta a amenazas asimétricas, sistemas con capacidad dinámica y escenarios inciertos, todo ello con una tripulación especializada y, al mismo tiempo, reducida. En este artículo, se presenta la propuesta conceptual de la arquitectura del

Crew Training System (CTS) de EDINAF. El artículo analiza el estado de la cuestión de los CTS existentes y detalla sus características, capacidades y limitaciones, lo que configura un conjunto de requisitos que la propuesta de diseño debe abordar, junto con las necesidades impuestas por las expectativas actuales y futuras. Estos requisitos cubren aspectos relacionados con la simulación, la operación, la modularidad, la integración, los factores de experiencia de usuario (UX) y el cumplimiento normativo. La propuesta de diseño describe los aspectos de detalle que abordará el CTS digital de próxima generación. Se consideran modos avanzados de interacción humano-máquina y se incluyen entornos de realidad extendida como componentes fundamentales del sistema, orientados hacia una arquitectura modular dirigida a servicios y basada en la nube, que se integra para funcionar sin problemas con el gemelo digital del buque. El uso de agentes, arraigado tanto en la industria del adiestramiento como en la del juego, puede mejorar el rendimiento de la tripulación en los escenarios cambiantes que se avecinan en el sector naval europeo, presentando una transición del CTS tradicional a la propuesta apoyada en una plataforma digital, así como los requisitos de alto nivel de dicha transición y los aspectos éticos que este proceso puede conllevar.

BELLONA: LLMs y agentes IA para la generación de COAs en misiones militares (DESEi+d, 2025: 149)

Sergio Zaera Mata (HI Iberia) y Roberto Gómez-Espinosa Martín (HI Iberia).

El proyecto BELLONA introduce una plataforma avanzada de apoyo a la decisión en misiones militares, basada en tecnologías de modelos de lenguaje de gran escala (LLMs), agentes de inteligencia artificial y entornos multiagente. Su objetivo es generar *courses of action* (COAs) precisos, contextualizados y alineados con la doctrina operativa de las Fuerzas Armadas (FAS), a través de un sistema capaz de integrarse con arquitecturas C4I (mando y control, comunicaciones, computación e inteligencia).

Desarrollado en colaboración con la División de Estrategia y Planes (DIVESTRA) del Estado Mayor Conjunto de la Defensa (EMACON), BELLONA actúa como un facilitador estratégico en la toma de decisiones en entornos multidominio, mediante un ecosistema de agentes reflexivos, adversarios y humanos, entrenados en simulaciones tácticas y estratégicas complejas. Estas simulaciones se basan en entornos LVC (*live, virtual, constructive*) y técnicas avanzadas de *wargaming*, que permiten recrear desde operaciones tácticas detalladas hasta operaciones estratégicas a gran escala, proporcionando escenarios realistas y dinámicos para la evaluación continua de estrategias.

La plataforma contempla dos modos principales de operación: el modo de capacitación e instrucción, orientado a escuelas de guerra y entornos de entrenamiento colaborativo humano-IA, donde los agentes aprenden y se perfeccionan mediante simulaciones iterativas, retroalimentación experta y evaluación continua de COAs; y el modo de despliegue operacional, proporcionando soporte táctico y estratégico en tiempo real a centros de mando y unidades en operaciones, y garantizando una toma de decisiones adaptativa y robusta en entornos operacionales complejos.

La arquitectura modular de BELLONA comprende cuatro grandes componentes: un módulo de datos para la adquisición y contextualización de información; un módulo de IA para la generación, evaluación y autoajuste de COAs; un módulo de control humano que garantiza la supervisión operativa, y un módulo de seguridad, centrado en la protección de la información, la gobernanza ética y el cumplimiento normativo. Entre sus capacidades técnicas destacan los mapas de respuesta neuronal y un *common operational picture* (COP), elementos que permiten la consolidación visual, semántica y explicable del conocimiento operativo.

BELLONA incorpora un marco robusto de cumplimiento ético y regulador, alineado con el derecho internacional humanitario (DIH), el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) y el EU AI Act, promoviendo un uso responsable y verificable de la IA en contextos de defensa. Este compromiso ético se extiende a todo el ciclo de vida de la solución, desde la recopilación de datos hasta la generación y validación de decisiones críticas.

CORSARIO (comunicaciones resilientes por satélite para ala rotatoria integradas y operativas) (DESEi+d, 2025: 218)

María Graña Varela (Inster Grupo Oesia), Juan Manuel Jiménez (Airbus Helicopters), Pablo de la Cruz (Anzen Engineering), Juan José Varela García (Tecnobit Grupo Oesia), Joseba Izaga (CTA Centro de Tecnologías Aeronaúticas) y Antonio Periñán Butrón (Catec Aero).

CORSARIO es un nuevo sistema de comunicaciones por satélite SATCOM de banda de frecuencia Ka para Aeronaves de Ala Rotatoria, que integra tecnología de antenas planas distribuidas con apuntamiento electrónico ESA enfocado a conexiones con satélites de órbitas geoestacionarias (GEO). El proyecto, desarrollado en consorcio (AHE, INSTER, TECNOBIT, ANZEN y CTA), ha alcanzado los siguientes objetivos:

– Avances hacia objetivo cero emisiones. El desarrollo de antenas digitales satelitales, la mejora de radomos y la reducción del peso estructural de las aeronaves son desafíos clave para optimizar el rendimiento y la sostenibilidad con el diseño y la localización optima de la antena en el helicóptero. Tanto el diseño de las antenas planas electrónicas sin elementos mecánicos distribuidas e integradas en el fuselaje como el de la Unidad de Control de Antena (ACU) han sido realizados bajo estándares aeronáuticos, lo que ha supuesto un reto que permitirá avanzar en la estrategia de descarbonización y en la conectividad eficiente.

– Investigación sobre técnicas de fabricación aditiva para los elementos estructurales. Se emplearon herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD) para analizar y mejorar la gestión térmica del disipador, considerando las condiciones de operación críticas en aeronaves. El diseño fue desarrollado bajo criterios de fabricación aditiva metálica por fusión de lecho de polvo, lo que permitió la creación de geometrías altamente complejas sin la necesidad de ensamblar múltiples partes, reduciendo así puntos de fallo potenciales. Esta libertad geométrica posibilitó una integración funcional más eficiente, ofreciendo un elevado rendimiento termo-mecánico. Se evaluaron diferentes configuraciones geométricas, aleaciones con altas propiedades térmicas y orientaciones de impresión para optimizar la disipación térmica y reducir el peso. Los resultados muestran una mejora significativa en la eficiencia térmica y viabilidad estructural del disipador, validando la integración de CFD y la fabricación aditiva como estrategia efectiva para componentes críticos en aplicaciones aeroespaciales.
– Digitalización. En la actualidad, existen prácticas de ingeniería digital que modifican los procesos basados en documentos, por ejemplo, las herramientas de simulación o de diseño gráfico de componentes. En Corsario, como novedad, se ha aplicado esta digitalización a los análisis de seguridad y fiabilidad. Para ello, se ha creado un modelo digital representativo del sistema y se le han agregado los elementos intangibles que representan la seguridad y la fiabilidad para, a continuación, proceder a realizar los análisis del proyecto con herramientas de ingeniería basadas en modelos, como Cameo y Capella.

Implementación de un modelo de riesgos operacionales mediante un sistema *big data* de datos Metocean para su uso en operaciones navales (DESEi+d, 2025: 281)

Carlos Campos Calero (Escuela Naval Militar), Milagros Fernández Gavilanes (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), Carlos Pérez Collazo (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), José Antonio González Prieto (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar) y Pablo Sendín Raña (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar).

El riesgo es inherente a toda operación de entrenamiento, misión u operación naval, no importa lo rutinaria ni lo preparada que esta esté. Siendo el factor humano, la causa más frecuente de fallo o fracaso en una operación militar. En las operaciones navales, el disponer de una información geoespacial, meteorológica y oceanográfica actualizada y de calidad es vital para el buen devenir de estas. El acceso a datos geográficos y MetOcean actualizados y de calidad cobra una especial relevancia a la hora de evaluar los riesgos operativos. Este trabajo hace uso de las nuevas tecnologías para desarrollar un sistema de evaluación de riesgos operacionales navales basado en datos MetOcean, capaz de apoyar la toma de decisiones del mando mediante la generación de mapas visuales de riesgo METOC. El sistema está alimentado por datos capturados en tiempo real mediante un

sistema *big* data en el servidor POSEIDON del Centro Universitario de la Defensa. Se compone de un *backend*, una base de datos PostgreSQL para almacenar los datos MetOcean y un *frontend* como aplicación web interactiva. En ella, el usuario puede consultar el riesgo METOC asociado a una operación mediante la visualización de celdas hexagonales H3 codificadas por colores, cuya resolución puede adaptarse dinámicamente. El modelo desarrollado ha sido validado mediante simulaciones y comparado con herramientas oficiales como SIAAMETOC, demostrando su aplicabilidad en escenarios reales y su valor como herramienta de apoyo a la toma de decisiones. Este trabajo constituye una propuesta tecnológica innovadora que integra herramientas de visualización y automatización en la evaluación del riesgo en el entorno operativo naval.

Integración de códigos propelinear y *linear network coding* (DESEi+d, 2025: 291)

Iván Bailera (Centro Universitario de la Defensa Zaragoza).

Las redes de comunicación son clave para la defensa y seguridad modernas, pero presentan grandes desafíos, como la pérdida de datos, el ruido en las señales y la necesidad de optimizar recursos limitados. Este trabajo de investigación propone combinar dos técnicas, *linear network coding* (LNC) y los códigos propelinear, para mejorar la eficiencia de las redes, especialmente en entornos críticos. LNC es utilizada en redes de comunicación para mejorar la transmisión de datos combinando la información en los nodos intermedios de la red. A diferencia de las técnicas tradicionales de enrutamiento, donde los paquetes de datos se transfieren directamente de un nodo a otro, LNC permite que los nodos realicen operaciones lineales sobre los datos recibidos antes de enviarlos nuevamente. De forma paralela, los códigos propelinear son un tipo de código corrector de errores que poseen una estructura algebraica de grupo con una operación binaria interna. Estos códigos ofrecen ventajas en la corrección de errores frente a los códigos lineales, pero con el mismo beneficio de almacenamiento de datos de un código lineal. Se ha demostrado que, teóricamente, la técnica LNC es suficiente para alcanzar la cota superior en el envío de información en problemas de multidifusión con una fuente. Pero se ha comprobado que ciertas configuraciones de red hacen que el uso de LNC sea insuficiente en general. En este trabajo se propone el uso

de la operación binaria de grupo algebraico de los códigos propelinear para aplicarla en la información de los nodos intermedios de la red. Con el uso de códigos propelinear se da respuesta a algunas configuraciones de red sobre las que es insuficiente el uso de LNC. La investigación presentada se sitúa en la intersección de la combinatoria algebraica y la teoría matemática de la información, y establece las bases para aplicaciones prácticas en el ámbito de la defensa y seguridad.

Implementación de telefonía inalámbrica en puestos de mando de brigada (DESEi+d, 2025: 27)

Andrea Nogués García (Academia General Militar), Alberto Gahete Benavente (CIATRANS 16 BCG BRICAN XVI), Henar Suárez Martos (CIATRANS 16 BCG BRICAN XVI) y María Pérez Zabalza (Centro Universitario de la Defensa, CUD Zaragoza).

La telefonía representa un componente esencial en las comunicaciones de mando y control dentro del ámbito militar. En este contexto, la tecnología VoIP (*voice over Internet protocol*) se presenta como una solución eficaz, al permitir la transmisión de voz a través de redes IP. Ante la creciente complejidad del teatro de operaciones (TO) actual, los puestos de mando (PC) requieren una alta capacidad de adaptación a entornos operativos dinámicos. En este escenario, la comunicación por voz adquiere un papel estratégico en la conducción de operaciones. El cableado tradicional limita la flexibilidad operativa de los PC, dificultando tanto su despliegue como su gestión en contextos tácticos dinámicos. Por ello, se han explorado soluciones inalámbricas que favorecen una gestión más eficiente, mayor movilidad y una resolución ágil de incidencias. En este estudio se compararon dos modelos de teléfonos IP: el Linksys SPA 921/922, de conexión cableada, y el Grandstream DP720, con tecnología inalámbrica DECT. Además de sus características técnicas, el análisis se centró en los requisitos clave para la implementación de VoIP en los PC, considerando

los desafíos operativos y las condiciones del entorno. La ciberseguridad fue uno de los aspectos más relevantes, ya que en un entorno militar resulta crucial proteger la información y asegurar la integridad de las comunicaciones. También se remarcó la necesidad de que los PC sean altamente adaptables a escenarios de combate dinámicos, donde la movilidad y la rápida reconfiguración de las redes resultan fundamentales. Paralelamente, se abordó la escalabilidad, destacando que los PC deben poder ajustar su despliegue según las necesidades tácticas y operativas, optimizando recursos en contextos con restricciones logísticas y presupuestarias. El modelo Grandstream fue identificado como la opción más adecuada para su implementación en puestos de mando de brigada, con potencial de uso en otras unidades militares. Asimismo, se subrayó su viabilidad para ser utilizado en ámbitos civiles, como servicios de emergencia, sanidad o cuerpos de seguridad del Estado, gracias a su versatilidad y facilidad de integración en entornos operativos exigentes.

ARTS: sistemas de comunicaciones avanzados para plataformas aéreas (DESEi+d, 2025: 47)

Borges Alejo Andres (AIRBUS SPACE SYSTEM SPAIN).

El proyecto ARTS tiene como objetivo el desarrollo de equipos de comunicaciones para las plataformas aéreas, que consiste en una nueva generación de antenas para las comunicaciones entre aviones IntraFlight DataLink (IFDL) banda Ku y con satélites banda Ka (SATCOM) que cumpla con los requisitos de *low probability of detection / low probability of detection/interception* (LPD/LPI). La tecnología utilizada se conoce como de antenas activas, y permite un apuntamiento electrónico de haz con un control dinámico preciso de los diagramas de radiación con sistemas de protección contra interferencias.

La antena IFDL establece la comunicación entre dos plataformas con un enlace de baja probabilidad de interceptación y detectabilidad, y con gran capacidad para la transmisión de datos. La antena IFDL trabaja en configuración *half-duplex* en una única apertura con Tx y Rx. La antena SATCOM es un terminal basado en un array activo que permite el enlace con satélites LEO. La antena mantiene el enlace de manera dinámica con el satélite y la aeronave en movimiento. La antena tiene dos aperturas, Tx y Rx en configuración *full-duplex*. Las IFDL y SATCOM incorporan un sistema avanzado de mitigación de interferencias. El sistema se basa en un conjunto de elementos radiantes que detectan la señal interferente y sus características para cancelarla. El sistema es capaz de mitigar las

interferencias teniendo en cuenta las dinámicas de vuelo, la posición de los aviones cooperantes y las señales perturbadoras. El sistema de cancelación trabaja en tiempo real, manteniendo la comunicación deseada en un ambiente electromagnético hostil. Las antenas cuentan con un único controlador que da servicio a IFDL y SATCOM. El controlador decide qué antena utilizar para la comunicación, teniendo en cuenta la información del avión (inercial del avión en posición y orientación) y la posición de las aeronaves próximas y de los satélites en cobertura y todo en tiempo real. El diseño utiliza las últimas tecnologías de electrónica integrada y maximiza el uso de componentes electrónicos comerciales para facilitar la industrialización y reducir el coste de producción. El estudio incluye análisis electromagnéticos para garantizar que la ubicación de la antena en el avión no afecta al diagrama de radiación. Los prototipos de las antenas están construidos y se está completando la campaña de ensayos con buenos resultados. ARTS es la respuesta a las necesidades de interconexión de los aviones militares en los entornos operacionales del futuro

Extensión de redes QKD a través de comunicaciones satelitales en entornos remotos (DESEi+d, 2025: 72)

Aitor Brazaola-Vicario (Tecnalia Research and Innovation) y Óscar Lage (Tecnalia Research and Innovation).

Quantum Key Distribution (QKD) es una primitiva criptográfica que permite el intercambio de claves simétricas con seguridad incondicional, gracias a propiedades de la mecánica cuántica como el principio de incertidumbre y el teorema de no-clonación. Cualquier intento de intercepción introduce perturbaciones detectables, lo que permite identificar ataques pasivos. Sin embargo, los despliegues QKD requieren infraestructura física específica (fibra óptica o enlaces ópticos dedicados) y *hardware* altamente especializado, limitando su despliegue a entornos remotos o escenarios tácticos. Por otro lado, la disponibilidad global de acceso a Internet mediante constelaciones de satélites en órbita baja (LEO) está creciendo exponencialmente, habilitando la conectividad IP en zonas remotas donde no existe infraestructura terrestre.

Este trabajo propone un protocolo para extender el alcance operativo de las redes QKD hacia escenarios remotos sin cobertura óptica, como despliegues tácticos. El protocolo se basa en el intercambio previo de una clave precompartida obtenida por QKD antes del despliegue. Esta clave se usa para cifrar, con un esquema Vernam (OTP), las nuevas claves

generadas en la red QKD fija y enviarlas a través de Internet satelital. Cada nueva clave QKD es transmitida cifrada, usando una nueva que deriva de una porción de la clave precompartida anterior y, mediante una función de derivación (KDF), se generan nuevas claves precompartidas de forma sincronizada en ambos extremos, asegurando la no reutilización del material secreto. Las claves recibidas se almacenan en *buffers* criptográficamente seguros, habilitando la comunicación bidireccional protegida con claves simétricas de alta entropía en algoritmos de cifrado poscuánticos, sobre redes IP no confiables.

El protocolo propuesto es especialmente relevante para entornos militares o de emergencia, donde los nodos remotos requieren acceso a claves simétricas de alta seguridad sin depender de enlaces ópticos directos. Este protocolo permite extender el uso de criptografía cuántica a ubicaciones donde solo existe conectividad satelital, extendiendo así las garantías de seguridad de QKD más allá de su infraestructura tradicional. Además, el protocolo permite una renovación progresiva y segura del material precompartido, garantizando la robustez criptográfica incluso durante despliegues prolongados, proporcionando así una ventaja significativa respecto a métodos existentes.

Optimización de celdas receptoras nano-CMOS para antenas activas (DESEi+d, 2025: 113)

Francisco Aznar (Centro Universitario de la Defensa Zaragoza), Uxua Esteban Eraso (Universidad de Zaragoza), Antonio Dionisio Martínez-Pérez (Universidad de Zaragoza) y Santiago Celma (Universidad de Zaragoza).

Esta contribución presenta el diseño de un circuito integrado de aplicación específica (ASIC) receptor para antenas matriciales implementado en un proceso CMOS de 65 nm. La antena matricial está formada por múltiples elementos radiantes, cada uno de ellos está seguido de una cadena electrónica formada por dos celdas constituyentes: un amplificador de bajo ruido y un desplazador de fase controlado digitalmente. de manera ideal, los amplificadores se consideran idénticos y los estados de fase de los desplazadores equiespaciados. Las celdas individuales se han analizado y optimizado bajo una arquitectura de antena en fase lineal para una frecuencia de 24 GHz, compatible con los estándares de comunicación de última generación. Se han simulado las variaciones de fase de ambas celdas constituyentes derivadas de cambios de temperatura, voltaje de alimentación y variaciones de proceso, tanto globales como aleatorias, las cuales conllevan diferentes penalizaciones en el patrón de radiación de la antena lineal. El análisis se ha realizado mediante tres nuevas métricas que cuantifican por separado las tres principales penalizaciones en el patrón de radiación a partir de las variaciones de fase de

las celdas. Los resultados muestran que el receptor integrado en tecnología CMOS podría potencialmente alcanzar un valor cercano al definido por las variaciones aleatorias mediante el criterio de optimización presentado, a pesar de las variaciones globales de proceso según modelos del fabricante, cambios de temperatura entre –40 °C y +80 °C y cambios de voltaje de alimentación entre 1 y 1.4 V. La arquitectura propuesta para la antena matricial bidimensional está formada por un ASIC cuádruple, es decir, cada ASIC contiene cuatro amplificadores de bajo ruido y cuatro desplazadores de fase, que controlan cuatro elementos de la antena matricial, distribuidos en un patrón bidimensional 2x2. Actualmente se está estudiando la expansión de las métricas propuestas para la antena lineal a esta arquitectura matricial. Posteriormente se llevará a cabo un análisis y optimización de la arquitectura bidimensional nxn con múltiples ASICs cuádruples.

Análisis funcional para el diseño de pruebas de un sistema IoT portátil basado en LoRaWAN en entornos de baja cobertura (DESEi+d, 2025: 188)

Miguel Ángel Guillomía (Centro Universitario de la Defensa Zaragoza. Carretera Huesca s/n, 50090 Zaragoza), Álvaro Marco (Centro Universitario de la Defensa Zaragoza. Carretera Huesca s/n, 50090 Zaragoza), Roberto Jiménez (Centro Universitario de la Defensa Zaragoza. Carretera Huesca s/n, 50090 Zaragoza), Miguel Arroyo (Academia General Militar. Carretera Huesca s/n, 50090 Zaragoza), Gonzalo Gómez (Academia General Militar. Carretera Huesca s/n, 50090 Zaragoza), Daniel Ubieto (I3A Universidad de Zaragoza. Mariano Esquillor s/n, 50018 Zaragoza) y Andrés Cortes (I3A Universidad de Zaragoza. Mariano Esquillor s/n, 50018 Zaragoza).

Esta comunicación presenta el análisis funcional previo al diseño de una batería de pruebas orientadas a la validación de un sistema IoT portátil basado en tecnología LoRaWAN. El sistema ha sido concebido para su uso en entornos operativos con conectividad limitada y su objetivo principal es la localización de activos en tiempo real. No obstante, su arquitectura modular permite ampliar su funcionalidad hacia otras aplicaciones, como el monitoreo ambiental, la detección de eventos o la transmisión de alertas tácticas. El trabajo se enmarca en una fase inicial del proyecto, en la que se busca identificar los parámetros críticos que condicionan el rendimiento del sistema, así como definir los escenarios de prueba que

permitirán optimizar su configuración para distintos despliegues. La planificación de estas pruebas parte del estudio del campo de maniobras de San Gregorio (Academia General Militar, Zaragoza), un entorno representativo por su extensión, orografía y restricciones de conectividad, ideal para caracterizar el comportamiento del sistema en condiciones realistas.

Se han identificado varios ejes clave para la evaluación: alcance de las comunicaciones en función de la línea de visión, estabilidad del enlace en condiciones dinámicas, consumo energético bajo distintos patrones de transmisión, capacidad de redundancia mediante nodos intermedios y resiliencia frente a interferencias. Con base en estos aspectos, se establecerán rutas de prueba, posiciones de control y escenarios simulados que permitan recoger datos significativos para validar y ajustar el diseño.

El enfoque adoptado permite avanzar hacia la definición de una metodología de validación reproducible, que se desarrollará en detalle en trabajos posteriores. Además, sienta las bases para la configuración de sistemas IoT de rápido despliegue, adaptables a múltiples contextos tanto en defensa como en seguridad civil o protección ambiental. El resultado de esta fase servirá para mejorar la eficiencia operativa del sistema y su capacidad de adaptación a escenarios diversos, maximizando su utilidad táctica y estratégica.

Gestión de haz y control de topología en nubes de combate con enlaces directivos (DESEi+d, 2025: 215)

Xavier Artiga (Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, CTTC/CERCA), Luis Blanco (Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, CTTC/CERCA), Engin Zeydan (Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, CTTC/CERCA), Cristian Jesús Vaca-Rubio (Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, CTTC/CERCA), Selva Vía (Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya, CTTC/CERCA), Pau Garriga (INDRA) y Jorge Casamayón (INDRA).

La «nube de combate» es un concepto de guerra colaborativa operativa introducido para aumentar la flexibilidad, resistencia y adaptabilidad en las operaciones tácticas modernas y de próxima generación. Su arquitectura operacional integra sensores, aviones, plataformas y armas en tiempo real para lograr conciencia situacional compartida y decisiones distribuidas. Su despliegue se apoya en FANETs (*flying ad hoc networks*), redes aéreas autoorganizadas formadas por cazas, drones y otras aeronaves, que comparten datos sin depender de infraestructura fija. Cada plataforma actúa como nodo inteligente, capaz de enviar, recibir y enrutar información crítica. Para sostener esta conectividad dinámica, se requieren sistemas de comunicaciones avanzados capaces de operar en entornos con sistemas de navegación global por satélite (GNSS) denegados y con capacidades de baja probabilidad de intercepción y detección (LPI/LPD).

El uso de enlaces directivos contribuye también a esta baja probabilidad de detección/intercepción. Estos requisitos conllevan importantes desafíos tecnológicos en aspectos como la gestión del conformador de haz de la antena y el control dinámico de la topología de red. La gestión de haz incluye el alineamiento y sincronización inicial de dos nodos de la nube y el seguimiento posterior para mantener el enlace. Este alineamiento requiere una búsqueda en tres dimensiones (elevación, azimut y tiempo) para encontrar al nodo objetivo con un haz de pocos grados en un campo de visión de decenas de ellos. Las soluciones incluyen la combinación eficiente de protocolos de intercambio de balizas, estimación de ángulos de llegada y sincronización mediante pilotos. La fase de seguimiento presenta un desafío menor, dado que ya se tiene una estimación de la posición del objetivo, pero requiere el multiplexado eficiente de la transmisión de datos y pilotos para mantener alineamiento en condiciones de alta movilidad. Los mecanismos de control de topología, dada la naturaleza altamente dinámica y descentralizada de las nubes de combate, deben garantizar una conectividad de red estable, minimizar las interferencias y optimizar la utilización de recursos en tiempo real. De esta manera permiten respaldar las operaciones de misión crítica, ajustando dinámicamente las conexiones de los nodos en función de factores como los patrones de movilidad, la calidad de la señal y las prioridades estratégicas de forma sólida. De este modo, la red puede mantener su resistencia y capacidad de respuesta en condiciones operativas cambiantes. El objetivo de esta publicación es la identificación de problemáticas y potenciales soluciones, en un entorno de comunicaciones tácticas en la nube de combate.

Computación precisa de la firma radar de grandes plataformas mediante M3 (DESEi+d, 2025: 11)

José Manuel Taboada (Universidad de Extremadura / EM3WORKS), Luis Landesa (Universidad de Extremadura / EM3WORKS), Victor F. Martín (Universidad Rey Juan Carlos), José Luis Rodríguez (Universidad de Vigo / EM3WORKS), Marta G. Araujo (Universidad de Vigo), Daniel Jericó (EM3WORKS), Manuel Parejo (EM3WORKS), Antonio Gómez (EM3WORKS / Universidad de Extremadura) y Fernando Obelleiro (Universidad de Vigo / EM3WORKS).

La simulación electromagnética del comportamiento de aviones y buques representa uno de los retos clave en defensa para multitud de aplicaciones. En particular las bandas de frecuencias de mayor interés necesitan de herramientas de muy altas prestaciones que puedan ser ejecutadas en entornos computacionales de alto rendimiento, fuera del alcance de la mayoría de organismos y más allá de las capacidades de las herramientas comerciales más avanzadas.

Desde la Universidad de Extremadura, la Universidad de Vigo y la spin-off EM3WORKS —de naturaleza extremeña y gallega— se han desarrollado algoritmos de muy altas prestaciones que son capaces de predecir, con elevados niveles de precisión, el comportamiento electromagnético de grandes plataformas complejas como buques o aviones. Estas herramientas, integradas en el *software* M3 permiten estimar y corregir la sección

radar, medida clave de la vulnerabilidad frente a distintos tipos de radar, tanto monostáticos como biestáticos mediante estas herramientas se puede conocer el comportamiento de los sistemas antes de su fabricación lo que implica un ahorro de coste y tiempo. Las herramientas más avanzadas (entre las que destaca M3) dotan de una alta fiabilidad ante el resultado final, así como permite la optimización de las geometrías y sistemas finales.

Los algoritmos de M3 son aplicables a todo tipo de materiales, desde radiofrecuencia (materiales absorbentes, magnéticos, metasuperficies, etc.) hasta frecuencias ópticas e infrarrojas (materiales plasmónicos, nanomateriales, etc.), lo que ha consolidado su uso en un amplio rango de aplicaciones. Entre ellas, destaca la reducción de la firma radar mediante metamateriales o pinturas absorbentes multicapa, donde M3 ha demostrado su capacidad para optimizar el diseño y lograr reducciones significativas.

Además, las herramientas desarrolladas permiten abordar otras aplicaciones como estudios de compatibilidad electromagnética, diseño de sistemas radiantes, análisis de interferencias o evaluación de niveles de exposición. Actualmente, estas soluciones se aplican en los procesos productivos de grandes plataformas de defensa —como buques de la Armada o sistemas aéreos como el futuro FCAS— tanto en España como en otros países.

El *software* M3 se basa en más de veinticinco años de experiencia en electromagnetismo computacional en las universidades de Extremadura y Vigo, e incorpora los avances científicos más recientes, como MLFMA, descomposición de dominios, técnicas multirresolución o el aprovechamiento de entornos HPC y supercomputadores, campo en el cual M3 ha sido premiado en dos ocasiones internacionalmente. Todo ello ha consolidado a M3 como una referencia en simulación electromagnética de alta precisión en problemas estratégicos complejos.

Aplicación de modelos subrogados basados en *deep learning* para la simulación y optimización de procesos complejos como el del acelerador de IFMIF-DONES (DESEi+d, 2025: 31)

Guillermo Rodríguez Llorente (HI Iberia, UC3M, Gregorio Millán Barbany Institute), Galo Gallardo Romero (HI Iberia), Lucas Magariños Rodríguez (HI Iberia), Rodrigo Morant Navascués (HI Iberia), Nikita Khvatkin Petrovsky (HI Iberia), Rubén Lorenzo Ortega (IFMIF-DONES España) y Roberto Gómez-Espinosa Martín (HI Iberia).

La fusión nuclear representa una de las principales vías para la generación de energía limpia y sostenible en el futuro. No obstante, se enfrenta a varios problemas. Uno de ellos es comprender los efectos de la radiación sobre los materiales del reactor, tarea que desempeñará el acelerador IFMIF-DONES (*International Fusion Materials Irradiation Facility - Demo Oriented Neutron Source*). Esta instalación generará un flujo de neutrones con un espectro similar al de una reacción nuclear para caracterizar materiales críticos en la construcción de futuras plantas de fusión.

Sin embargo, la optimización y el control de este tipo de instrumentos presentan grandes desafíos computacionales debido a la complejidad de los modelos físicos involucrados. En este trabajo, se emplean operadores neuronales de Fourier (FNOs) para desarrollar modelos subrogados que

permitan acelerar las simulaciones de la primera sección de la línea de transporte de alta energía del acelerador (HEBT-S1). Estos modelos son entrenados para predecir la evolución de los haces de partículas a lo largo del eje longitudinal del acelerador, teniendo en cuenta variaciones en la configuración de los cuadrupolos.

Los modelos subrogados obtenidos permiten reducir el tiempo de inferencia en hasta tres órdenes de magnitud en comparación con las simulaciones tradicionales, manteniendo errores porcentuales promedio inferiores al 5 % en las predicciones. Esta aceleración habilita el entrenamiento de controladores basados en aprendizaje por refuerzo, reduciendo tiempo entre iteraciones al orden de milisegundos. Además, debido a esta velocidad y a la propiedad de diferenciabilidad de los modelos, se aplican algoritmos como descenso de gradiente para resolver problemas inversos en cuestión de minutos, optimizando los cuadrupolos para un objetivo de haz de deuterones dado.

El uso de estos modelos subrogados no solo es relevante para la investigación en fusión nuclear, sino que también presenta aplicaciones clave en otros campos, donde la aceleración de simulaciones es crítica para la optimización y control de sistemas complejos en tiempo real. Estas capacidades pueden extenderse a la gestión y control en otros entornos militares y científicos, contribuyendo al avance tecnológico en defensa y energía.

Aplicación de modelos subrogados basados en *deep learning* para la aceleración de simulaciones de daños por irradiación (DESEi+d, 2025: 32)

Lucas Magariños Rodríguez (HI Iberia), Guillermo Rodríguez Llorente (HI Iberia, UC3M, Gregorio Millán Barbany Institute), Rodrigo Morant Navascués (HI Iberia), Nikita Khvatkin Petrovsky (HI Iberia), Galo Gallardo Romero (HI-Iberia), Rubén Lorenzo Ortega (IFMIF-DONES España) y Roberto Gómez-Espinosa Martín (HI Iberia).

La fusión nuclear es una de las tecnologías más prometedoras para la generación de energía limpia y sostenible. Un desafío clave en su desarrollo es evaluar los efectos de la radiación sobre los materiales de los futuros reactores. Para ello, IFMIF-DONES (*International Fusion Materials Irradiation Facility - DEMO Oriented Neutron Source*) generará un flujo de neutrones con un espectro similar al de un reactor de fusión, permitiendo analizar materiales en condiciones extremas. En este contexto, la simulación de la irradiación en el High Flux Test Module (HFTM) es esencial para predecir variables como el daño en los materiales o la producción de hidrógeno y helio.

El modelado de estos procesos se basa en simulaciones Monte Carlo (MC), que, aunque precisas, presentan un alto costo computacional debido a su naturaleza estadística. Para superar esta limitación, en este

trabajo se desarrollan modelos subrogados basados en *deep learning* (DLSMs), capaces de replicar con alta precisión los procesos de irradiación y reducir drásticamente los tiempos de simulación. La simulación se divide en dos fases: primero, se calcula el flujo de neutrones generado por la reacción entre los deuterones y la cortina de litio; luego, este flujo se emplea para modelar sus efectos sobre los materiales del HFTM.

Los modelos subrogados entrenados, basados en DeepONet (*Deep Operator Networks*), permiten reducir el tiempo de inferencia en siete órdenes de magnitud respecto a las simulaciones Monte Carlo, manteniendo errores inferiores al 5%. Esta velocidad, junto con la diferenciabilidad de los modelos, facilita la optimización de configuraciones de irradiación a partir de los parámetros del haz de deuterones. Además, la integración de estos modelos con datos experimentales posibilita la creación de gemelos digitales para evaluar en tiempo real el daño en materiales y estructuras expuestas a alta irradiación.

Más allá de la fusión nuclear, esta tecnología tiene aplicaciones directas en defensa y seguridad, donde la velocidad de inferencia es fundamental para la monitorización de sistemas expuestos a radiación extrema, como reactores compactos, blindajes avanzados y entornos espaciales. La integración de DLSMs en estos ámbitos representa un avance estratégico en la optimización de procesos críticos con impacto en la energía y la defensa.

Validación estructural de un compuesto de matriz cerámica (cordierita-rGO) como alternativa al soporte metálico de una lente de difracción para aplicaciones aeroespaciales (DESEi+d, 2025: 34)

Pablo Pflueger Tejero (INTA), Juan García-Martínez (INTA), Ángel Díaz Robisco (INTA), Ingrid Esguerra Arce (INTA), Gemma Herranz Sánchez-Cosgalla (UCLM) y María García-Martínez (INTA).

En el desarrollo de sistemas ópticos embarcados en plataformas espaciales, uno de los principales desafíos es mitigar los efectos de las tensiones térmicas inducidas por la diferencia de coeficiente de expansión térmica (CET) entre lentes ópticas y sus soportes estructurales. El uso de aleaciones metálicas como Ti6Al4V, con un CET elevado, puede generar desalineaciones significativas en condiciones extremas. Como solución alternativa, en el marco del proyecto AERORECORD-3D se ha desarrollado un compuesto de matriz cerámica (CMC) basado en cordierita reforzada con óxido de grafeno reducido (rGO), procesado mediante impresión 3D por extrusión (MEX, Material EXtrusion). El trabajo se centra en la validación estructural de un prototipo de soporte de lente de difracción fabricado con este material, con el objetivo de sustituir el componente metálico tradicional. Para ello, se han realizado ensayos mecánicos de flexión y compresión, así como de amortiguamiento dinámico, con

el fin de obtener datos reales de las propiedades mecánicas estructurales del material bajo distintas condiciones. Estos resultados experimentales han sido utilizados como entrada y validación para un modelo de análisis por elementos finitos (FEA), que permite simular el comportamiento termo-mecánico del conjunto óptico-cerámico ante casos de carga que simulan las condiciones de operación aeroespaciales El análisis FEA se ha enfocado en evaluar la distribución de esfuerzos, deformaciones y modos de vibración del sistema ante solicitaciones térmicas, estáticas y dinámicas, comparando el comportamiento del CMC frente al Ti6Al4V. La mejora en la compatibilidad térmica y el aceptable rendimiento mecánico observado sugieren que el material propuesto es viable para aplicaciones espaciales de alta precisión. Asimismo, se discute el efecto del diseño del soporte, las uniones adhesivas y las condiciones de contorno, como factores clave en el rendimiento del sistema completo. Este trabajo constituye un avance significativo en la integración de CMCs en arquitectura óptica aeroespacial, demostrando la utilidad de herramientas de simulación combinadas con validación experimental para el diseño de componentes funcionales en entornos extremos.

Modelos digitales de fiabilidad para apoyo al ciclo de vida (DESEi+d, 2025: 68)

Carmen López de Rojas (Navantia), José Antonio Pagan (Navantia), Javier Martinez Escondrillas (Navantia), Miguel Nuñez Rodríguez (Navantia) y Andrea Belen Arregui Arias (Navantia).

Los análisis ARM (por sus siglas en inglés *Availability, Reliability, Maintainability*) se utilizan desde el comienzo del proceso de diseño de instalaciones complejas y críticas para garantizar que el diseño final cumple los requisitos establecidos de disponibilidad, fiabilidad y mantenibilidad. El cálculo utiliza desde datos basados en experiencia (ensayos o equipos ya en servicio), datos proporcionados por el fabricante de equipos y hasta información extraída de bases de datos reconocidas como EPRD y NPRD. Navantia ha desarrollado un proyecto piloto que aprovecha el análisis ARM realizados con diagramas de bloques de fiabilidad para explotarlos durante la fase de apoyo al ciclo de vida (ACV). La clave es utilizar modelos digitales bien definidos y un método sencillo de actualización fácilmente implementable durante la vida operativa de las unidades. El sistema actualiza los parámetros de fiabilidad de los equipos a partir de datos reales de fallos registrados en el sistema de gestión de mantenimiento o sistema FRACAS (*Failure Reporting and Corrective Action System*) y los importa en el modelo. El resultado de los modelos actualizados permite conocer durante el ciclo de vida como evoluciona la fiabilidad de los sistemas, identificando los equipos que más contribuyen

a la no-fiabilidad global del sistema, permitiendo disponer de una herramienta de apoyo a decisiones que proporciona un alto valor añadido a la gestión de sostenimiento.

Digitalización y automatización de procesos productivos y de gestión en fábrica (DESEi+d, 2025: 79)

José Cavas (QUEST), Gregorio Muñoz López (Navantia S. A, S. M. E.), Miguel Méndez Macías (COEX Smart Services, Navantia S. A S. M. E) y Guillermo Martínez Pérez (QUEST).

La automatización y digitalización en entornos industriales puede mejorar significativamente la eficiencia y calidad de la fase productiva, pero a la vez supone enfrentarse a diversos retos técnicos y estratégicos. Estas tecnologías avanzadas, como la simulación y optimización numérica, la localización de activos y la aplicación de técnicas de inteligencia artificial (IA) mediante el análisis de datos en tiempo real, demandan la capacidad de integrarse de manera armónica con los sistemas productivos existentes, así como de ofrecer un alto nivel de precisión en la representación virtual de procesos y activos.

Entre los desafíos principales encontrados destacan la necesidad de replicar con exactitud los procesos físicos en un entorno digital y la capacidad de gestionar y analizar grandes volúmenes de datos provenientes de sensores y sistemas de control. En este proyecto se ha propuesto desarrollar un sistema que garantice la interoperabilidad con otras plataformas tecnológicas empleadas por Navantia, facilitando una gestión centralizada y eficiente de los procesos, siempre respetando los estándares de seguridad implantados y favoreciendo la convergencia entre los mundos IT y OT.

El proyecto primario DIFACNA del PERTE Naval busca la digitalización de la fábrica de motores como prototipo de infraestructura tecnológica robusta y flexible, lo que permite el despliegue de aplicaciones modulares y de alta disponibilidad orientada a optimizar procesos, mejorar la toma de decisiones estratégicas y aumentar la eficiencia operativa, lo cuál reduce significativamente los tiempos y costes de ejecución en las operaciones.

En este trabajo se describe el proceso de creación de una herramienta prototipo que asegure la continuidad y calidad de los procesos en un entorno industrial dinámico y exigente como es la fábrica de motores de Navantia. Esta herramienta no solo permitirá monitorear y simular procesos en tiempo real, sino también planificar y predecir escenarios operativos para potencia el desempeño, la sostenibilidad y la innovación dentro de la planta.

Efecto del estrés de combate en la memoria operativa del combatiente (DESEi+d, 2025: 90)

Vicente Javier Clemente-Suárez (Universidad Europea de Madrid), Rosa Delgado Moreno (Centro de Estudios de Combate Aplicado), Pedro Montañez González (USAC San Cristobal) y José Juan Robles Perez (USAC San Cristobal).

Este estudio analizó los efectos del estrés de combate sobre la respuesta psicofisiológica, la atención y la memoria de soldados profesionales del Ejército de Tierra en una simulación de combate urbano. Participaron veinte militares varones, a quienes se les evaluó, antes y después de la maniobra, la variabilidad de frecuencia cardíaca, temperatura corporal, glucosa y lactato sanguíneo, fuerza muscular de tren inferior, activación cortical (CFFT), ansiedad (cognitiva y somática) y memoria a través de un cuestionario posmisión sobre estímulos visuales, auditivos y olfativos presentes durante la simulación. Los resultados revelaron un aumento significativo en fuerza explosiva de piernas, frecuencia cardíaca, glucosa y lactato sanguíneos, ansiedad somática y modulación simpática (LF), acompañado de una disminución significativa de la modulación parasimpática (HF), lo que indica una intensa activación del sistema de lucha-huida. El rendimiento en memoria fue selectivo: los soldados recordaron con mayor precisión aquellos estímulos percibidos como amenazas directas para su integridad física (armas, vísceras, sangre), mientras que objetos

neutros como libros, textos o teléfonos móviles fueron menos recordados. Los análisis de correlación mostraron que una mayor modulación simpática y ansiedad cognitiva se asociaron con peores respuestas de memoria, mientras que una mayor activación parasimpática se relacionó positivamente con la memoria auditiva. También se identificaron diferencias significativas en la memoria según los niveles postsimulación de activación cortical, particularmente en el recuerdo de estímulos auditivos y olfativos. Estos hallazgos apoyan la teoría del control atencional, que sugiere que la ansiedad redirige la atención hacia estímulos amenazantes, en detrimento del procesamiento de información contextual no amenazante. El estrés agudo compromete la memoria declarativa, posiblemente debido a alteraciones hormonales como el aumento de cortisol y la disfunción del hipocampo. Como conclusión, el estrés de combate genera una respuesta psicofisiológica elevada que afecta selectivamente la memoria, priorizando los estímulos vinculados a la supervivencia. Estos resultados subrayan la necesidad de incluir entrenamiento psicológico y estrategias de control del estrés en programas militares para mejorar la atención y el rendimiento cognitivo en escenarios operacionales complejos.

Simulación de alta fidelidad para sistemas de misiles: un enfoque modular y continuo (DESEi+d, 2025: 104)

José López Soler (INSTALAZA S. A.), Ivan García Cubero (INSTALAZA S. A.), Luis Ciria Juan (INSTALAZA S. A.) y Alfonso López Laborda (INSTALAZA S. A.).

El proyecto SMARTAIR desarrolla una herramienta integral de simulación destinada a analizar y validar ágilmente modelos de sistemas aéreos de alta dinámica, con un enfoque innovador en despliegue e integración continua. De forma específica, SMARTAIR se centra en plataformas tipo misil diseñadas para ser lanzadas desde sistemas portátiles, lo que implica enfrentar desafíos tecnológicos complejos que requieren modelización y pruebas exhaustivas de numerosos subsistemas que operan de manera coordinada. El éxito en la modelización permitirá llevar a cabo un amplio conjunto de simulaciones que no solo son un requisito básico para abordar con éxito el diseño real de estos sistemas, sino que también permiten reducir significativamente los costes y tiempos asociados al desarrollo, optimizando así los recursos. El alcance del proyecto incluye el análisis detallado, diseño y validación de modelos avanzados en áreas clave como la aerodinámica (modelo PLATAFORMA), sistemas electroópticos (modelo OPTICO) con capacidad de seguimiento de objetivos (modelo TRACKER), y estrategias de guiado, navegación y control (modelos GNC). La integración de estos modelos en un entorno de simulación integral es uno de los objetivos

principales, dado que habilita la ejecución en herramientas y motores gráficos de hiperrealismo (modelo CONOPS). Este nivel de realismo permite emular conceptos operacionales adaptados a las necesidades de diferentes usuarios y entornos operativos. Además, las fases de prototipado y pruebas sobre sistemas reales, asegurarán la verificación de modelos y, así, la validez y funcionalidad en escenarios reales de los mismos. Esto no solo refuerza la fiabilidad de las tecnologías creadas, sino que también facilita la transferencia de los avances hacia posibles desarrollos de futuros sistemas. Con ello, SMARTAIR se posiciona como un referente en el desarrollo de metodologías y herramientas en el ámbito de la ingeniería de sistemas y el Model Based Systems Engineering (MBSE), que no solo impulsan el diseño y verificación de nuevos sistemas, sino que también potencian capacidades innovadoras en simulación, sensorización y control, aplicables a múltiples tipos de sistemas.

Modelos de integración y operación de sistemas de almacenamiento de energía con grupos generadores en bases avanzadas: proyecto NOMAD (DESEi+d, 2025: 105)

Jesús Rey Luengo (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Eduardo López González (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Rosa María Rengel Gálvez (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), Enrique García-Quismondo (fundación IMDEA Energía, Unidad de Procesos Electroquímicos), Alberto Alda (Thales España Sistemas) y Francisca Hernández Uriz (ARPA Equipos Móviles de Campaña).

La demanda energética de las actuales bases avanzadas en operaciones de defensa se satisface mediante grupos electrógenos alimentados por gasoil. Sin embargo, la logística de transporte y suministro de este combustible puede suponer un elevado coste en términos económicos y de vidas humanas. Desde una perspectiva económica, de seguridad y de eficiencia operativa, el despliegue de sistemas de almacenamiento energético en este tipo de aplicaciones se considera una opción clave para mitigar los riesgos asociados al consumo de combustible. Dichos sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, al trabajar de forma paralela con los grupos electrógenos, permiten además que estos últimos operen en condiciones más eficientes. Ante este escenario, el proyecto NOMAD (*novel energy storage technologies usable at military deployments in forward*

operating bases, EDF-2021-ENERENV-D-2) se perfila como una iniciativa pionera para el futuro despliegue de arquitecturas avanzadas en campamentos militares. En concreto, este proyecto plantea la operación conjunta de grupos electrógenos convencionales con los innovadores sistemas NOMAD. Estos sistemas se componen de dos módulos funcionales integrados en un contenedor, cada uno equipado con distintas tecnologías de almacenamiento y su correspondiente electrónica de potencia. La gestión de estos módulos se realizará de manera jerárquica, de acuerdo con las prioridades definidas por el sistema de control energético que los gobierne. Sin embargo, antes de que se dé este despliegue de forma física, es necesario analizar las estrategias de control que optimicen las prestaciones de estos sistemas en este tipo de arquitecturas. Para abordar esta cuestión, se desarrollarán y validarán modelos y simulaciones que permitan evaluar el impacto del sistema NOMAD operando en paralelo con el grupo electrógeno, sobre la eficiencia y el consumo de combustible de la instalación bajo diferentes estrategias de control que prioricen alternativamente uno u otro sistema. Los resultados obtenidos permitirán determinar el dimensionado de los grupos electrógenos (capaz de satisfacer la demanda energética del campamento militar), así como definir su régimen de operación más adecuado para garantizar un funcionamiento eficiente, robusto y fiable de toda la instalación.

Mantenimiento prescriptivo para vehículos militares usando técnicas de IA generativa (DESEi+d, 2025: 107)

Antonio López-Almodóvar (The CT Engineering Group), Iago Docamiño (The CT Engineering Group), Sergio Jorge Serra (The CT Engineering Group), Daniel Xu (The CT Engineering Group), Lara de la Fuente (The CT Engineering Group), Gonzalo Pozo (The CT Engineering Group), Emiliano Javier Castro (The CT Engineering Group), Fernando Manzanera (The CT Engineering Group), Francisco Andrés (The CT Engineering Group) y Delia Rodríguez de Llera (The CT Engineering Group).

En el ámbito de las operaciones militares, la fiabilidad y la preparación operativa de los vehículos son esenciales. El mantenimiento prescriptivo es un enfoque innovador destinado a evaluar y preservar la vida útil remanente de los componentes de los vehículos militares. A diferencia del mantenimiento predictivo, que pronostica posibles fallos, el mantenimiento prescriptivo amplía el análisis recomendando acciones específicas para optimizar las actividades de mantenimiento y mejorar la eficiencia operativa. Gracias al aprendizaje frugal, los datos sintéticos y el metaprendizaje, este estudio, realizado en el marco de un caso de uso del proyecto KOIOS financiado por el European Defence Fund (EDF), tiene como objetivo lograr una rápida adaptación y una planificación de mantenimiento precisa para una mayor disponibilidad operativa.

Las técnicas de aprendizaje frugal permiten un entrenamiento eficiente del modelo con datos limitados, lo cual es crucial en escenarios donde la disponibilidad de datos es compleja. Además, la integración de datos sintéticos mejora la robustez del modelo al simular diversas condiciones operativas, al tiempo que el entrenamiento de un metamodelo facilita la rápida adaptación a nuevos entornos y tipos de vehículos, mejorando la precisión y eficiencia del mantenimiento prescriptivo. El metaprendizaje implica entrenar modelos utilizando un gemelo digital, lo que permite la adaptación a trayectos desconocidos con mayor eficiencia y menor tiempo.

Este enfoque permite a los oficiales militares planificar misiones de manera proactiva, asegurando la preparación de los vehículos y minimizando el tiempo de inactividad. Los resultados experimentales obtenidos con este estudio sugieren mejoras prometedoras en la precisión y eficiencia del mantenimiento prescriptivo. Uno de los principales desafíos abordados, en este caso de uso, es la falta de datos reales suficientemente etiquetados, lo que se ha mitigado utilizando datos sintéticos.

El caso de uso se centra en vehículos pesados, poniendo el foco en parámetros clave de componentes críticos del vehículo, tales como el nivel de combustible o los que afectan al rendimiento del motor. Los datos de los sensores de los vehículos militares han sido proporcionados por la DIMALE. Esta investigación contribuye al campo de la IA en aplicaciones de seguridad y defensa al ofrecer una solución escalable, adaptable y rentable para el mantenimiento y operación de vehículos militares.

Desarrollo de un entorno HWIL para la emulación del sistema pitot-estático en helicópteros (DESEi+d, 2025: 118)

F. Pablo Alonso (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), Irene Velasco (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), Manuel A. Carmona (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) y Rodrigo Castellanos (Universidad Carlos III de Madrid).

La técnica *hardware*-in-the-loop (HWIL) se ha consolidado como un método de simulación que ejerce una función esencial en la fase de validación de avanzados sistemas de control de vuelo, mediante la integración de componentes físicos con entornos simulados, mejorando la precisión y flexibilidad de la fase de ensayos. El estudio realizado se enmarca dentro de un proyecto más amplio orientado al desarrollo de un laboratorio HWIL para la simulación y verificación de los efectos que ejercen las cargas de pago desprendibles o eyectables, integradas en aeronaves de ala rotatoria, sobre la estabilidad y el control de la plataforma aérea. Específicamente, el presente estudio se centra en el diseño de un entorno HWIL destinado a la emulación de un sistema pitot-estático para helicópteros no tripulados, reemplazando las presiones simuladas en el modelo computacional del helicóptero por presiones físicas, con el fin de obtener mediciones atmosféricas precisas que sirvan como entrada al sistema de control de vuelo. Los datos de presión estática y dinámica empleados en el emulador del sistema pitot-estático se generan mediante un modelo

de simulación de la dinámica del helicóptero implementado en Matlab/Simulink. Estos datos son transmitidos a un Air Data Test Set (ADTS), el cual reproduce las condiciones de presión experimentadas por la aeronave y las entrega, a través de sus puertos estático y dinámico, al sistema de control de vuelo. De este modo, se reduce la brecha entre el entorno simulado y la aplicación real. Esta configuración permite una representación realista de las condiciones atmosféricas en un entorno controlado que garantiza una alta reproducibilidad y precisión en las pruebas del sistema avanzado de control. El objetivo final del estudio se enfocará en la implementación del entorno de simulación en tiempo real, con el fin de mejorar su precisión y eficacia aumentando, así, la capacidad de prueba de sistemas avanzados de control y optimizando el proceso de desarrollo y armado de helicópteros no tripulados.

Generación de escenarios para simulación de emergencias a partir de datos públicos (DESEi+d, 2025: 139)

Sergio Sánchez de la Fuente (Grupo de Robótica Universidad de León), Luis Prieto López (Grupo de Robótica Universidad de León), Miguel Ángel González Santamarta (Grupo de Robótica Universidad de León), Abel Carnicero Mayo (Grupo de Robótica Universidad de León), Vicente Matellán Olivera (Grupo de Robótica Universidad de León), Lidia Sánchez González (Grupo de Robótica Universidad de León), Francisco Javier Rodríguez Lera (Grupo de Robótica Universidad de León) y Ángel Manuel Guerrero Higueras (Grupo de Robótica Universidad de León).

La generación automatizada de escenarios realistas para simulación es un componente clave en campos como la realidad virtual, la robótica, la gestión y simulación de riesgos y la planificación urbana. La creación manual de estos escenarios requiere en la mayoría de los casos una gran cantidad de recursos, esfuerzo, tiempo y personal, lo que limita la escalabilidad de la creación de los escenarios y su aplicabilidad en contextos dinámicos o de gran tamaño. Este trabajo presentará un prototipo de herramienta semiautomatizada que permite construir escenarios virtuales a partir de datos públicos. Este prototipo se ha desarrollado en colaboración con ISDEFE y la Unidad Militar de Emergencias. La solución propuesta permite, mediante una interfaz gráfica que presenta un mapa 2D del mundo con etiquetas, seleccionar una zona del terreno, de la cual se extrae

información geoespacial que refleja la estructura, características, distribución y texturas del entorno real. Tras eso, los datos son procesados en varias etapas, convirtiendo el formato en uno adecuado para la simulación, optimizando la geometría del terreno y suavizando los bordes para lograr una transición entre mallas suaves para su uso en un entorno simulado. El resultado que produce la solución es un modelo listo para integrarse en las herramientas de simulación. Una de las principales ventajas de esta propuesta es la capacidad de generación de entornos a gran escala con un alto nivel de detalle y minimizando la intervención manual. Además, al estar basado en datos públicos, el sistema es accesible y adaptable a multitud de regiones y contextos. Este tipo de herramientas abarata y acorta el proceso de creación de los entornos tridimensionales para herramientas de simulación, por lo que en el futuro podrá utilizarse para la simulación de diferentes escenarios en situaciones de emergencia, no solo para entrenamiento, sino como ayuda en los procesos de toma de decisiones, contribuyendo a una mejor preparación y respuesta ante situaciones reales.

Navegación autónoma en terrenos complejos (DESEi+d, 2025: 142)

Luis Prieto López (Grupo de Robótica Universidad de León), Sergio Sánchez de la Fuente (Grupo de Robótica Universidad de León), Miguel Ángel González Santamarta (Grupo de Robótica Universidad de León), Abel Carnicero Mayo (Grupo de Robótica Universidad de León), Vicente Matellán Olivera (Grupo de Robótica Universidad de León), Francisco Javier Rodríguez Lera (Grupo de Robótica Universidad de León) y Ángel Manuel Guerrero Higueras (Grupo de Robótica Universidad de León).

La navegación autónoma eficiente en terrenos irregulares y complejos es un componente clave para el desarrollo de plataformas robóticas capaces de operar en entornos inexplorados o de difícil acceso. Este trabajo presenta una solución integral de navegación autónoma basada en ROS (Robot Operating System), que integra tecnologías y algoritmos avanzados para la localización y planificación de trayectorias en condiciones exigentes, como las que enfrentan los AGVs militares. El sistema propuesto emplea una combinación de sensores, incluyendo LiDAR, IMU, odometría y GPS, junto con técnicas de fusión de sensores para proporcionar una localización precisa y robusta. La arquitectura integra RTAB-Map para realizar la localización lo que permite la navegación autónoma incluso en entornos sin cobertura GPS o con señales degradadas. Los datos provenientes del LiDAR son fundamentales para la detección de obstáculos y la construcción de mapas 3D en tiempo real, facilitando la adaptación del robot a una topografía cambiante y a obstáculos inesperados. La IMU y

los datos de odometría proporcionan estimaciones continuas de la pose del robot, lo cual asegura estabilidad incluso en terrenos irregulares. La fusión de datos se implementa mediante un enfoque basado en el filtro de Kalman extendido dual, que separa la dinámica interna del robot de las observaciones externas, mejorando la precisión de la estimación de pose. Esta técnica reduce el ruido y corrige errores acumulativos, aportando mayor robustez y fiabilidad al sistema de navegación. La navegación se basa en el algoritmo de ventana dinámica (DWB). La lógica de alto nivel se gestiona con árboles de comportamiento (*Behavior Trees*), que coordinan la planificación de rutas, la validación de objetivos y la recuperación ante fallos en tiempo real. La generación de trayectorias se realiza mediante una combinación de planificación híbrida y optimización de caminos, garantizando rutas suaves y viables. Un controlador cinemático ajusta dinámicamente las velocidades, asegurando un seguimiento preciso y fluido de las trayectorias, incluso en respuesta a cambios imprevistos en el entorno. El sistema utiliza *costmaps* multiescala, enriquecidos con información tridimensional sobre obstáculos y zonas de seguridad, lo que mejora la percepción del entorno. Además, incorpora estrategias de recuperación automática, que permiten actualizar de forma dinámica la representación del entorno ejecutar reintentos controlados ante fallos, lo que aumenta la tolerancia a escenarios no estructurados y condiciones imprevistas.

Diseño de un casco hidrodinámico para vehículo submarino autónomo modular en las Fuerzas Armadas (DESEi+d, 2025: 158)

Rafael Viniegra de la Fuente (Centro Universitario de la Defensa en la ENM, Plaza de España s/n, 36920, Marín, Pontevedra), Carlos Pérez Collazo (Centro Universitario de la Defensa en la ENM, Plaza de España s/n, 36920, Marín, Pontevedra), Ivan Iglesias Sánchez (Centro Universitario de la Defensa en la ENM, Plaza de España s/n, 36920, Marín, Pontevedra), Yogang Shing (Departments in Engineering y Mathematics, Sheffield Hallan University, Sheffield, Reino Unido) y Araceli Regueiro Prereira (Centro Universitario de la Defensa en la ENM, Plaza de España s/n, 36920, Marín, Pontevedra).

El empleo de vehículos submarinos no tripulados ha adquirido un papel clave en misiones científicas y militares, con impacto significativo en la exploración del medio marino. El Centro Universitario de la Defensa (CUD) está desarrollando un dron submarino modular, destinado a realizar labores académicas en aguas someras. El diseño hidrodinámico del casco se considera clave, dado que debe cumplir requisitos de modularidad y resistencia estructural para garantizar la operatividad y eficiencia en condiciones de uso. El trabajo describe una breve evolución histórica sobre el desarrollo de submarinos hasta llegar a los actuales Autonomous Underwater Vehicles (AUV), como base para definir los principales condicionantes en el bocetado del casco. Considerando la modularidad de las secciones de proa, cuerpo y popa del dron, criterios hidrodinámicos de

estudios previos y la integración de perfiles NACA en superficies de sustentación, se realizaron simulaciones mediante *software* CFD para validar el comportamiento hidrodinámico del casco, mostrando las bondades y desventajas que un diseño optimizado presenta frente a soluciones más rudimentarias preliminares de bajo costes de fabricación. La solución obtenida propone la unión modular del casco mediante abrazaderas, optimizado su geometría mediante FEM. Los resultados obtenidos muestran una mejora significativa en la eficiencia hidrodinámica del casco optimizado frente al diseño preliminar. En términos cuantitativos, la resistencia al avance y la distribución de presiones sobre la estructura se redujeron considerablemente, mejorando la navegabilidad del dron en condiciones de uso estimadas. Destaca, también, la optimización de la geometría de la envolvente y la integración de aletas con perfiles NACA, lo que produce una estela más controlada y una menor pérdida energética.

Interacción humano-robot y formación en el ámbito militar: una revisión de los avances y retos actuales (DESEi+d, 2025: 165)

Juan Alberto García Esteban (Universidad de Salamanca), Miguel Ángel Conde González (Universidad de Salamanca), Belen Curto Diego (Universidad de Salamanca) y Vidal Moreno Rodilla (Universidad de Salamanca).

La incorporación de robots en operaciones militares ha ganado relevancia, en especial con los vehículos terrestres no tripulados (UGVs), vehículos aéreos no tripulados (UAVs) y vehículos autónomos navales (UUVs). Estos sistemas son clave en misiones de reconocimiento en entornos hostiles, desactivación de explosivos, búsqueda y rescate de personas o apoyo logístico, proporcionando ventajas en la preservación de vidas humanas, costos y tiempos de respuesta. El guiado de estos vehículos puede ser teleoperado o supervisado mediante caminos generados con algoritmos de inteligencia artificial (IA). Sin embargo, su éxito depende principalmente de la interacción humano-robot (HRI), fundamental para optimizar la colaboración en el ámbito militar.

El entrenamiento de los operadores en el uso de estos robots es esencial para su integración efectiva. Se emplea un enfoque mixto que combina simulación y robots reales. Los simuladores avanzados permiten entrenar a los operadores en un entorno seguro, facilitando la repetición y la práctica de procedimientos sin los riesgos asociados al uso de vehículos reales. No obstante, los operadores deben familiarizarse con robots

reales para comprender sus capacidades y limitaciones físicas, buscando un equilibrio entre simulación y entrenamiento práctico para mejorar la coordinación en condiciones reales.

La HRI es clave en este proceso. La efectividad de la colaboración depende no solo de los avances tecnológicos, sino también de la confianza, la carga cognitiva y la usabilidad de las interfaces. Los avances tecnológicos en IA permiten que los robots realicen tareas más complejas, como la toma de decisiones autónoma o la colaboración en misiones. Sin embargo, para lograr una coordinación efectiva, es crucial desarrollar interfaces intuitivas que reduzcan la carga cognitiva del operador. El objetivo es crear un entorno donde los humanos puedan supervisar y colaborar eficientemente con los robots, incluso en escenarios complejos.

La tendencia actual se orienta hacia el trabajo en equipo humano-robot, donde los robots no solo ejecutan órdenes, sino que también participan en la toma de decisiones tácticas. Este enfoque requiere equilibrar la autonomía del robot con la intervención humana, lo cual fomenta la confianza necesaria para que los operadores deleguen tareas y supervisen las acciones del robot en misiones críticas.

Aunque se han logrado avances significativos en la integración de robots en el ámbito militar, los desafíos en HRI, la formación de operadores y la mejora tecnológica siguen siendo áreas clave para optimizar la colaboración y el rendimiento de estos sistemas, junto con aspectos legales y éticos.

Diseño de la cadena de transmisión de una antena activa matricial en la banda K (DESEi+d, 2025: 190)

Uxua Esteban-Eraso (Grupo de Diseño Electrónico, Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón I3A, Universidad de Zaragoza), Josué Buil (Universidad de Zaragoza), Francisco José Torcal-Milla (Grupo de Tecnologías Ópticas Láser, Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón I3A, Universidad de Zaragoza) y Carlos Sánchez-Azqueta (Grupo de Diseño Electrónico, Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón I3A, Universidad de Zaragoza).

Las antenas activas matriciales son fundamentales para la nueva generación de sistemas de comunicaciones inalámbricas 5G/6G y satelitales (SATCOM), ya que permiten trabajar con múltiples haces de forma simultánea y dirigir el patrón electrónicamente sin utilizar motores eléctricos o componentes móviles, lo que permite tiempos de reorientación de microsegundos con un consumo de energía reducido y un mejor rendimiento general en comparación con las alternativas mecánicas.

Las antenas activas matriciales pueden operar de forma analógica, digital o híbrida. Las arquitecturas híbridas dividen la matriz en varias submatrices en las que las señales se procesan de forma analógica para combinarse posteriormente en el dominio digital, lo cual es ventajoso porque no se necesita una cadena de receptor completa para cada antena y el diseño se simplifica. En el transmisor de un transceptor de antena activa matricial

híbrida, las señales que alimentan los elementos de la antena experimentan un desplazamiento de su fase y, a continuación, una amplificación en potencia para formar el patrón de radiación deseado.

Este trabajo se centra en el diseño combinado y la simulación eléctrica de una trayectoria de transmisor dentro de una matriz activa, que opera en la banda K, específicamente a 19,5 GHz. El sistema incorpora un desplazador de fase compacto, basado en un generador de señal de cuadratura, y un amplificador de potencia, que utiliza una arquitectura de cascodo extendida. El diseño y las pruebas de este sistema se han llevado a cabo utilizando un proceso CMOS MM/RF de 65 nm, una tecnología que ofrece un equilibrio favorable entre rendimiento y costo para aplicaciones de alta frecuencia.

A la frecuencia deseada de 19,5 GHz, el desplazador de fase propuesto logra un error de magnitud nulo y un error de cuadratura inferior a 1.1˚. Además, presenta una operación controlada digitalmente de 5 bits que permite obtener desplazamientos de fase de 0˚ a 360˚ con una resolución de 11.25˚ y un error de fase RMS inferior a 3˚, todo con un consumo de energía eléctrica inferior a 10 mW. A su vez, el amplificador de potencia diseñado logra una ganancia de 13 dB para una potencia de salida superior a 15 dBm en una carga de 50 Ω, lo cual mantiene las propiedades de fase de la señal que emerge del desplazador de fase.

Estos resultados validan la viabilidad y el potencial de alto rendimiento de la arquitectura propuesta para aplicaciones de comunicación inalámbrica 5G/6G y SATCOM de próxima generación.

Análisis comparativo mediante simulación de sistemas de fondeo para plataformas solares flotantes en aguas someras (DESEi+d, 2025: 211)

Ana Pacheco Jiménez (Universidad de Cantabria.), Beatriz García García (Universidad de Cantabria) y Ernesto Madariaga Domínguez (Armada, RV).

Las plataformas solares flotantes en aguas someras representan una frontera emergente en la transición energética, al conjugar innovación tecnológica sostenible en los entornos acuáticos costeros. Sin embargo, su diseño conlleva desafíos estructurales clave, especialmente en lo relativo al sistema de fondeo, que es esencial para garantizar la estabilidad y funcionalidad de la instalación frente a condiciones metoceánicas complejas. Esta investigación, desarrollada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria), analiza el comportamiento de una plataforma solar flotante ubicada en el entorno portuario de la bahía de Santander. Se comparan diversas configuraciones de líneas de fondeo bajo condiciones representativas de viento y de corrientes propias de este entorno. Los datos batimétricos, de detalle, se obtienen de la Infraestructura de Datos Espaciales del Instituto Hidrográfico de la Marina (Armada). Se han evaluado distintas tipologías de sistemas de fondeo variando su configuración estructural y los materiales. A través de simulaciones hidrostáticas en ANSYS AQWA, se

han modelado las condiciones metoceánicas características en la bahía de Santander, con el objetivo de caracterizar el comportamiento estático de la plataforma. El análisis se centra en parámetros clave como los desplazamientos horizontales y verticales, la distribución de esfuerzos en las líneas de fondeo y la respuesta estructural de la plataforma frente a cargas ambientales. Esta evaluación comparativa permite identificar con precisión las ventajas y limitaciones de cada diseño en función de la batimetría, las condiciones locales y los objetivos específicos de estabilidad, ofreciendo criterios técnicos extrapolables a contextos similares. Este estudio proporciona una base técnica sólida para la selección óptima de configuraciones de fondeo en plataformas, solares flotantes, en aguas poco profundas. Sus resultados son directamente aplicables a proyectos en zonas costeras o portuarias de baja exposición, y contribuyen al desarrollo de soluciones replicables a escala global.

Automatización y simulación avanzada de escenarios GNSS para evaluación de interferencias (DESEi+d, 2025: 262)

Jesús Fernández Aparicio Ortega (Safran Electronics and Defense, España), Eduardo Ros Vidal (Safran Electronics and Defense, España), Carlos Frías Heras (Safran Electronics and Defense, España) y Pablo Marín Jiménez (Safran Electronics and Defense, España).

El presente trabajo presenta un enfoque integral para la generación automatizada de escenarios de interferencia en sistemas GNSS, orientado a evaluar la robustez de los receptores ante ataques de *jamming* y *spoofing*. Utilizando la plataforma Skydel, se ha desarrollado una solución capaz de ejecutar procesos automatizados que configuran parámetros críticos —como potencia de transmisión, desfase en la señal y retrasos temporales— para reproducir condiciones adversas, tanto en escenarios básicos como en contextos avanzados de guerra electrónica.

Esta propuesta no se limita a simular ataques puntuales; además, posibilita la generación de escenarios complejos donde intervienen simultáneamente diversas técnicas de interferencia. En este sentido, se incorporan y adaptan estándares reconocidos en la comunidad GNSS, como TEXBAT y STRIKE3, que sirven de referencia para la autenticación y resistencia ante ataques.

TEXBAT (*Texas Spoofing Test Battery*) es un conjunto de escenarios de *spoofing*. Este estándar fue concebido inicialmente para evaluar la capacidad de los receptores de GPS civiles de detectar cambios en la sincronización de tiempo y posición mediante técnicas como el *time-push* y el *Secure Code Estimation and Replay* (SCER). Su objetivo es establecer un marco de prueba para certificar la resistencia ante la inyección de señales falsas. Por otro lado, STRIKE3 es una iniciativa europea destinada a estandarizar el reporte de amenazas e identificar los parámetros críticos en la detección y clasificación de interferencias donde se establecen criterios de evaluación para probar y certificar la robustez de los receptores GNSS.

Mediante la integración de estos estándares en la plataforma Skydel, la solución automatizada permite no solo replicar los escenarios definidos por TEXBAT y STRIKE3, sino también extenderlos a situaciones más avanzadas, combinando múltiples formas de ataque, como ataques asíncronos y *meaconing*. La capacidad de modificar parámetros en tiempo real y de reproducir escenarios controlados facilita, además, la validación de técnicas de detección y mitigación asistidas por inteligencia artificial y *machine learning*.

Desarrollo integral de sistemas de control y guiado para UAVs basados en control predictivo: una aproximación multiplataforma desde la simulación hasta el vuelo autónomo (DESEi+d, 2025: 275)

Manuel Antonio Gallardo Navarro (Escuela Politécnica Superior del Ejército) y Juan Bautista Ruiz-Yherla García (Escuela Politécnica Superior del Ejército).

El auge de los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) ha impulsado una revolución tecnológica en el ámbito del control automático, donde la autonomía, la precisión y la seguridad se han convertido en pilares fundamentales para su desarrollo. Este trabajo presenta una propuesta sólida e innovadora basada en estrategias avanzadas de control predictivo (*Model Predictive Control*, MPC), orientadas a resolver uno de los retos clave en el vuelo autónomo: el control de actitud y guiado eficiente de aeronaves no tripuladas.

El enfoque parte de la formulación de un modelo dinámico no lineal de aeronave de seis grados de libertad, el cual es simplificado mediante hipótesis realistas para permitir su aplicación en entornos de tiempo real. Se diseñan controladores predictivos tanto para la dinámica longitudinal (velocidad, ángulo de trayectoria y cabeceo) como para la

lateral-direccional (ángulo de balance, guiñada y velocidad transversal). Estos controladores son capaces de anticipar el comportamiento del sistema y tomar decisiones óptimas bajo restricciones dinámicas y físicas, como saturaciones en los actuadores o límites en las variables de estado.

Se incluyen también mecanismos de corrección en régimen permanente y, a su vez, estimadores de perturbaciones para mejorar la respuesta ante condiciones no ideales. Además, se analiza la factibilidad de implementación mediante control predictivo explícito, lo cual permite reducir los tiempos de cómputo al resolver previamente el problema de optimización, lo que facilita su uso en sistemas embebidos.

Mediante un entorno de simulación avanzado, desarrollado en MATLAB/Simulink, se llevan a cabo diversas pruebas virtuales en condiciones variables, evaluando la estabilidad, precisión y capacidad de recuperación del sistema frente a perturbaciones. También se comparan los resultados obtenidos con los de otros métodos clásicos, como PID o control por asignación de polos, evidenciando la superioridad del MPC en cuanto a adaptabilidad y robustez.

En conjunto, se ofrece el análisis y diseño de algoritmos de control mediante una visión integral y modular del diseño de sistemas inteligentes para UAVs. Esto contribuye a establecer una base sólida para futuros desarrollos en este sector. Además, representa una aproximación práctica y con proyección real, clave para afrontar los desafíos del vuelo autónomo en un mundo donde los UAVs son cada vez más protagonistas.

Simulación inmersiva de adiestramiento táctico para Infantería de Marina mediante realidad virtual (DESEi+d, 2025: 268)

Xavier Núñez Nieto (CUD/ENM), Francisco Troncoso Pastoriza (CUD/ENM), Iván Puente Luna (CUD/ENM) y Miguel Rodelgo Lacruz (CUD/ENM).

La irrupción de la Industria 4.0 ha provocado una transformación profunda en múltiples sectores, incluyendo el ámbito de la defensa. Esta nueva era digital ha facilitado la incorporación de tecnologías disruptivas en los procesos de formación y adiestramiento de las Fuerzas Armadas (FAS). En este contexto se enmarca el presente trabajo, que se corresponde con el desarrollo del proyecto de investigación militar denominado TACLAB360 y desarrollado en el Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar (CUD/ENM). Dicho proyecto, propone una solución innovadora basada en simulación de tipo inmersivo, para el entrenamiento táctico de combate de Infantería de Marina, con especial énfasis en la integración de herramientas propias de la Industria 4.0. El objetivo principal es la creación de un laboratorio de combate virtual, modelado en 3D de forma hiperrealista, que sirva como plataforma de entrenamiento táctico en un entorno esférico de 360º. Para ello, se emplean tecnologías de diseño asistido por ordenador para la recreación precisa del entorno, complementadas por simulación fotorrealista y realidad virtual, con el fin de lograr una experiencia completamente inmersiva para el usuario. La simulación no solo representa escenarios realistas, sino que también

incorpora elementos dinámicos y autónomos mediante el uso de inteligencia artificial. Estos elementos son programados para replicar con fidelidad las reglas de ataque (ROA), aportando un componente táctico y estratégico al entrenamiento. Este enfoque multidisciplinar combina la realidad virtual y la inteligencia artificial, en consonancia con los principios de la Industria 4.0. El resultado final pretende ser una herramienta avanzada, flexible y adaptativa que optimice los procesos de adiestramiento militar, potenciando las capacidades operativas de los profesionales de los Ejércitos de Tierra, Mar y Aire. En este trabajo se presentan los resultados preliminares del proyecto, que pretende consolidar la presencia de la simulación virtual como elemento esencial en la preparación táctica de las FAS españolas, ofreciendo nuevas perspectivas de desarrollo tecnológico en el ámbito de la defensa.

Hacia la redefinición del segundo: desarrollo de un reloj atómico óptico en el ROA (DESEi+d, 2025: 289)

Jesús Romero González (Real Instituto y Observatorio de la Armada-ROA), Antonio Estarellas Perales (Real Instituto y Observatorio de la Armada-ROA), Ignacio Cortés Delgado (Real Instituto y Observatorio de la Armada-ROA) y Hector Álvarez Martínez (Real Instituto y Observatorio de la Armada-ROA).

En el marco del proyecto CIROEs (Construcción e Implementación de un Reloj de red Óptica de Estroncio), el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) —organismo oficial encargado de la materialización y mantenimiento del Tiempo Legal en España— desarrolla actividades orientadas al estudio y diseño de tecnologías para la construcción de un reloj atómico óptico de nueva generación. Actualmente, la definición del segundo en el Sistema Internacional de Unidades (SI) se basa en 9 192 631 770 oscilaciones de la radiación de microondas correspondiente a la transición hiperfina del estado fundamental del átomo de cesio-133. Sin embargo, los relojes atómicos basados en frecuencias ópticas, en particular la transición electrónica $1\ S\ 0 \rightarrow 3\ P\ 0$, han alcanzado exactitudes de hasta dieciocho cifras significativas, y se posicionan como los instrumentos de medida más exactos jamás construidos y como firmes candidatos a redefinir el segundo SI en un futuro próximo. En este contexto, el laboratorio de óptica del ROA está desarrollando un reloj óptico

basado en átomos neutros de estroncio (Sr). Para ello se estudian y simulan estrategias de carga atómica eficientes, fundamentales para mejorar la estabilidad final del reloj al interrogar un mayor número de átomos. Se presentan generalidades del reloj y un novedoso proceso de enfriamiento de átomos. Este sistema de enfriamiento emplea el efecto Zeeman y el enfriamiento láser Doppler para desacelerar longitudinalmente átomos de Sr emitidos desde un horno. Asimismo, se implementa una trampa magneto- óptica bidimensional (2D-MOT) transversal durante el proceso de enfriamiento longitudinal. Este diseño permite situar la 2D-MOT muy cerca de la salida del horno, reduciendo de forma significativa las pérdidas de átomos causadas por la dispersión del flujo atómico. Un aspecto clave de este sistema es que tanto el campo magnético necesario para la desaceleración longitudinal como el gradiente requerido para la MOT son generados por el mismo conjunto de imanes permanentes, que no necesitan corriente eléctrica ni generan radiación de cuerpo negro. Este trabajo forma parte del desarrollo del primer reloj atómico óptico de este tipo en España, marcando un hito en la metrología nacional y contribuyendo significativamente al avance de la ciencia del tiempo a nivel internacional.

Visualización de datos AIS en tiempo real mediante realidad aumentada (DESEi+d, 2025: 301)

Miguel Rodelgo Lacruz (Centro Universitario de la Defensa, Marín), Xavier Núñez Nieto (Centro Universitario de la Defensa, Marín), Francisco Troncoso Pastoriza (Centro Universitario de la Defensa, Marín), Iván Puente Luna (Centro Universitario de la Defensa, Marín) y Pablo Díaz García (Armada española).

En este trabajo se ha desarrollado una aplicación de realidad aumentada (*Augmented Reality*, AR) para dispositivos Android con el propósito de explorar las posibilidades de esta tecnología en la representación de datos del sistema AIS (*Automatic Identification System*) recibidos en tiempo real. La arquitectura propuesta integra una antena VHF conectada a un receptor SDR (*Software Defined Radio*) para capturar datos AIS en formato NMEA, que se transmiten mediante UDP hacia una aplicación móvil desarrollada con Unity encargada de decodificarlos y convertirlos en objetos virtuales posicionados mediante tecnologías geoespaciales. La aplicación utiliza Google ARCore para gestionar la interacción entre los objetos virtuales y el entorno físico. La aplicación proporciona una alternativa visual innovadora para representar información relevante sobre las embarcaciones cercanas, como posición, velocidad, rumbo e identificación, utilizando elementos gráficos integrados al entorno físico real. Los resultados obtenidos permiten evaluar el impacto que tienen las

limitaciones en los sistemas de posicionamiento y orientación sobre la precisión y utilidad de las aplicaciones basadas en realidad aumentada en este entorno y, además, de qué manera la AR puede complementar los sistemas tradicionales para la monitorización marítima. Este estudio sienta las bases para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas, tanto en ámbitos civiles como militares, explorando cómo la realidad aumentada puede apoyar la seguridad marítima y la toma de decisiones operativas en diferentes condiciones.

NME-DEFCON. Modelo neuroeconómico conductual para la anticipación de guerras psicológicas económicas encubiertas. Propuesta estratégica para la defensa cognitiva nacional (DESEi+d, 2025: 53)

Óscar de los Reyes Marín (URJC).

El presente estudio desarrolla y valida el sistema NME-DEFCON, una arquitectura cognitiva, financiera y narrativa orientada a la detección anticipada de crisis económicas inducidas por sesgos colectivos y manipulación emocional encubierta. Este modelo representa una extensión práctica, empírica y estratégica de una tesis doctoral en finanzas conductuales y neuroeconomía aplicada, centrada originalmente en la microempresa, pero proyectada ahora como infraestructura de defensa nacional cognitiva. El modelo integra seis pilares teóricos: neuroeconomía, economía conductual, teoría de juegos conductual, psicología estratégica, programación neurolingüística (PNL) y modelos propios desarrollados por el autor. Entre estos destacan los índices PEL (percepción errónea de liquidez), ICEL (confianza errónea en la liquidez) e IEI (índice de expansión irracional), así como el modelo ECPF (equilibrio conductual de pánico financiero). El sistema NME-DEFCON ha sido implementado en una aplicación funcional construida en React + Tailwind, con módulos de

análisis de datos, detección de sesgos, simulación de escenarios estratégicos, *nudges* restauradores y alertas de riesgo cognitivo-financiero. Esta aplicación permite cargar datos contables empresariales, calcular automáticamente los índices mencionados y exportar informes visuales, con capacidad predictiva ≥ 15 días. La validación empírica se ha realizado sobre una base de más de 100 000 empresas españolas entre 2000 y 2024. Se aplicaron regresiones logísticas, *clustering* no supervisado (*K-means*) y análisis longitudinal de series temporales. Los resultados confirman que los sesgos colectivos, amplificados por narrativas hostiles o disruptivas, pueden anticiparse, modelarse y neutralizarse con herramientas conductuales. Se documentan además campañas narrativas recientes (Trump, inflación pospandemia, colapsos bancarios) que ilustran la aplicabilidad real del sistema. Por último, se propone la conexión estructural del sistema NME con *software* contable y gestorías, replicando el modelo de la AEAT con VeriFactu, para crear una red nacional de vigilancia emocional, narrativa y financiera. El sistema permitiría a España convertirse en el primer país del mundo con una infraestructura operativa de soberanía cognitiva frente a guerras psicológicas económicas.

Toma de decisiones de sostenimiento utilizando IA generativa (DESEi+d, 2025: 67)

José Antonio Pagan (Navantia), Andrea Belen Arregui Arias (Navantia), Manuel Paredes Algarra (Navantia), Jesús Molina Toledo (COEX Smart Services, Navantia SA SME) y Miguel Méndez Macias (COEX Smart Services, Navantia SA SME).

En los últimos años la inteligencia artificial (IA) generativa está transformando la mayoría de los sectores industriales siendo motor de impulso de la nueva revolución industrial. Es por esta razón que Navantia ha desarrollado una prueba de concepto que implementa la IA generativa para la búsqueda activa de información y apoyo a la toma de decisiones de sostenimiento en un entorno aislado utilizando datos de funcionamiento, modelos de simulación de comportamiento, sistema predictivo, bases de datos y documentación real de sistemas navales. El proyecto se ha desarrollado en dos fases. En la primera, el resultado es un asistente capaz de responder a preguntas técnicas genéricas de forma natural, así como incidencias particulares sobre el sistema. El motor de IA se conecta a documentación del sistema y de mantenimiento, así como a un modelo de simulación de comportamiento que proporciona la respuesta «normal» del sistema. En la segunda, el sistema se conecta además a la estructura de configuración logística y a un sistema de mantenimiento predictivo basado en modelos híbridos, por lo que es capaz de detectar, diagnosticar y facilitar recomendaciones de mantenimiento haciendo uso de la

IA generativa gracias a la combinación de ambos sistemas. La prueba de concepto se ha desarrollado sobre sistemas de protección contra incendios y sistema de propulsión. La detección y recomendación del asistente se produce de forma automática, no obstante, es posible realizar consultas técnicas de forma manual por parte del usuario a través de un *chat bot*, así como realimentar el sistema con base en consultas anteriores. El resultado es satisfactorio, siendo un paso significativo para poder disponer de un futuro asistente a toma de decisiones que aumente la calidad en la mar, la seguridad y disponibilidad, y que reduzca costes de sostenimiento.

STORE, la plataforma europea para el desarrollo colaborativo de IA militar para la defensa del futuro (DESEi+d, 2025: 83)

Javier Sanz Albert (División Programas ISR-GMV Aerospace and Defence).

STORE, proyecto EDF colaborativo formado por veintiún socios de nueve países, representados por empresas, institutos de investigación y universidades, donde GMV tiene un papel clave. Ante la aparición de nuevas amenazas y su constante evolución —como misiles hipersónicos, drones de combate y enjambres de drones—, los sensores optrónicos adquieren una relevancia sin precedentes para las fuerzas de combate, exigiendo niveles excepcionales de rendimiento. Este es precisamente el reto que aborda el proyecto STORE, impulsado por el Fondo Europeo de Defensa (EDF): construir una base de datos compartida, sostenible y escalable que dé respuesta a la evolución de las amenazas en diversos entornos terrestres, y desarrollar capacidades de reconocimiento de imágenes mediante inteligencia artificial (IA) de altas prestaciones. Gracias a la combinación de optrónica e inteligencia artificial, el combatiente se beneficiará de una asistencia valiosa para la percepción de su entorno. Estas soluciones inteligentes y seguras contribuirán a mejorar la conciencia situacional táctica, acortar los procesos de toma de decisiones, acelerar la capacidad de reacción. En este contexto, como parte de las actividades, GMV lidera el desarrollo de una innovadora base de datos distribuida europea unificada que garantice el acceso seguro a datos restringidos. Esta infraestructura,

conocida como Database Framework (DBF), constituye la piedra angular para el almacenamiento, la gestión y el intercambio de grandes volúmenes de imágenes —tanto en bruto como anotados— y módulos de IA. Su diseño se basa en principios de interoperabilidad, escalabilidad y extensibilidad, ajustándose a estándares europeos. La versión inicial del DBF ya está en fase de pruebas y ha sido implementada por diferentes organizaciones (GMV entre ellas), con base en una especificación bien definida, lo cual demuestra su adaptabilidad mediante múltiples tecnologías. Incorpora herramientas específicas para la consulta, publicación y descarga de datos, e integra de forma nativa la integración con AI *Software* Factory, permitiendo a los equipos de IA entrenar y validar (*benchmark*) modelos IA directamente sobre esta base de datos. La gestión y compartición de datos clasificados a nivel europeo (EU-R) es también uno de los objetivos a abordar en esta base de datos compartida, reforzando la seguridad y el cumplimiento normativo. En definitiva, el DBF proporciona una solución robusta para la colaboración europea en defensa, garantizando el acceso seguro a información crítica y facilitando el desarrollo y mejora de capacidades avanzadas de IA con impacto directo en la eficacia y resiliencia operativa en escenarios complejos.

Aplicación para desarrollo y gestión de planes de estudios de la defensa (DESEi+d, 2025: 95)

Pedro Azorín Montesinos (Armada, Escuela Naval Militar, Marín), Erick Giovanni González Herrera (PUMPÚN DIXITAL S. L.) y Alexia Ares Chang (PUMPÚN DIXITAL S. L.).

El Ministerio de Defensa cuenta en su estructura con una dirección dedicada a enseñanza, que heredan los Ejércitos. Esto, sumado al elevado número de cursos, son un signo de la gran importancia que tiene para el Ministerio de Defensa la educación. La base para conseguir una enseñanza eficiente pasa por el correcto diseño curricular de los planes de estudios. En este sentido la normativa es extensa, además de ser un trabajo llevado a cabo por diferentes oficinas. Por último, el Ministerio de Defensa tiene diversos proyectos, así como cursos de formación, para lograr una transformación digital completa. En esta línea se encuentra las aplicaciones CloudMinerva y Galatea para gestión de centros docentes, alumnado y notas. Dado lo anterior, se ha identificado la necesidad de contar con una aplicación para la elaboración de planes de estudios del Ministerio de Defensa, donde además se trabaje de forma colaborativa. La aplicación que se propone comenzaría por ser un repositorio de normativa necesaria, de forma que esta se integre en los diferentes puntos del desarrollo curricular. Una vez detectada la necesidad de un plan de estudios, y basándonos en el aprendizaje por competencias, el proceso comenzaría con la

determinación de las competencias o necesidades del puesto del trabajo correspondiente a dicho plan de estudios. Estas competencias se pueden trabajar en competencias desagregadas o unidades de competencias que dan lugar a los diferentes módulos formativos, contemplados en la normativa para la elaboración de currículos de enseñanza. Las competencias generales a los ejércitos, específicas del cuerpo o técnicas de la especialidad darán lugar al pilar del plan de estudios, los resultados de aprendizaje La determinación de resultados de aprendizaje es el punto de inflexión para el desarrollo de los planes de estudios, dando lugar a los contenidos y las evaluaciones. El proceso incluirá una herramienta de programación y planificación temporal centrada en la gestión activa de talento, tanto para profesores como para alumnos. Con la elaboración de la normativa correspondiente para su aprobación y publicación concluye el proceso. Se propone que la aplicación sea la encargada de elaborar la documentación según la normativa y de esta forma conseguir un formato unificado que no se observa actualmente. Como valor añadido, la aplicación podría conectará con CloudMinerva, Galatea y SIPERDEF (o exportación de formatos admitidos en caso de requerimientos de seguridad) para la importación, e inclusión de forma automatizada en las diferentes bases de datos.

La Armada presenta el asistente virtual COCO con inteligencia artificial generativa para resolver preguntas administrativas de los militares (DESEi+d, 2025: 98)

Lara Olmos Camarena (Armada, Minsait), Álvaro Herráiz Solla (Armada) y Paula Penedo Denche (Armada, Minsait).

La sección responsable de la transformación digital (TD) dentro del Estado Mayor de la Armada (SEGEMAR-TD/GIC) tiene como objetivo mejorar la forma de trabajar en cuanto a procesos, datos, gestión de la información y el conocimiento, innovación e inteligencia artificial. Como parte de sus responsabilidades en TD, debe también atender a las capacidades orgánicas de la Armada. En este contexto, se propone el proyecto COCO, un asistente virtual basado en tecnologías de procesamiento de lenguaje natural e IA generativa, desarrollado en el Centro de Inteligencia Artificial de la Armada (CIA2), con apoyo de Minsait (Indra) e IBM. COCO nace para resolver dudas administrativas frecuentes de los militares. Se inició su desarrollo con un caso de uso para personal con nuevo destino en el cuartel general de la Armada. Su segunda versión, se ha centrado en orientación a tropa y marinería, incluyendo el procesamiento avanzado de normativas (BOE y BOD) para dar respuesta a dudas en cuanto a trayectoria militar, ascensos, procedimientos administrativos, etc. Se construye como una solución escalable y modular, madurando

los procesos y funciones asociados de forma progresiva. COCO emplea tecnologías de Watsonx de IA generativa y procesamiento de lenguaje natural (PLN) de forma combinada. Se ha enriquecido su motor PLN con pares de pregunta y respuesta, organizado dentro de un árbol de conocimiento de temáticas y contenidos. Para el procesamiento de las normativas se emplea un motor de indexación para encontrar la información relevante con la que conformar la respuesta al usuario, empleando la arquitectura de RAG de IA generativa. Además, su motor clasifica las preguntas dentro de las temáticas aceptadas en el caso de uso para un uso responsable de la inteligencia artificial generativa y control de la alucinación. Recopila opiniones en forma de puntuación (de una a cinco estrellas) y comentarios de los usuarios. Permite la visualización de estas métricas de *feedback* y temáticas más consultadas gracias a su *dashboard*. Hasta la fecha, se ha incluido información de uso público, pero existen desafíos por la proa. Encontrar la manera de actualizar la información más dinámica de manera sencilla y orquestada, con inteligencia artificial generativa gobernada por las unidades militares expertas, como son las convocatorias de cursos de perfeccionamiento, y otras necesidades de la Dirección de Enseñanza Naval. Como aspiración futura se planea actualmente trabajar en su integración con los procesos de trabajo asociados.

IntSen²: extracción automática en baja resolución para la construcción de sistemas IMINT proactivos (DESEi+d, 2025: 99)

Christian Ayala (Tracasa Instrumental S. L.), Juan Francisco Amieva (Tracasa Instrumental S. L.), Christian Gutiérrez (Tracasa Instrumental S. L.), Pablo Vega (Tracasa Instrumental S. L.) y Carlos Aranda (Tracasa Instrumental S. L.).

El IMINT es, por naturaleza, reactivo, ya que requiere que otras fuentes de inteligencia identifiquen localizaciones de interés donde adquirir imágenes de alta resolución. El proyecto IntSen², financiado con 3,28 millones de euros por el Fondo Europeo de Defensa, propone una alternativa: aprovechar el potencial de los satélites Sentinel de observación de la Tierra de la Unión Europea —inicialmente concebidos para fines medioambientales— junto con técnicas de inteligencia artificial, para sentar las bases de un servicio europeo estratégico de seguridad y monitorización proactiva.

El uso de datos satelitales presenta una serie de limitaciones, como la reducida resolución espacial, que dificulta su aplicación en el ámbito de la defensa. Por ello, IntSen² centra sus esfuerzos en dos componentes tecnológicos principales. En primer lugar, la mejora de la resolución espacial mediante modelos de superresolución basados en inteligencia artificial, capaces de incrementarla de 10 m a 2,5 m, lo que permite la detección de activos aéreos y navales. Cabe destacar que estos modelos de superresolución no se basan en redes generativas, con el fin de evitar

la generación de elementos sintéticos o alucinaciones, algo clave en el contexto de la defensa.

El segundo componente se centra en la extracción automática y precisa de activos aéreos y navales, utilizando modelos de detección de objetos más avanzados, también basados en inteligencia artificial. Este componente es fundamental para liberar a los analistas de la necesidad de revisar manualmente todas las imágenes.

Además, la detección sistemática en bases aéreas y navales permite caracterizar movimientos estratégicos y establecer un sistema inteligente de alertas que optimice el uso de recursos, tanto en términos de imágenes de alta resolución como de analistas, lo cual permite evitar que se pase por alto cualquier movimiento sospechoso. A diferencia de los sistemas reactivos tradicionales, IntSen² es capaz de observar de manera sistemática todas las localizaciones de interés sin una escalada significativa de costes, lo que permite mantener una visión global que facilite la caracterización de amenazas a nivel estratégico.

Análisis y desarrollo de un sistema de detección de minidrones mediante radar pasivo basado en señales de DVB-T (DESEi+d, 2025: 103)

Lydia Martínez del Pino (Armada española, Ministerio de Defensa, Escuela Naval Militar, ENM), Rubén Nocelo López (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, CUD-ENM), José María Núñez Ortuño (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, CUD-ENM), José Pablo González Coma (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, CUD-ENM) y Francisco Troncoso Pastoriza (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, CUD-ENM).

El avance acelerado de los sistemas de telemetría y sensorización en la última década ha impulsado la rápida proliferación de pequeñas plataformas de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) o drones, los cuales pueden representar una potencial amenaza para los sistemas tradicionales de seguridad y defensa de un país debido a su escaso tamaño y su alta maniobrabilidad. En consecuencia, el desarrollo de capacidades para la temprana detección de estos pequeños vehículos aéreos, a una distancia adecuada, con el fin de prevenir o mitigar posibles ataques, se presenta como una oportunidad de gran interés, especialmente dentro del ámbito militar. Entre los diferentes métodos de detección, los sistemas basados en tecnología radar, y en particular aquellos que emplean radar pasivo, ofrecen la ventaja de ser robustos en entornos complejos y no controlables,

como pueden ser condiciones meteorológicas adversas, baja visibilidad o en la nocturnidad. Además, operan de forma discreta y con baja probabilidad de interceptación al ser un sistema que se basa en señales ya existentes en el entorno, emitidas por los denominados iluminadores de oportunidad. En este trabajo, se propone el análisis y el desarrollo de un sistema de detección de blancos que presenten una reducida sección radar equivalente (RCS), tales como pueden ser los minidrones, basado en radar pasivo que emplea señales de DVB-T como iluminador de oportunidad. Para ello, se evaluarán las prestaciones del sistema en función de la RCS generada por del blanco, explorando todo el ancho de banda disponible del iluminador de oportunidad y explotando tiempos de integración de datos captados por el sistema largos, con el objetivo de maximizar la función de correlación cruzada, entre la señal de referencia proveniente directamente del iluminador de oportunidad y la señal de vigilancia reflejada por el minidron, en el dominio *range*-Doppler, incrementando así la probabilidad de detección del blanco.

¿Te fías de lo que lees? Desafíos en la detección de texto artificial en la era de la inteligencia artificial (DESEi+d, 2025: 122)

María Jimeno González (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA).

La expansión de los modelos generativos de lenguaje, conocidos por todos como ChatGPT, Claude o Gemini, ha introducido un nuevo paradigma en la producción textual. Estos sistemas son capaces de generar discursos que emulan con gran precisión la escritura humana, tanto en registros formales como informales, lo que plantea interrogantes fundamentales sobre la autenticidad, la autoría y la confiabilidad del contenido que se consume. En este contexto, la pregunta «¿te fías de lo que lees?» adquiere una relevancia crítica. Los desafíos que impone la detección de textos generados por inteligencia artificial son múltiples. Por un lado, las herramientas actuales destinadas a identificar contenido artificial —basadas en patrones estadísticos, análisis de entropía o modelos discriminativos— presentan limitaciones notables. Los falsos positivos (textos humanos clasificados como artificiales) y los falsos negativos (textos generados por IA que pasan por humanos) son frecuentes y comprometen la eficacia de los sistemas de evaluación. Además, el desarrollo continuo de modelos generativos cada vez más sofisticados dificulta la estandarización de mecanismos de detección confiables. A este panorama se suman implicaciones éticas y académicas de gran alcance, con especial énfasis en el riesgo de la desinformación tan importante en el ámbito de la defensa. La

autoría intelectual y la integridad académica se ven cuestionadas, lo que obliga a reconsiderar las herramientas de evaluación y los marcos normativos utilizados. Frente a estos desafíos, resulta urgente avanzar hacia soluciones interdisciplinarias. Este trabajo busca realizar una revisión de los métodos más relevantes hasta la fecha en la detección de textos artificiales. Se analizarán desde las soluciones actuales basadas en inteligencia artificial, como las redes neuronales profundas y los modelos de clasificación, hasta enfoques híbridos que combinan técnicas tradicionales con nuevos avances tecnológicos. A su vez, se discutirán las herramientas más utilizadas en el ámbito académico y profesional, como GPTZero o Turnitin, y sus capacidades y limitaciones en el contexto actual. La inteligencia artificial no solo transforma la forma de escribir, sino también de leer, interpretar y, finalmente, confiar. Comprender los límites y posibilidades de esta transformación es un imperativo académico y social.

Transformando el análisis de datos en sistemas de defensa aéreos: plataforma TSAS-M (DESEi+d, 2025: 125)

Jorge García (Airbus Defence and Space).

En el dinámico mundo de la defensa, donde los datos son tan estratégicos como cualquier recurso crítico, Airbus Defence and Space presenta TSAS-M, una plataforma innovadora diseñada para revolucionar el análisis de datos.

En la era digital, la precisión y calidad de los datos son más valiosas que nunca. TSAS-M responde al desafío constante de gestionar eficientemente grandes volúmenes de datos provenientes de múltiples fuentes: desde simulaciones hasta ensayos en vuelo pasando por bancos de prueba. Esta plataforma integral permite a los analistas e ingenieros evaluar comportamientos, realizar análisis para certificaciones, monitorizar la madurez de nuevos sistemas y entender mejor los problemas encontrados en sistemas ya en servicio. Más allá de mejorar la gestión actual, TSAS-M fomenta sinergias entre entornos al permitir análisis avanzados que combinan datos reales con simulaciones o pruebas en bancos.

La plataforma integra un *data lake* centralizado donde convergen datos de múltiples fuentes, creando así una base única para análisis exhaustivos. Además, ofrece herramientas sofisticadas para buscar eventos e incidentes en grandes conjuntos de datos de manera paralelizada y basada en

condiciones complejas, lo que permite a los analistas identificar patrones y anomalías con precisión. Los datos pueden ser fácilmente representados mediante una amplia gama de opciones de visualización, incluyendo series temporales, tablas, mapas y mapas de calor, facilitando la interpretación y el análisis de datos complejos en formatos intuitivos.

TSAS-M equipa a los analistas con herramientas que les permiten crear sus propios *notebooks* personalizables. Estos entornos ofrecen libertad para desarrollar funciones y métodos de análisis específicos, adaptándose perfectamente a las necesidades del ensayo y del especialista. Todo ello viene acompañado de una infraestructura que permite la monitorización integrada, alertas automáticas e instrumentos de CI/CD que aseguran que cada paso del proceso esté bajo control. Para ello, la plataforma usa tecnologías como Airflow, Argo, Grafana, JupiterHub y Jenkins entre otras. Este documento explicará y detallará el diseño, arquitectura y los diferentes componentes que forman parte de la plataforma, así como los resultados de mejora en los mecanismos de procesado, búsqueda y visualización de grandes cantidades de datos.

Georregistro robusto de imágenes aéreas mediante visión artificial (DESEi+d, 2025: 154)

Celia Ibañez-Usón (Universidad Politécnica de Madrid), Carlos Cuevas (Universidad Politécnica de Madrid), Daniel Berjón (Universidad Politécnica de Madrid), Francisco Morán (Universidad Politécnica de Madrid), Juan José Navarro-Corcuera (Airbus Defence and Space) y Narciso García (Universidad Politécnica de Madrid).

En los sistemas de navegación actuales, la geolocalización precisa de imágenes aéreas resulta esencial, sobre todo en aplicaciones críticas donde la fiabilidad es clave. Aunque el GPS y los sensores inerciales suelen emplearse para estimar la posición de las aeronaves, su rendimiento puede verse comprometido en condiciones adversas, lo que afecta directamente la precisión del posicionamiento de blancos en imágenes. Incluso pequeños errores en la orientación pueden derivar en imprecisiones espaciales significativas.

Este trabajo propone un marco robusto de georregistro que integra técnicas de visión artificial, permitiendo estimar la ubicación de puntos en imágenes aéreas sin depender exclusivamente de sistemas tradicionales de posicionamiento. Uno de los principales retos abordados es la disparidad de perspectiva entre las imágenes capturadas y los mapas de referencia, típicamente ortorrectificados. Ya que las imágenes están capturadas con cierta inclinación, las diferencias angulares afectan de forma negativa a la detección de correspondencias.

Para mitigar el problema, se efectúa una transformación geométrica sobre las imágenes capturadas por la cámara a fin de simular la perspectiva que se obtendría con una cámara cenital. Para ello se proyectan las imágenes sobre un plano NED tangente a la superficie terrestre, utilizando parámetros intrínsecos y extrínsecos derivados de la cámara embarcada. Esto permite generar vistas rectificadas más similares a los mapas satelitales, facilitando la obtención de correspondencias fiables.

Además, otro desafío relevante es la variación temporal y de apariencia entre las imágenes aéreas y los mapas de referencia, sobre todo en regiones con vegetación, con diferencias notables en textura y color. Estas variaciones dificultan la determinación de correspondencias entre ellos. Para solucionar esto, y teniendo en cuenta que, entre imágenes aéreas consecutivas, las correspondencias pueden ser halladas fácilmente, se propone una estrategia híbrida, en la que se propagan en el tiempo las correspondencias halladas. De esta forma, aumenta la densidad y fiabilidad de las correspondencias.

La implementación de una región de interés dinámica, determinada por la proyección de las esquinas calibradas de cada imagen, permite acotar la búsqueda espacial y reducir la carga computacional. Por último, el uso de bases de datos espaciales para almacenar descriptores de puntos mejora la eficiencia del registro, ya que permite tener preprocesados los mapas de referencia en lugar de extraerlos en tiempo real.

Los resultados experimentales demuestran mejoras sustanciales en precisión y estabilidad respecto a los metadatos, validando esta solución como robusta y escalable para aplicaciones de defensa en tiempo real.

Diseño e implementación de una red de mando y control para la Armada basada en Meshtastic (DESEi+d, 2025: 155)

Ricardo Aneiros Suanzes (Armada española, Ministerio de Defensa) y Rubén Nocelo López (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar).

En el ámbito militar naval, las comunicaciones son esenciales para el desarrollo eficaz de las operaciones, sobre todo en entornos con infraestructuras limitadas y condiciones meteorológicas adversas. En la búsqueda de tecnologías innovadoras que mantengan la capacidad operativa, las redes de área amplia y baja potencia (LP-WAN), en particular LoRa (*Long Range*), han surgido como una alternativa prometedora para las comunicaciones inalámbricas, ofreciendo gran cobertura con bajo consumo energético. Este trabajo tiene como objetivo diseñar e implementar una red eficiente de mando y control basada en tecnología LoRa para apoyar los ejercicios de instrucción de la flota de lanchas de la Escuela Naval Militar en Marín. El sistema propuesto permitirá la geolocalización en tiempo real de las embarcaciones, así como una capacidad de mensajería táctica similar al JCHAT de la OTAN, mejorando tanto la conciencia situacional como la seguridad operativa. Se prevé una cobertura de aproximadamente siete millas náuticas alrededor de la Escuela Naval, garantizando comunicaciones fiables en la Ría de Pontevedra. La integración de tecnología GPS con LoRa proporciona una alternativa de bajo coste al sistema AIS, posibilitando el seguimiento de embarcaciones incluso cuando

los sistemas tradicionales no estén disponibles. Esta iniciativa refuerza tanto la seguridad como la eficiencia durante la instrucción y familiariza a los futuros oficiales con tecnologías de comunicación acordes a los entornos operativos actuales. Para su implementación, se ha seleccionado el protocolo de código abierto Meshtastic debido a su accesibilidad y adaptabilidad en entornos sin infraestructuras confiables. El proyecto también aborda objetivos secundarios clave: el desarrollo de un método seguro para el intercambio de claves simétricas AES-256, la adaptación de *hardware* al entorno marino y la identificación de configuraciones óptimas de transmisión LoRa mediante el análisis de la intensidad de señal (RSSI) en función de la distancia y los parámetros de modulación.

Arquitectura en cascada para mantenimiento predictivo robusto en entornos críticos (DESEi+d, 2025: 159)

Rafael Egea Jurado (Universidad de Córdoba), Álvaro Espejo Muñoz (Universidad de Córdoba), Elena Álvarez Sánchez (Universidad de Córdoba), José Manuel Porras Rosales (Universidad de España), Damián González Carrasco (Universidad de Cordoba), Manuel Moya Martín-Castaño (Universidad de Córdoba), Jesús A. Alierta Nicodemus (Subdirección de Ingeniería de Sistemas. Dirección de Ingeniería del Mando de Apoyo Logístico. Ejército de Tierra.), Alfonso Cepeda Caballos (Subdirección de Ingeniería de Sistemas. Dirección de Ingeniería del Mando de Apoyo Logístico. Ejército de Tierra.), José María Forteza López (Indra), Miguel Mendez Macías (Navantia), Amelia Zafra Gómez (Universidad de Córdoba), José María Luna Ariza (Universidad de Córdoba) y Sebastián Ventura Soto (Universidad de Córdoba).

El mantenimiento predictivo (PdM, *Predictive Maintenance*) ha supuesto un avance significativo en la forma en que diversas industrias explotan sus datos para anticipar fallos, planificar mantenimientos y aumentar la disponibilidad operativa de sus sistemas, sobre todo en entornos críticos como el ámbito militar. A pesar de los avances recientes, su aplicación práctica sigue viéndose limitada por dos factores clave: la incertidumbre epistémica, derivada del conocimiento incompleto de los sistemas, y la incertidumbre estocástica, asociada a la variabilidad inherente de los datos. Estas limitaciones han reducido la eficacia de los modelos

convencionales en condiciones reales, donde la precisión y la fiabilidad son determinantes. Para abordar estos desafíos, este trabajo presenta una arquitectura en cascada enfocada en mejorar la robustez de las soluciones propuestas en la literatura. Esta propuesta consta de dos etapas: 1) uso de redes neuronales bayesianas para estimar el estado de salud (*State of Health*, SoH) del sistema, cuantificando tanto la probabilidad de fallo como el grado de incertidumbre estocástica; 2) si SoH desciende por debajo de un umbral de seguridad, se aplican modelos autorregresivos de *forecasting* para estimar los valores futuros de un indicador de salud construido mediante la aplicación del conocimiento experto del Ejército de Tierra, lo que permite aumentar el conocimiento sobre los sistemas y disminuir la incertidumbre epistémica. Este enfoque novedoso optimiza la estimación de la degradación, permitiendo detecciones de fallo más precisas, constituyendo un avance relevante hacia modelos de PdM más eficaces y robustos, así como una base sólida para su despliegue en escenarios operativos complejos y exigentes. La arquitectura ha sido validada con datos reales de plataformas militares en el marco del proyecto MEBSILPRE, lo que permite logra mejoras significativas respecto a metodologías empleadas en proyectos anteriores. Además, los resultados obtenidos demuestran una mayor robustez frente al ruido, una mejor tolerancia ante la escasez de datos y una anticipación más efectiva de eventos críticos frente a modelos tradicionales de PdM.

IDEPAR en los ensayos PARMESTO organizados por el set-320 de la OTAN (DESEi+d, 2025: 195)

David Anastasio de la Mata Moya (Universidad de Alcalá), María Pilar Jarabo Amores (Universidad de Alcalá), Nerea del Rey Maestre (Universidad de Alcalá), María de Cortes Benito Ortiz (Universidad de Alcalá), Carlos Hernández Fernández (Universidad de Alcalá), Javier Rosado Sanz (Universidad de Alcalá) y Sandra Gutiérrez Serrano (Universidad de Alcalá).

Este trabajo se centra en mostrar las capacidades de monitorización y formación de imágenes de los radares pasivos basados en iluminadores satelitales en entornos fluviales gracias a la participación en los ensayos PaRMeSTO (*Passive Radar Measurements with Space Transmitters of Opportunity*) organizados por el grupo set-320 «New Frontiers In Modern Passive Radars» que forma parte de la STO, la principal organización de investigación en ciencia y tecnología de la OTAN, durante el mes de septiembre del 2024, en la orilla del Rin en la ciudad de Bonn, con la participación de FHR, TNO, FHR, WUT, UPM y UAH. Durante los ensayos se desplegó el demostrador IDEPAR, desarrollado por la Universidad de Alcalá: una plataforma de investigación y desarrollo capaz de explotar señales de oportunidad de iluminadores terrestres y satelitales. Como iluminador de oportunidad se eligió un satélite geoestacionario de DVB-S (*Digital Vídeo Broadcasting - Satellite*), caracterizado por ofrecer grandes coberturas, elevadas potencias de transmisión y alta disponibilidad,

aunque con una distancia a la Tierra que suponen altas pérdidas de propagación. En esta campaña se utilizó el satélite EUTELSAT 9B con una potencia isotrópica radiada equivalente de 54 dBW y la versión de IDEPAR capaz de explotar señales multicanal DVB-S con sistemas de antena basados en antenas comerciales: una parabólica de 5º de ancho de haz para el canal de referencia y una bocina rectangular de 16º de ancho de haz para el canal de vigilancia. Copias de la señal de referencia desplazadas en tiempo y Doppler son combinadas con la señal de vigilancia para obtener la función de ambigüedad cruzada, que define el espacio de entrada donde se han aplicado los algoritmos de detección y seguimiento. En este trabajo se presentarán resultados de detección y seguimiento de embarcaciones que, a su vez, han sido utilizados para demostrar la capacidad de generar imágenes ISAR (*Inverse Syntethic Aperture Radar*) pasivas de alta resolución validada mediante simulación electromagnética utilizando modelos de embarcaciones CAD (*Computer-Aided Design*) en 3D.

Sistema de gestión de riesgos dinámicos en entornos operacionales multidominio (DESEi+d, 2025: 214)

Carmen Sánchez-Zas (UPM), Óscar Jover-Walsh (Universidad Politécnica de Madrid), Sonia Solera Cotanilla (Universidad Politécnica de Madrid), Adrián Camacho Gil (Indra S. A.), Eduardo Moyano González (Indra S. A.), Xavier Larriva-Novo (Universidad Politecnica de Madrid), Carlos Antonio Ceballos Romero (Indra S. A.) y Victor Villagrá (Universidad Politécnica de Madrid).

En contextos donde la continuidad de las misiones es prioritaria, comprender el riesgo resulta crucial para anticipar y mitigar el posible impacto asociado al cumplimiento de dicha misión. En este sentido, el riesgo se define como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento adverso y el impacto asociado sobre los objetivos de la misión. Desde un enfoque sistemático, el riesgo no se concibe como una amenaza aislada, sino como el resultado de la interacción dinámica entre amenazas, vulnerabilidades y activos críticos dentro de un entorno operativo específico.

En el contexto actual de la evolución de la guerra moderna y el auge de los conflictos en entornos multidominio, las operaciones multidominio (*Multi-Domain Operations*, MDO) y el concepto de guerra mosaico se caracterizan por ser entornos dinámicos y heterogéneos donde interactúan fuerzas, sensores, sistemas de información y plataformas distribuidas en distintos dominios: tierra, mar, aire, espacio y ciberespacio.

Para afrontar estos desafíos, se presenta el desarrollo de un sistema de gestión de riesgos dinámicos diseñado específicamente para entornos operacionales. El sistema de gestión de riesgos dinámicos tiene como propósito identificar, evaluar y correlacionar riesgos operacionales, analizar la propagación de dichos riesgos y priorizar mitigaciones. El sistema desarrollado se integra dentro de una arquitectura multidominio con enfoque a la evaluación continua de amenazas y vulnerabilidades sobre activos críticos presentes en los distintos dominios.

En entornos complejos como las MDO, la gestión de riesgos constituye un elemento crítico para garantizar la continuidad operativa, la seguridad de la información y la eficacia en la toma de decisiones. Mediante algoritmos de análisis de riesgos y modelado de escenarios el sistema se posiciona como solución de apoyo al proceso militar en la toma de decisiones (PMTD), en entornos operacionales altamente contestados, dinámicos y volátiles.

Clasificación de UAS basado en inteligencia artificial para dar soporte a sistemas de defensa antiaérea (DESEi+d, 2025: 227)

Iván Salinas (Dpto. Ingeniería de Computadores, Automática y Robótica, Universidad de Granada), Samuel F. Romero (Dpto. Ingeniería de Computadores, Automática y Robótica, Universidad de Granada), Jesús A. Molero (Mando de Artillería Antiaérea, Ejército de Tierra), Bonifacio Gutiérrez de León (Mando de Adiestramiento y Doctrina, Ejército de Tierra), Jesús Banqueri (Dpto. Electrónica y Tecnología de Computadores, Universidad de Granada) y Francisco Barranco (Dpto. Ingeniería de Computadores, Automática y Robótica, Universidad de Granada).

La inteligencia artificial (IA) se ha consolidado como una tecnología transformadora en el ámbito de la defensa y la seguridad, frente a las amenazas aéreas modernas. La necesidad de superar las limitaciones de los sistemas de defensa tradicionales frente a amenazas aéreas no tripuladas (*low, slow, small)* cada vez más sofisticadas motiva el desarrollo e implementación de sistemas basados en IA, que permitan adaptarse a problemas cada vez más complejos.

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema capaz de clasificar UAS utilizando imágenes y vídeos proporcionados por el Mando de Artillería Antiaérea. La metodología empleada se basó en técnicas de aprendizaje profundo (deep *learning*), explorando diversas arquitecturas del estado de la cuestión como las redes neuronales

convolucionales (CNNs), redes recurrentes (RNN) y arquitecturas basadas en *transformer*. Además, para el entrenamiento de los modelos se llevó a cabo una exhaustiva recopilación y refinamiento de datos, utilizando bases de datos públicas y secuencias de vídeo de baterías de tiro reales.

Los resultados obtenidos con la arquitectura ConvNextV2 demostraron una notable eficacia en la clasificación de diferentes tipos de UAS (hasta diez clases conocidas y una desconocida) a partir de las grabaciones proporcionadas que contenían 173 485 imágenes que se anotaron manualmente. El mejor modelo alcanzó una precisión de aproximadamente 0.80, llegando a un 0.86 al considerar las tres clases con mayor confianza (top tres), con una velocidad de inferencia de 181 fotogramas por segundo.

El sistema fue probado en un entorno operativo real durante el Ejercicio ATLAS 24, validando su funcionamiento en tiempo real. Los resultados del proyecto subrayan el potencial de la IA para fortalecer las capacidades de detección y clasificación de UAVs en el ámbito de la defensa antiaérea, soporte crucial para la toma de decisiones operativas. Además, también ponen de manifiesto la importancia de la cooperación entre universidad y ejército para el fomento en la innovación.

Finalmente, el trabajo se planea como un componente específico de una arquitectura mayor, que fusionaría otras modalidades de información como radar, radiofrecuencia y audio, para ofrecer una solución anti-UAS más fiable y robusta.

Estudio de técnicas de aprendizaje profundo aplicado a la evaluación de la amenaza en sistemas navales (DESEi+d, 2025: 228)

Germán Santos Fuentes Landi (Navantia), Juan José Domínguez Jiménez (Unversidad de Cádiz), Alfonso Ponce Navarro (Navantia), Aitor Facio Valero (Navantia) y Natalia Ruíz Martínez (Navantia).

La evaluación de la amenaza es un componente crucial del OODA *Loop* (*Observe, Orient, Decide, Act)* en el combate naval y en otros contextos de seguridad. Este proceso permite a las fuerzas navales y otras organizaciones tomar decisiones rápidas y efectivas en situaciones de alta presión y riesgo. Los algoritmos y procedimientos implementados en los sistemas de combate naval para la evaluación de la amenaza —en el caso de los buques de la Armada española, SCOMBA— llevan a cabo un análisis de la situación táctica recibida y procesada alrededor de la zona de operaciones, gracias a los sensores locales del buque, así como de las trazas remotas recibidas por LINK. Esta evaluación es principalmente analítica y basada en algoritmos como árboles de decisión o modelos bayesianos, y hace uso de un subconjunto de toda la toda información disponible para obtener un dato de prioridad a la hora de tomar decisiones tácticas. En el presente artículo se realiza, en primer lugar, un estudio del estado de la cuestión señalando las principales técnicas de *deep learning* que se emplean para mejorar esta fase del OODA *Loop*. Posteriormente, se presenta el desarrollo, implementación y pruebas de

alguna de las técnicas para estudiar su efectividad en el entorno naval. Además, dado que, por naturaleza, las técnicas de *deep learning* se suelen apreciar como cajas negras, se expondrán métodos para explicar la toma de decisiones de dichas técnicas. Se describe la cooperación entre diferentes entidades y la fusión de los distintos resultados para evaluar la amenaza global de la flota para lo que se realiza un estudio sobre la viabilidad de la inferencia federada como técnica apropiada. Para la ejecución de las pruebas de rendimiento, se detalla un entorno simulado que habilita la creación de posibles escenarios de confrontación. Finalmente, el artículo estudia los posibles riesgos de aplicar la inteligencia artificial durante la evaluación de la amenaza.

Análisis y diseño de metasuperficies planas y conformadas para baja observabilidad (DESEi+d, 2025: 229)

María Guijarro Maortua (Grupo de Radiación, Information Processing and Telecommunications Center, Universidad Politécnica de Madrid), Francisco Luna Valero (Dpto. de Lenguajes y Ciencias de la Computación, Universidad de Málaga, ITIS *Software*, Universidad de Málaga), José Manuel Fernández González (Grupo de Radiación, Information Processing and Telecommunications Center, Universidad Politécnica de Madrid) y Jesús Grajal de la Fuente (Grupo de Microondas y Radar, Information Processing and Telecommunications Center, Universidad Politécnica de Madrid).

En un momento en el que las tecnologías radar avanzan rápidamente, también surge la necesidad de combatirlas y es por ello por lo que las tecnologías *stealth* se están convirtiendo en un campo de gran interés. Partiendo de la ecuación radar, evitar la detección de un blanco implica reducir el alcance del radar y el único parámetro que depende del blanco es su sección radar (RCS). La RCS cuantifica cómo de detectable es un blanco, ya que es una medida basada en la potencia que refleja un blanco en comparación con la que incide sobre él. Por eso, durante este estudio se ha trabajado con ese parámetro, de manera que el objetivo es reducir la RCS del blanco. Existen distintos métodos para reducir la RCS, pero las metasuperficies están tomando una gran importancia. Estas son estructuras compuestas de *arrays* de elementos conductores que se replican de

manera periódica y son capaces de manipular las ondas electromagnéticas que inciden sobre ellas. En este trabajo se ha diseñado una metasuperficie que consigue reducir la RCS 12 dB, lo que implica una reducción en la distancia de detección del radar del 50 %. Esto se consigue gracias a la dispersión de las ondas que inciden sobre el blanco, lo que hace que el radar no sea capaz de recibir la señal de vuelta. Siguiendo la metodología propuesta, se ha diseñado una metasuperficie plana y posteriormente se ha adaptado a diferentes superficies sobre las que se ha conformado, sin empeorar su funcionamiento. Desde el punto de vista monoestático, se ha conseguido reducir la RCS 12 dB en la banda 9 - 11,73 GHz, lo que supone un ancho de banda relativo del 26.34 %. Sin embargo, al analizar la respuesta en el rango angular theta = [–60,60]° y phi = 0°, este ancho de banda de funcionamiento se ha reducido hasta un 22.22 %. Por otro lado, desde el punto de vista biestático, se han realizado dos análisis y se ha conseguido reducir la RCS 12 dB en la dirección especular en la banda 9.6 - 11,7 GHz (19,72 %), mientras que se ha reducido 6 dB al analizar todos los ángulos de reflexión en la banda 9 - 12 GHz (28,57 %). Con estos resultados, se han fabricado y medido diversos prototipos que validan los resultados obtenidos.

IMAGIA. Inteligencia artificial para la inspección de ensayos no destructivos por ultrasonidos (DESEi+d, 2025: 239)

Víctor Gonzalo Cristóbal (TheNextPangea), David Pérez Jara (Ejército del Aire y del Espacio), Andrés Suárez Lado (Ejército del Aire y del Espacio) y Marta Fernández Moreno (TheNextPangea).

Los ensayos no destructivos (END) por ultrasonidos (UT) son fundamentales en la industria aeroespacial para detectar defectos internos en componentes estructurales. Sin embargo, la interpretación de estos datos es una tarea compleja que requiere una alta especialización por parte del inspector y la inspección de cada ensayo conlleva mucho trabajo, sobre todo en los UT por pulso-eco. Esta técnica genera archivos de gran tamaño, lo que dificulta su procesamiento manual y complica la identificación de defectos en piezas de gran volumen. Además, la existencia de las diferentes interpretaciones de las señales (A-*scan*, B-*scan*, C-*scan* y D-*scan*), añade una capa adicional de complejidad al análisis de los datos.

Para abordar estos desafíos, se ha desarrollado la plataforma IMAGIA, que incorpora inteligencia artificial (IA) para asistir a los inspectores en el análisis de END. IMAGIA automatiza el preprocesamiento de datos, facilita el etiquetado de imágenes y permite la detección automática de defectos mediante modelos de aprendizaje profundo. Esta plataforma es muy eficaz en la gestión y análisis de los voluminosos archivos generados

por los robots de END, especialmente en UT por pulso-eco, ayudando a la detección de delaminaciones y otros cambios de espesor anómalos.

Esta plataforma procesa y transforma los datos originales en representaciones visuales y manejables, adaptadas a los diferentes tipos de END. Por ejemplo, en el caso de UT por transmisión los datos en bruto se transforman a una imagen sobre la que modelos de *deep learning* (DL) no supervisados detectan posibles defectos. Por otro lado, en el caso de UT por pulso-eco se han entrenado modelos supervisados encargados de segmentar defectos en los B-*scan*, que más tarde se propagan a los respectivos A-*scan*, C-*scan* y D-*scan*.

En definitiva, IMAGIA permite a los inspectores importar datos de END en el formato generado por los robots y recibe una visualización y detecciones automáticas de las inspecciones. Una vez el inspector valida las detecciones de los modelos, la plataforma permite generar informes automáticos que contienen información detallada sobre los defectos detectados. Esta plataforma está instalada y funcionando en la Maestranza Aérea de Albacete.

Predicción de tipo de buque a partir de datos AIS utilizando técnicas de aprendizaje automático supervisado (DESEi+d, 2025: 284)

Belén Barragáns-Martínez (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), Pablo Sendín-Raña (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), Norberto Fernández-García (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar) y Miguel Rodelgo-Lacruz (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar).

La detección de anomalías en la navegación constituye una herramienta fundamental para el COVAM (Centro de Operaciones y Vigilancia de Acción Marítima), integrado en la Fuerza de Acción Marítima (FAM), al permitir la identificación temprana de posibles actividades ilícitas, como transbordos no autorizados de personas o mercancías, o exploraciones ilegales, entre otras. La definición de lo que se considera anomalía está directamente relacionado con el tipo de buque o buques involucrados, lo que convierte esta variable en un elemento esencial para el análisis.

Entre las diversas y heterogéneas fuentes de datos empleadas destaca el flujo de información proveniente del AIS (*Automatic Identification System*), una de las más relevantes para el conocimiento del entorno marítimo (CEM). Sin embargo, hasta un 30 % de los mensajes AIS presentan inconsistencias en el campo que identifica el tipo de buque (*shiptype*), ya sea por estar incorrectamente cumplimentado o, directamente, no definido.

El presente trabajo propone el uso de un modelo de aprendizaje supervisado para la predicción del tipo de buque a partir de mensajes AIS estáticos (con información de las dimensiones) y dinámicos (que describen el comportamiento cinemático). La predicción se centra en las cinco clases de buques más representadas en el tráfico marítimo, en línea con los criterios adoptados por la literatura especializada. El modelo se entrena con un conjunto de datos históricos globales correspondientes a un mes de actividades, lo que implica un volumen de información considerable para el procesamiento posterior. A partir de estos datos se extraen parámetros derivados de los estáticos y dinámicos, que permiten caracterizar tanto valores invariantes del buque como, por ejemplo, la eslora y manga, como propiedades del conjunto de trayectorias que el buque realiza, como la distancia o el tiempo medio de navegación.

El modelo propuesto se apoya en la capacidad de procesamiento en paralelo mediante GPU y en el uso de bibliotecas especializadas para proporcionar predicciones próximas al tiempo real, con unos valores de exactitud superiores al 92 %.

ÁREA 12
Ciberdefensa

Prototipo de laboratorio para la segurización de infraestructuras IoT y automatización de escenarios de ciberataque (DESEi+d, 2025: 18)

Jesús Ángel Román Gallego (USAL), Laura Grande Pérez (USAL), Pablo Plaza Martínez (USAL), Manuel López Pérez (USAL) y Albano Carrera (USAL).

La creciente dependencia de las infraestructuras críticas y sistemas estratégicos en tecnologías IoT plantea nuevos desafíos en materia de seguridad y defensa. En este contexto, se presenta un sistema de simulación diseñado como laboratorio prototipo para la segurización de infraestructuras IoT, orientado a evaluar la resiliencia de estos entornos frente a amenazas cibernéticas cada vez más sofisticadas. Este sistema constituye un entorno robusto y flexible que permite replicar, analizar y estudiar redes IoT en condiciones normales y bajo múltiples vectores de ataque, sirviendo como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en materia de defensa tecnológica. El núcleo del simulador se basa en una arquitectura de virtualización híbrida que combina tecnologías de virtualización de *hardware* (mediante hipervisores) y *software* (contenedores), permitiendo la emulación realista de dispositivos IoT y redes complejas. Esta infraestructura posibilita la simulación desde sensores individuales hasta topologías completas con múltiples nodos interconectados, incorporando comportamientos típicos a través de scripts automatizados. Los

escenarios de simulación son definidos mediante archivos YAML, lo que facilita su configuración, despliegue y replicabilidad, permitiendo adaptar los experimentos a diferentes tipos de infraestructuras y amenazas. El sistema incluye una API de gestión que permite a los usuarios interactuar con los escenarios, lanzar ataques predefinidos (DoS/DDoS, *spoofing*, explotación de APIs, entre otros) y monitorizar en tiempo real el estado de los dispositivos y el tráfico de red. Esta capacidad de automatización y control permite evaluar de forma precisa el impacto de los ataques y la efectividad de los mecanismos de defensa implementados, como el cifrado de comunicaciones, autenticación reforzada, segmentación de redes o sistemas de detección de intrusos. Por último, el entorno ofrece herramientas para la generación de informes técnicos detallados, permitiendo analizar vulnerabilidades, patrones de ataque y niveles de resiliencia alcanzados. Este laboratorio proporciona un entorno esencial para el desarrollo y validación de estrategias de defensa proactiva en sistemas IoT, contribuyendo así a la seguridad integral de infraestructuras críticas en el marco de la defensa nacional.

Propuesta de un modelo mixto de *dataset* normalidad-anomalía para la detección de ciberataques (DESEi+d, 2025: 59)

Pedro Díaz García (INTA).

La detección temprana de ataques a la infraestructura TIC de cualquier organización es una necesidad crítica. Las técnicas de inteligencia artificial, como *machine learning* (ML), constituyen una herramienta fundamental para analizar grandes cantidades de datos y detectar patrones y comportamientos que puedan indicar un posible ataque, donde además es prioritaria la velocidad de procesamiento. Para que estas técnicas sean eficaces, es necesario entrenar modelos de clasificación exponiéndolos a grandes volúmenes de datos. Hasta la fecha, para dicho fin, se han publicado varios *datasets* de patrones de ataque etiquetados. Dichos conjuntos de datos han sido ampliamente analizados y criticados por la comunidad científica debido a los múltiples problemas que presentan como la falta de realismo, desactualización, sesgos, problemas de confidencialidad y baja variabilidad. Estas condiciones hacen que tengan una utilidad limitada para entrenar modelos capaces de detectar y clasificar diferentes tipos de ataque. Se propone aquí un enfoque novedoso consistente en crear un modelo mixto de *dataset* normalidad-anomalía. En primer lugar, hay que crear un conjunto de datos de normalidad con el fin de entrenar los modelos de ML para identificar el comportamiento normal del tráfico de red y de los servicios. De esta forma, se pueden detectar con facilidad

y con un elevado grado de acierto las anomalías utilizando algoritmos diseñados específicamente para clasificaciones binarias, como la regresión logística (LR) y máquinas de vectores de soporte (SVM). Una vez identificado un patrón como anomalía, el siguiente problema es proceder a su clasificación empleando una taxonomía de patrones de ataque, pero la probabilidad de que se produzcan falsos positivos y, sobre todo, falsos negativos (lo más crítico para aplicaciones en ciberseguridad) se reduce muy de forma significativa. Utilizando otros conjuntos de datos etiquetados (anomalías) se puede proceder en una segunda fase a dicha clasificación. En este proceso, juega un papel central la ciencia de datos, ya que hay que llevar a cabo el proceso de extracción, transformación y carga, de los datos en bruto recogidos en los logs de los servicios, para obtener conjuntos de datos válidos para el entrenamiento y posterior validación de los modelos de ML. La propuesta, por tanto, consiste en diseñar y generar un *dataset* que contenga conjuntos de datos de normalidad y de anomalías. Con los datos de normalidad se entrenarán modelos capaces de distinguir con gran acierto entre actividad legítima y ataque a un sistema, y con los datos de anomalías se entrenarán modelos para clasificar los ataques detectados.

Tecnolgías *cloud* para simulación de pruebas de ciberresiliencia (DESEi+d, 2025: 77)

Javier Bermejo Higuera (INTA - Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial - ES), Víctor González Llorente (INTA - Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial - ES) y José Luis Seoane Cabezal (ISDEFE).

Los sistemas *cloud* se han establecido como un nuevo paradigma que permite entregar la computación como un servicio. Para que el paradigma de la computación en nube se adopte de forma plena y se utilice de manera efectiva, es fundamental que sea resiliente, es decir que los mecanismos de seguridad sean robustos y resistentes a los fallos y ataques maliciosos. La seguridad de las tecnologías *cloud* es una preocupación importante y un problema de investigación desafiante, ya que implica muchas tareas interdependientes como son la gestión de la configuración, la implantación de sistemas de protección perimetral, la monitorización y análisis de alertas, el análisis del código fuente y la gestión de la identidad de los usuarios. Está bastante aceptado que no es posible construir *software* y sistemas informáticos que estén libres de vulnerabilidades. Por lo tanto, se acepta ampliamente que las técnicas de resiliencia son las soluciones más prometedoras para mitigar los ciberataques. Dada la sofisticación, adaptabilidad y persistencia de las actuales ciberamenazas, hoy en día no se puede asumir que existe una seguridad absoluta frente a los intrusos, por tanto, se debe cambiar la forma de pensar para asumir algún grado de éxito del adversario y estar preparados para asegurar el éxito de la misión

incluso en un entorno degradado. Por lo tanto, la protección efectiva de sistemas de información, sobre todo de aquellos identificados como de misión crítica, requiere incluir la resiliencia del sistema como objetivo en todas las fases del ciclo de vida de los sistemas y en particular en los procesos de verificación. El objeto de esta ponencia es presentar los resultados de un proyecto de investigación en el que se ha utilizado una aproximación de Ingeniería del Caos, basada en la exploración del comportamiento del sistema utilizando mecanismos realistas de inyección de fallos en entornos de producción que constituye un mecanismo practico para la implementación y evolución de sistemas ciberresilientes.

IA generativa y ciberseguridad: datos sintéticos para defensa y desafíos éticos (DESEi+d, 2025: 116)

Antonio Manuel Martínez Heredia (Dirección de Investigación, Doctrina, Orgánica y Materiales Mando de Doctrina) y Andrés Ortíz García (Departamento de Ingeniería de Comunicaciónes. Universidad de Málaga).

La inteligencia artificial generativa (IAG) está transformando la ciberseguridad mediante herramientas defensivas innovadoras mientras plantea nuevos desafíos. Esta investigación examina la aplicación de redes generativas adversariales (GANs) para crear datos sintéticos que emulan tráfico de red y comportamientos de usuarios, permitiendo entrenar sistemas de detección de intrusiones sin comprometer información sensible.

Empleando la arquitectura DCGAN (*Deep Convolutional* GAN), se generaron muestras sintéticas basadas en el conjunto de datos CICIDS2017, que contiene tráfico de red etiquetado con diversos vectores de ataque. Los resultados demuestran un incremento significativo en la capacidad de generalización de los modelos entrenados con estos datos sintéticos, con una mejora cuantificable en las tasas de detección y una reducción de falsos positivos. Esta metodología optimiza la respuesta del sistema ante amenazas emergentes o apenas representadas en conjuntos de datos convencionales.

De forma paralela, se investigó la integración de IAG con aprendizaje por refuerzo para desarrollar entornos simulados de alta fidelidad. Estos escenarios permitieron entrenar agentes de respuesta que exhiben adaptabilidad superior ante condiciones de ataque variables y complejas, potenciando las capacidades de defensa autónoma en tiempo real.

No obstante, el potencial defensivo de la IAG conlleva riesgos inherentes. La capacidad de generar datos sintéticos realistas podría facilitar la automatización de ataques sofisticados, el desarrollo de *malware* evasivo y la orquestación de campañas de desinformación, planteando desafíos éticos y regulatorios significativos. Este estudio subraya la necesidad de establecer marcos normativos que promuevan la implementación responsable de estas tecnologías.

En definitiva, la IAG ofrece beneficios sustanciales para la ciberseguridad mediante datos sintéticos y entornos simulados avanzados, siendo fundamental equilibrar su potencial defensivo con consideraciones éticas y regulatorias que garanticen su aplicación responsable, transparente y alineada con principios de seguridad y privacidad.

Plataforma virtual de gestión de evidencia para la validación de pruebas electrónicas (DESEi+d, 2025: 197)

Eva Álvarez del Manzano (CESN) y José Garma (CESN).

Esta solución introduce un innovador sistema de gestión virtual para la validación y custodia de pruebas electrónicas, diseñado específicamente para contextos de defensa y seguridad. Esta solución responde al desafío crítico de garantizar la integridad de la evidencia digital en operaciones militares, un aspecto clave para asegurar procesos judiciales y operacionales justos y eficaces. Desde un enfoque científico-tecnológico, el sistema combina tecnologías emergentes como *blockchain* y algoritmos de inteligencia artificial. La cadena de bloques asegura la inmutabilidad de las pruebas digitales, mientras que la IA detecta posibles manipulaciones, elevando así el nivel de confianza en la autenticidad del material recopilado. Además, se ha desarrollado una interfaz intuitiva pensada para facilitar su uso en entornos de defensa, lo que refuerza su aplicabilidad real. En cuanto a la aplicabilidad para el sector de defensa y seguridad, el sistema cubre una necesidad creciente: el manejo seguro, trazable y verificable de evidencia digital en escenarios altamente sensibles. Sus posibles usos se extienden tanto a operaciones militares como a cuerpos de seguridad y fuerzas del orden, con impacto directo en la mejora de la ciberseguridad y eficiencia operativa. La calidad técnica queda claramente articulada en sus componentes: recopilador automático de evidencia, almacenamiento

seguro mediante *blockchain*, validación criptográfica, uso de la inteligencia artificial generativa, todo ello integrado en una moderna y segurizada plataforma de gestión accesible. El modelo al completo dispone de una hoja de ruta realista que contempla fases de prueba, implementación piloto y escalado a gran escala, así como una estrategia de mitigación de riesgos tanto tecnológicos como de adopción por parte de los usuarios. En términos de cooperación, CESN ha iniciado conversaciones con empresas integradoras del sector y ha asegurado una inversión inicial privada. Busca financiación adicional a través del programa DIANA para acelerar la maduración de la tecnología, lo cual evidencia un compromiso sólido con la colaboración público-privada y la transferencia tecnológica.

Generación automática de patrones de detección no supervisados para la ciberdefensa en entornos OT críticos (DESEi+d, 2025: 213)

Juan José Domínguez Jiménez (Universidad de Cádiz), Rafael Gómez Sánchez (Navantia Sistemas), Mercedes Rodríguez García (Universidad de Cádiz), Pablo Luna Ramos (Universidad de Cádiz) y José Carlos García Ramos (Universidad de Cádiz).

La creciente digitalización de infraestructuras críticas, que abarca desde los sistemas de información tradicionales (IT) hasta los entornos de tecnología operativa (OT) e incluso las redes de dispositivos del internet de las cosas (IoT), plantea importantes desafíos en materia de ciberseguridad. La interconexión de sistemas que antes operaban de forma aislada amplía la superficie de ataque y aumenta la sofisticación de las amenazas potenciales. En este contexto, SEADETEC se presenta como un sistema de detección de ciberataques para entornos IT/OT/IoT, que emplea técnicas de procesamiento de eventos complejos (CEP) para proporcionar una protección efectiva en tiempo real. La eficacia del motor CEP depende en gran medida de una adecuada configuración de patrones de detección, lo que representa un reto clave para su despliegue en escenarios reales.

Este trabajo contribuye al avance de la ciberdefensa en entornos OT, ofreciendo una solución innovadora para la protección de infraestructuras

críticas contra ciberataques, que consiste en la integración en SEADETEC de la generación automatizada de patrones destinados a su motor CEP, con el fin de detectar y alertar sobre anomalías presentes en las infraestructuras críticas que monitoriza.

En entornos OT la integridad de los sensores es fundamental, por lo que la investigación se centra en la identificación y caracterización de patrones de ataque específicos para este tipo de entornos. Entre estos patrones se incluyen la denegación de servicios (DoS), escaneos de puertos (*portscan*), suplantación de identidad (*spoofing*) y la introducción de sensores maliciosos o no autorizados (*rogue sensor*). Se propone un enfoque basado en el análisis del comportamiento del sistema a monitorizar, capaz de generar reglas de detección no supervisadas, facilitando así la adaptación dinámica al entorno OT, elemento crucial en sistemas críticos.

La integración de SEADETEC a MINERVA, el puente de navegación integrado desarrollado por Navantia S. A., permite validar la eficacia de SEADETEC en un sistema crítico para la seguridad marítima. En este contexto, SEADEETEC ha demostrado ser capaz de automatizar la generación de patrones de forma efectiva. En este sentido, los resultados obtenidos confirman que el sistema puede ajustar sus reglas de detección al comportamiento del entorno OT, mejorando su precisión y reduciendo el tiempo de reacción ante anomalías.

Desafíos y soluciones en seguridad, privacidad y ciberseguridad en drones y sistemas RPAS (DESEi+d, 2025: 36)

Juan de Dios Meseguer González (RINT 1/IUGM-UNED).

Los drones y los sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS) han experimentado un crecimiento exponencial en su uso tanto en ámbitos civiles como militares. Su versatilidad y accesibilidad han permitido su integración en diversas áreas, como la vigilancia, el transporte, la agricultura de precisión y las operaciones de defensa. No obstante, esta expansión ha traído consigo importantes desafíos en materia de seguridad, privacidad y ciberseguridad, que requieren un análisis detallado y el desarrollo de estrategias efectivas para mitigarlos. La relevancia de estos desafíos radica en su impacto en la protección de infraestructuras críticas, la seguridad nacional y el respeto a los derechos individuales, s en lo referente a la recopilación y almacenamiento de datos sensibles.

Esta comunicación tiene como objetivo analizar los principales riesgos de seguridad en la operación de drones, tales como colisiones, interferencias y accesos no autorizados. También se examinan las amenazas a la privacidad derivadas del uso de estos dispositivos, considerando normativas y regulaciones vigentes tanto a nivel nacional como internacional. En cuanto a la ciberseguridad, se analizan vulnerabilidades críticas, incluyendo hackeos y toma de control remota, junto con casos documentados

de ataques a sistemas de drones, los cuales han demostrado el potencial de esta tecnología para ser explotada con fines malintencionados.

A partir de este análisis, se presentan diversas estrategias de mitigación, que incluyen la implementación de protocolos de seguridad avanzados, técnicas de encriptación de comunicaciones, diseño de sistemas redundantes y resilientes, y la capacitación de operadores en prácticas seguras. Además, se revisan normativas y estándares internacionales que buscan regular y mejorar la seguridad en el uso de drones y RPAS, estableciendo requisitos para su certificación y operación segura.

Como conclusión, se propone un conjunto de medidas concretas para fortalecer la seguridad operativa y cibernética de los drones, promoviendo el desarrollo de tecnologías más seguras y resilientes. La adopción de estas medidas es esencial para garantizar un uso responsable de los drones, minimizar los riesgos asociados a su implementación y fomentar su integración en distintos sectores sin comprometer la seguridad y la privacidad. Esta comunicación busca aportar un marco de referencia para el diseño de estrategias de protección que permitan aprovechar el potencial de esta tecnología sin descuidar los desafíos que presenta.

Avances de las tecnologías cuánticas en defensa: oportunidades, vulnerabilidades y desafíos de seguridad (DESEi+d, 2025: 146)

Joan Bas (CTTC), Marta Irene (INDRA), Francisco Sánchez (INDRA), Konrad Wrona (NCIA), Joanna Sliwa (NCIA), Kadir Murak (Özyeğin University), Michal Krelina (CTU), Armando Pinto (Instituto de Telecomunicações, and Department of Electronics, Telecommunications, and Informatics, University of Aveiro), Nuno Silva (Instituto de Telecomunicações, and Department of Electronics, Telecommunications, and Informatics, University of Aveiro) y Marco Piani (evolutionQ Inc).

Las tecnologías cuánticas, que se basan en principios fundamentales de la mecánica cuántica —como la superposición, la imposibilidad de clonación, el entrelazamiento y el efecto túnel— están avanzando a un ritmo acelerado y se perfilan como capacidades clave para la defensa y la seguridad de próxima generación. Estas tecnologías prometen avances significativos en áreas como las comunicaciones ultraseguras mediante distribución cuántica de claves (QKD), sistemas de navegación y sensado de alta precisión, y la computación cuántica, capaz de resolver problemas complejos más allá del alcance de los sistemas clásicos. En el ámbito militar, sus aplicaciones potenciales incluyen canales de mando y control seguros, sistemas de navegación independientes del GPS, y radares cuánticos capaces de detectar objetos furtivos. Sin embargo, como ocurre con toda tecnología emergente, el desarrollo acelerado de estos

sistemas también conlleva nuevos desafíos y vulnerabilidades. Aunque la QKD es, en teoría, invulnerable por las leyes de la física cuántica, en la práctica puede ser comprometida mediante ataques físicos sofisticados, como la inyección de ruido óptico o el daño intencionado de detectores de fotones con luz de alta intensidad. Estas técnicas pueden debilitar su seguridad y eficacia. Por otro lado, los sensores y sistemas de navegación cuánticos, que dependen de la coherencia cuántica, pueden ser sensibles a perturbaciones del entorno y susceptibles a interferencias o suplantaciones. Esto podría ocasionar errores o fallos críticos durante misiones operativas. La computación cuántica, con su potencial para revolucionar áreas como la criptografía, la optimización logística y el procesamiento de señales, también presenta riesgos importantes, incluyendo la vulnerabilidad al ruido, ataques de canal lateral y los desafíos asociados a su integración con infraestructuras clásicas, sobre todo cuando se accede de forma remota. Estos riesgos son especialmente relevantes en contextos de defensa, donde la fiabilidad y la seguridad son imprescindibles. Las tecnologías cuánticas ofrecen un potencial considerable para reforzar el reconocimiento, la planificación y las comunicaciones seguras en operaciones multidominio. Sin embargo, es esencial mitigar sus vulnerabilidades para asegurar su preparación para el despliegue en la OTAN y evitar su explotación por actores hostiles. En este contexto, el trabajo llevado a cabo por el grupo de investigación IST-219 de la OTAN desempeña un papel clave. Los resultados de este estudio proporcionan información relevante sobre las oportunidades y limitaciones de las tecnologías cuánticas en el sector defensa, ofreciendo orientaciones clave para su implementación e integración seguras en sistemas militares.

La protección de una infraestructura crítica portuaria garantiza el desarrollo socioeconómico (DESEi+d, 2025: 212)

Beatriz García García (Universidad de Cantabria), Ana Pacheco Jiménez (Universidad de Cantabria) y Ernesto Madariaga Domínguez (Armada, RV).

La mayor parte de las instalaciones portuarias españolas están integradas en las propias ciudades. Esto es común en la mayor parte de los puertos europeos, ya que los puertos han nacido dentro de las ciudades. Al evolucionar y expandirse los puertos, las instalaciones portuarias industriales han salido de los entornos urbanos. Sin embargo, las estaciones marítimas de pasaje siguen estando en los núcleos urbanos integradas con zonas turísticas y de hostelería. La fuerte afluencia tanto de pasajeros como de mercancías principalmente rodadas obliga a reforzar los condicionantes que marca la legislación marítima internacional en protección marítima. Este estudio, que se basa en la Estación Marítima de Santander, aborda de manera integral tanto la seguridad de una infraestructura crítica como su impacto en el desarrollo turístico de una ciudad con creciente proyección internacional. El estudio parte de la premisa de que la protección física y cibernética de las instalaciones portuarias no solo garantiza la operatividad eficiente del tráfico marítimo de pasajeros, sino que también actúa como un elemento catalizador en la consolidación del Puerto de Santander como un destino seguro, atractivo y competitivo para el turismo marítimo nacional e internacional. Uno de los principales valores añadidos de este

trabajo es su énfasis en la relación directa entre seguridad portuaria y la percepción turística. En un contexto en el que la confianza es un factor determinante para la elección de destinos, disponer de un plan de protección robusto no solo minimiza los riesgos inherentes a este tipo de instalaciones, sino que también proyecta una imagen de ciudad preparada y orientada al bienestar del visitante. El estudio demuestra cómo la seguridad marítima, lejos de ser un aspecto meramente técnico, se convierte en una herramienta estratégica para el desarrollo socioeconómico de la ciudad de Santander como *hub* turístico del norte de España. El modelo de protección marítima contribuye a un desarrollo turístico sostenible y seguro, alineado con las demandas del siglo XXI, pudiendo ser reflejado a cualquier ciudad portuaria española.

Modernización y prevención de vulnerabilidades en aplicaciones críticas mediante migración con inteligencia artificial generativa (DESEi+d, 2025: 209)

José Zamora (CESN).

La creciente complejidad y las amenazas emergentes en los sectores de defensa y seguridad requieren una constante actualización y reforzamiento de las aplicaciones críticas. La migración de sistemas heredados, como aquellos desarrollados en lenguajes legados hacia plataformas modernas como Java o Python, se presenta como una estrategia esencial para mejorar la eficiencia operativa y la seguridad. En este proceso, la inteligencia artificial generativa (IAG) juega un papel fundamental al facilitar la transformación y optimización de estos sistemas.

– Desafíos en la migración de aplicaciones críticas: los sistemas COBOL, ampliamente utilizados en aplicaciones bancarias y gubernamentales, presentan desafíos significativos debido a su arquitectura obsoleta, documentación limitada y complejas dependencias. Estos factores dificultan la identificación y mitigación de vulnerabilidades, aumentando el riesgo durante la migración. Además, la escasez de profesionales con experiencia en estos lenguajes legados complica la actualización y mantenimiento de estos sistemas.

- Aplicación de la inteligencia artificial generativa en la migración: la IAG permite analizar exhaustivamente los sistemas existentes para identificar dependencias críticas y posibles vulnerabilidades. Esta tecnología facilita la generación de documentación precisa y actualizada, esencial para planificar y ejecutar la migración de manera efectiva. Asimismo, la IAG puede automatizar la refactorización del código, transformando estructuras obsoletas en arquitecturas modernas y seguras, alineadas con los estándares actuales de ciberseguridad.
- Beneficios de integrar IAG en la migración detección y prevención de vulnerabilidades: la IAG identifica proactivamente vulnerabilidades, permitiendo su mitigación antes de que sean explotadas, fortaleciendo la seguridad del sistema.
- Automatización y eficiencia: la automatización de la generación de código y documentación reduce significativamente el tiempo y los recursos necesarios para la migración, minimizando errores humanos y costes asociados.
- Generación automática de código para ensayos: el uso de IAG permite la generación automática de código fuente para la elaboración de emuladores y simuladores en todas las fases de *testing* para verificación y validación de aplicaciones informáticas.
- Adaptabilidad y escalabilidad: las soluciones basadas en IAG facilitan la adaptación a nuevas tecnologías y estándares, asegurando que las aplicaciones modernizadas sean escalables y sostenibles a largo plazo. La implementación de IAG debe ser gestionada cuidadosamente, contando con equipos multidisciplinarios que supervisen y validen las soluciones propuestas, garantizando su alineación con los objetivos estratégicos de la organización. Es crucial asegurar la transparencia y explicabilidad de los modelos de IAG para mantener la confianza en los procesos automatizados y cumplir con las regulaciones vigentes en materia de protección de datos y derechos fundamentales.

Optimización de PUFs para mejorar la autenticación de dispositivos en redes UAV (DESEi+d, 2025: 202)

Raúl Aparicio-Téllez (Universidad de Zaragoza), Miguel García-Bosque (Universidad de Zaragoza), Guillermo Díez-Señorans (Universidad de Zaragoza y Centro Universitario de la Defensa, CUD), Francisco Aznar (Universidad de Zaragoza y Centro Universitario de la Defensa, CUD) y Santiago Celma (Universidad de Zaragoza).

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) o drones son cada vez más utilizados en el ámbito de la defensa. Sin embargo, su funcionamiento en entornos abiertos y la transmisión de información a través de canales inseguros presentan desafíos significativos de seguridad. Verificar la identidad de los dispositivos que participan en una red UAV resulta fundamental para evitar posibles ataques, ya que las claves privadas almacenadas en los mismos pueden quedar expuestas.

Una solución a este problema radica en el uso de protocolos de autenticación basados en funciones físicamente no-clonables (PUFs). En estos casos, resulta fundamental que la PUF propuesta exhiba un buen rendimiento en términos de identificabilidad. Por este motivo, en este trabajo se propone e implementa una nueva estrategia para mejorar la identificabilidad de cualquier PUF basada en la técnica de medida compensada.

La estrategia propuesta se basa en el uso de un módulo optimizador que aplica una cierta transformación no lineal a los parámetros extraídos de

la fuente de entropía de la PUF antes de realizar las comparaciones para obtener cada bit de salida. Para demostrar su funcionalidad, este bloque se aplica a una PUF de oscilador en anillo (RO-PUF) implementada sobre una FPGA Artix 7 así como a distintos tipos de PUFs construidas a partir de bases de datos públicas. Los resultados indican que esta aproximación permite mejorar en gran medida la unicidad y la identificabilidad de las PUFs. De hecho, en algunos casos, la probabilidad de que se produzcan errores de falso rechazo y falsa aceptación simultáneamente durante el proceso de autenticación se ve reducido hasta en dos órdenes de magnitud, mejorando el proceso de autenticación del dispositivo.

Esta optimización no solo mejora la seguridad de las redes UAV, sino que también podría aplicarse en otros contextos donde la autenticación segura de dispositivos es crítica, como en el internet de las cosas (IoT) y en sistemas embebidos con restricciones de *hardware*.

PQC y QKD: una solución híbrida para la mejora de la seguridad en las comunicaciones en el ámbito militar (DESEi+d, 2025: 242)

Gonzalo Blázquez Gil (Instituto Tecnológico de Galicia) y Óscar González Represas (Instituto Tecnológico de Galicia).

El mundo, y las fuerzas armadas en particular, se enfrentan la llegada de computadoras cuánticas capaces de quebrar la criptografía clásica. Algoritmos cuánticos como Shor amenazan los sistemas de clave pública actuales (RSA, ECC), pudiendo descifrar comunicaciones sensibles. Además, no solo implica un peligro cuando se disponga de ordenadores cuánticos potentes si no que enemigos podrían estar almacenando comunicaciones cifradas actuales para descifrarlas en el futuro a través de la táctica *Harvest Now, Decrypt Later*.

Para contrarrestar estas amenazas, se exploran dos enfoques complementarios: la criptografía poscuántica (PQC), basada en nuevos algoritmos resistentes a computación cuántica, y la distribución cuántica de claves (QKD).

La distribución cuántica de claves (QKD) es una tecnología de cifrado que aprovecha fenómenos cuánticos (como la transmisión de fotones individuales) para intercambiar claves de cifrado de manera inviolable. Su función es, de forma exclusiva la distribución de claves simétricas (por ejemplo, para un cifrado tipo AES o *One-Time Pad*); ofrece seguridad teóricamente incondicional: cualquier intento de espionaje sobre

el canal cuántico altera los estados cuánticos y puede ser detectado por las partes legítimas. Por otro lado, la criptografía poscuántica se refiere a algoritmos criptográficos (de clave pública y firmas digitales) diseñados sobre problemas matemáticos que no pueden ser resueltos de manera eficiente por computadores cuánticos ni clásicos.

En este marco, se propone una estrategia híbrida aprovechando las capacidades de PQC para la seguridad a largo plazo y la tecnología QKD para el intercambio inmediato de claves. Las claves iniciales generadas por el QKD se utilizarían para cifrar las comunicaciones o documentos con algoritmos PQC para una seguridad a largo plazo contra futuros ataques cuánticos. Esta combinación permitiría, además, ofrecer una solución más segura a los procesos de autenticación y acceso a los documentos con información clasificada, de forma que cualquier acceso no autorizado a una documentación en tránsito, sea detectada y derive en una destrucción o eliminación del contenido.

A medida que estas tecnologías (PQC y QKD) se incorporan al arsenal criptográfico militar es necesario ir añadiendo estas estrategias de forma progresiva garantizando la interoperabilidad con los sistemas existentes, preparando a las fuerzas armadas para operar en un entorno donde la supremacía cuántica sea una realidad.

Reforzando las bases criptográficas en sistemas de defensa para la era poscuántica (DESEi+d, 2025: 256)

Carlos Abellan (Quside Technologies S. L.), Miquel Rude (Quside Technologies S. L.), Blanca Mir (Quside Technologies S. L.), Ismael Pérez (Quside Technologies S. L.), Marc Romeu (Quside Technologies S. L.), José Martínez (Quside Technologies S. L.), Waldimar Amaya (Quside Technologies S. L.) y Domenico Tulli (Quside Technologies S. L.).

La seguridad de la información en cualquier sistema de defensa moderno depende de una implementación criptográfica segura. Uno de los elementos esenciales de estos sistemas es la generación de entropía, también conocido como ruido o números aleatorios. Estos números aleatorios deben generarse puramente en *hardware* y se usan para crear semillas, claves y otro material criptográfico. Existen varias soluciones para la generación de entropía en el mercado aunque, desafortunadamente, pocas permiten una medición de calidad adecuada que cumpla con los requisitos más altos de seguridad, y que lo hagan a una velocidad y escalabilidad que sea compatible con las necesidades de los nuevos esquemas de seguridad cuántica (QKD), poscuántica (PQC) y de distribución simétrica de clave (SKEX), tanto en entorno terrestre como en otros entornos como el espacial.

Quside ha desarrollado distintas tecnologías de semiconductores durante los últimos diez años y, recientemente, ha presentado una nueva fuente de ruido cuántico-fotónica que explota ruido de polarización en láseres

de emisión vertical (VCSELs). Mediante un esquema de modulación de ganancia, este sistema con láseres VCSELs es capaz de generar pulsos de polarización aleatoria a más de 50 Mbit/s con un esquema físico integrado que se compone únicamente de un láser, un polarizador y un fotodetector. Además, gracias a la alta adopción de este tipo de láseres en entornos como los centros de datos o la automoción, se abre un rango operativo extendido, habilitando la penetración de estas tecnologías en infraestructura ya desplegada.

En esta ponencia, se presentan los últimos avances de esta nueva tecnología para la generación de números aleatorios con VCSELs, además de resultados recientes en la cointegración de fuentes cuánticas de ruido con electrónica analógica-digital. Se presentarán distintos casos de uso en criptografía poscuántica, en la generación de claves, en criptografía cuántica o QKD, y también los siguientes pasos para la calificación de estas tecnologías para entornos de espacio y en diseños avanzados de raíces de confianza (*Root of Trust*). Todos estos desarrollos pueden tener un gran impacto en reforzar la seguridad y resiliencia de los sistemas digitales en entornos de defensa y alta seguridad.

Escenario de alta seguridad en MadQCI-UPM (DESEi+d, 2025: 285)

Laura Ortíz (UPM), Alberto Sebastián-Lombraña (UPM), Marta I. García-Cid (UPM) y Vicente Martín (UPM).

En la red cuántica de Madrid (MadQCI-UPM) se ha desplegado un escenario específico para investigar cómo introducir los requisitos tanto tecnológicos como de concepto de un escenario de alta seguridad. Aunque la criptografía cuántica es ya casi comercial, adoptar esta tecnología en escenarios de defensa no es un ejercicio trivial. Este tramo de la red conectará el CETSE (Centro Tecnológico de Seguridad), el centro espacial INTA Torrejón e INTA La Marañosa con una solución cuántica de vanguardia: la distribución cuántica de clave independiente del dispositivo de medida (MDI). Esta modalidad de criptografía cuántica permitirá aislar del resto de la red cuántica de Madrid este escenario con una confianza incondicional. Los tres nodos podrán así sostener comunicaciones seguras entre ellos. Además de la tecnología cuántica, se ha dotado a este escenario con equipos certificados CPSTIC: sistemas informáticos TEMPEST, módulos de seguridad *hardware* de nivel tres (FIPS-140-2), equipos de comunicaciones ópticas con inspección de las fibras (OTDR) y cifradores grado EU RESTRICTED y OTAN. Este escenario de red permitirá sostener, además, múltiples demostradores relacionados con la transferencia de información sensible, la interceptación legal o la gestión segura de clave criptográfica. La incorporación del nodo INTA ESPOL,

además, permitirá ensayar accesos remotos a esta infraestructura de alta seguridad. La elección de puntos de presencia para este escenario, dedicado a la investigación, ha conseguido que este demostrador esté mucho más cercano a un despliegue real que en otras ocasiones.

ÁREA 13
Sociedad, economía y humanidades

¿Se evaluan bien los criterios de valoración en una licitación pública? Propuesta de un nuevo método de apoyo a la decisión utilizando AHP para evaluar los criterios de valoración de un PCAP (DESEi+d, 2025: 13)

Carlos Ruiz (CUD Zaragoza), Elvira Navarro (CUD Zaragoza), María Victoria Sebastián (CUD Zaragoza), Lourdes Martínez de Baños (CUD Zaragoza) y Francisco José Trujillo Pacheco (CUD Zaragoza).

El objetivo principal de esta comunicación es presentar un nuevo método de apoyo a la decisión a la Dirección General de Contratación (DIGENECO) del Ministerio de Defensa que facilite la selección del candidato más idóneo en las contrataciones públicas en las Fuerzas Armadas (FF. AA.), es decir, que haya presentado la oferta con la mejor relación calidad/precio. El proceso propuesto se realiza aplicando el método científico y bajo un punto de vista técnico matemático, siempre dentro del marco legal; además, este método será capaz de adaptarse a la mayoría de situaciones y tipos de contrato que tienen lugar en el Ministerio de Defensa. Con la entrada en vigor de la Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público (LCSP), por la que se transponen al ordenamiento jurídico español las Directivas del Parlamento Europeo y del Consejo 2014/23/UE, de 26 de febrero de 2014, la Unión Europea dio por concluido un proceso de revisión y modernización de las normas sobre

contratación pública. Los criterios de valoración de las ofertas para dicha contratación pública son el elemento clave que definirán la selección de un licitador u otro como adjudicatario de un determinado contrato. El estudio y definición de estos, así como su correcta aplicación conforme se establece en la nueva LCSP, será de gran ayuda para los órganos de contratación de las FF. AA. que velarán por gestionar el presupuesto público de la manera más justa y transparente posible. En esta línea de investigación se ha enfocado el presente trabajo, que pretende realizar un análisis de las bondades y vulnerabilidades de las fórmulas de normalización matemáticas que más se utilizan en los pliegos de cláusulas administrativas particulares (PCAP) para valorar los criterios cuantitativos (objetivos), así como proponer un método de decisión multicriterio, *Analytic Hierarchy Process* (AHP) de Thomas Saaty, como herramienta de ayuda a la decisión para los expertos, en aras de evaluar y cuantificar de forma consistente los criterios cualitativos (subjetivos) de ese PCAP. Las conclusiones del trabajo resaltan la existencia de posibles mejoras en los procedimientos actuales de contratación pública en las Fuerzas Armadas. Se propone un modelo científico-matemático para mejorar la eficiencia y efectividad de los procedimientos actuales, contribuyendo así a una mejor gestión de los recursos públicos y a la selección de la oferta que suponga la mejor opción.

Analyzing the impact of geopolitical risk and economic policy uncertainty on defence spending in Spain (DESEi+d, 2025: 89)

Javier Ordóñez Monfort (Universidad Jaume I) y Antonio Fonfría Mesa (Universidad Complutense de Madrid).

The increasing frequency and intensity of geopolitical shocks, along with the heightened uncertainty associated with economic policy, highlights the need to understand how these factors affect defence spending in Spain. In this paper, we analyze the relationship between the Geopolitical Risk (GPR) Index, the Economic Policy Uncertainty (EPU) Index, and the defence spending in Spain. The methodology relies on a hierarchical Bayesian Vector Autoregressive (BVAR) model incorporating a combination of informative priors. The results from the impulse-response analysis suggest that neither the EPU nor the GPR has a significant effect on defense spending. Moreover, based on the results of the variance decomposition, the joint contribution of these variables does not explain more than 10% of the variance in defense spending. As a result, the historical decomposition analysis allows us to conclude that shocks to the EPU and GPR have a very limited explanatory power regarding the historical behavior of defense spending, which is primarily driven by its own shocks. Finally, two scenarios are simulated. In the first, the GPR is held at its highest historical value for five years; in the second, it is the EPU that is maintained at its maximum historical level. In both scenarios,

defense spending increases, but not significantly, making it impossible to distinguish the scenario in which the EPU and GPR are stressed to their maximum levels from the baseline scenario with normal historical values. It cannot be concluded, therefore, that either uncertainty factors or geopolitical factors have historically played a relevant role in determining the budget allocation to the armed forces in Spain. These are essential aspects to understand the problems of the Spanish defense policy and, particularly, of the defense industrial policy.

Desde la detección de una amenaza hasta el desarrollo de programas formativos. El caso de la ciberseguridad en dos países europeos: España y Francia (DESEi+d, 2025: 6)

María Pilar Doñate Sanz (Doctora en Seguridad Internacional).

La ciberseguridad se ha convertido hoy en día en una de las principales líneas de actuación en el ámbito de la seguridad y la defensa, aunque la detección de ciberataques a infraestructuras críticas o ciberdelincuencia, entre otros, data de hace más de dos décadas. En efecto, a nivel europeo ya en 2004 se creó la Agencia de la Unión Europea para la Ciberseguridad (ENISA), cuyo propósito principal es garantizar la seguridad de los ciudadanos en el entorno digital de la Unión Europea. De su parte, tanto España como Francia han tomado medidas en diferentes campos, incluyendo la ciberseguridad en sus textos estratégicos o elaborado estrategias dedicadas exclusivamente a la ciberseguridad. En esta línea también han creado centros especializados en la materia, véase por ejemplo el Instituto Nacional de Ciberseguridad en 2014 (INCIBE, antiguo Instituto Nacional de Tecnología de la Comunicación) o, en el caso francés, *L'Agence Nationale de la Sécurité des Systèmes d'Information* (ANSSI) en 2009. Sin embargo, la creación de programas formativos en la educación formal empieza a desarrollarse recientemente. En efecto, España aprueba los Reales Decretos 478 y 479 en 2020 para el establecimiento

del curso de especialización de Formación Profesional en ciberseguridad en entornos de las tecnologías de operación y tecnologías de la información respectivamente, pudiendo ser cursado en un grado superior al cual se accede entre los dieciocho y diecinueve años. De su parte, Francia aprueba un decreto el 13 de febrero de 2023 para la creación de la especialidad «ciberseguridad, informática y red, electrónica», una formación incluida en el bachillerato profesional a la que se tiene acceso tras el curso de tercero, es decir, alumnos entre los catorce y los quince años. Por lo tanto, el propósito de este estudio es mostrar, en primer lugar, que tanto en España como Francia, dos países europeos, han transcurrido una media de dos décadas antes de adaptar la formación en ciberseguridad del alumnado no universitario y, en segundo lugar, que la edad de acceso a dicha formación es diferente según el país, pudiendo acceder a una edad más temprana en Francia que en España.

Liderazgo de servicio, identidad grupal y capital psicológico positivo en organizaciones de defensa y seguridad (DESEi+d, 2025: 28)

Carlos García-Guiu (Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar), Francisco Trujillo (Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar), Nerea Vadillo (Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar), Juan Pavón (Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar), Agustín Albesa (Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar) y Asun Cano (Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar).

El Liderazgo de servicio constituye para las instituciones y organizaciones al servicio de la comunidad, especialmente en defensa y seguridad, un modelo de interés para entender el liderazgo basado en el desarrollar al subordinado, favorecer el compromiso y eficacia en el desempeño de su trabajo. Partiendo de los desarrollos iniciales establecidos por Greenleaf, impulsados por los actuales desarrollos de la psicología positiva, sus principales señas de identidad se basan en desarrollar las capacidades de las personas a participar en el crecimiento colectivo a través de valores como el compromiso, el apoyo emocional, el sacrificio y el empoderamiento de los seguidores. La presente comunicación tiene por objeto el analizar los efectos del estilo de liderazgo de servicio con la identificación grupal y el capital psicológico positivo de una unidad militar en el marco de la enseñanza de oficiales del Ejército de Tierra. La muestra de la investigación

está constituida por 435 cadetes de segundo y tercer curso del Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar de Zaragoza que participan en un proyecto de investigación en la que se estudia la influencia del estilo de liderazgo de servicio sobre diferentes variables psicosociales de resultado como identificación organizacional, el capital psicológico positivo, la eficacia grupal, el compromiso, la cohesión o la inteligencia emocional. Los resultados que se analizan en la presente comunicación se fundamentan en un modelo estadístico de regresión lineal entre los diferentes factores que constituyen el liderazgo de servicio, la identificación organizacional y el capital psicológico positivo. Los factores asociados al liderazgo de servicio, que pueden ser tratados como competencias son las de tipo personal: habilidades conceptuales y comportamiento ético; competencias de tipo social: apoyo emocional, empoderamiento, ayudar a crecer a los seguidores y anteponer a los colaboradores; y competencias que fomentan la cultura de servicio: crear valor para la comunidad. Todas ellas permiten establecer diferentes conclusiones de tipo relacional de la variable resultante analizada. Los resultados confirmatorios y significativos de las relaciones del liderazgo de servicio en el ámbito de la formación superior con variables de interés para las organizaciones de defensa y seguridad, como son la identificación organizacional, el capital psicológico positivo, la eficacia grupal, la cohesión de unidad, el compromiso y la Inteligencia emocional destacan la importancia de investigar y aplicar las conclusiones obtenidas a las prácticas docentes y la consideración para su empleo en la formación de los líderes en el ámbito de la enseñanza militar.

Implementación y evaluación de metodologías activas híbridas para la formación en competencias técnicas en el ámbito de la defensa y seguridad (DESEi+d, 2025: 137)

María Luisa Pérez-Delgado (Universidad de Salamanca) y María Concepción Vega Hernández (Universidad de Salamanca).

La formación en competencias técnicas dentro del ámbito de la defensa y seguridad requiere metodologías pedagógicas que fomenten la participación activa del alumnado, la aplicación práctica del conocimiento y el desarrollo de habilidades para la resolución de problemas en contextos reales o simulados. En este marco, la innovación docente, a través de la implementación de metodologías activas y la integración de entornos virtuales, representa una estrategia con alto potencial para mejorar la calidad y la eficacia de del proceso formativo. Este trabajo propone el diseño, la implementación y la evaluación de un modelo de enseñanza híbrido que combina actividades presenciales y virtuales, integrando metodologías activas como el aprendizaje basado en proyectos, el estudio de casos, la gamificación y la simulación interactiva. El objetivo principal es analizar el impacto de esta aproximación pedagógica innovadora en el desarrollo de competencias técnicas específicas, así como en la motivación y el compromiso del estudiantado en contextos de formación vinculados a la

defensa y la seguridad. Se plantea la incorporación de herramientas digitales y plataformas virtuales que faciliten la puesta en práctica de estas metodologías activas, incluyendo el diseño de recursos interactivos, la creación de entornos de simulación virtual, el desarrollo de sistemas de retroalimentación automatizada y el uso de plataformas de gestión del aprendizaje para la organización y el seguimiento de las actividades. Para evaluar la efectividad del modelo híbrido implementado, se diseña una metodología basada en el análisis estadístico de variables como el rendimiento académico, la participación activa y la percepción del alumnado. Se recopilan datos cuantitativos y cualitativos sobre la satisfacción, la utilidad percibida de las metodologías empleadas y el desarrollo de las competencias técnicas objetivo. Asimismo, se identifican fortalezas y áreas de mejora, comparando los resultados con aquellos obtenidos mediante metodologías docentes más tradicionales. Los resultados de esta investigación ofrecerán información valiosa para la mejora de las prácticas educativas en la formación técnica del ámbito de la defensa y seguridad. Se espera evidenciar que la implementación de metodologías activas híbridas puede aumentar el compromiso de los estudiantes, facilitar la adquisición de competencias prácticas y promover un aprendizaje más significativo y duradero. Además, el trabajo ofrecerá un modelo replicable y adaptable para otras áreas de formación dentro del sector.

Simulación estratégica de seguridad y defensa en la OTAN: innovación docente aplicada al aprendizaje activo en contextos militares (DESEi+d, 2025: 290)

Daniel Gracia Pérez (Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza).

Esta comunicación presenta una experiencia de innovación docente basada en una simulación estratégica de crisis, estructurada conforme al modelo de planificación y gestión de la OTAN. La propuesta se ha desarrollado en el marco del CUD-AGM, dentro de la convocatoria de proyectos de innovación docente, con el objetivo de fomentar el aprendizaje activo y el desarrollo de competencias clave entre los futuros oficiales del Ejército de Tierra. La actividad se articula en torno a un *role-play* inmersivo en el que los estudiantes asumen distintos roles dentro de la estructura de mando de la OTAN, enfrentándose a escenarios realistas de crisis en regiones como Europa, África, Oriente Próximo y el Ártico. A lo largo de varias fases, que incluyen sesiones teóricas, elaboración de planes de acción y simulaciones en tiempo real, los alumnos aplican sus conocimientos a situaciones dinámicas, desarrollando habilidades de liderazgo, toma de decisiones, análisis geopolítico y trabajo en equipo. La innovación de esta propuesta reside en su enfoque metodológico, que combina simulación, aprendizaje colaborativo y estudio de casos para ofrecer una experiencia formativa integral. Frente a enfoques tradicionales de

carácter teórico, esta simulación permite una aproximación experiencial a los procesos de toma de decisiones en contextos complejos de seguridad y defensa, utilizando herramientas y estructuras propias del entorno profesional internacional. Los resultados esperados incluyen una mayor implicación del alumnado, una mejora significativa en la comprensión de los mecanismos estratégicos de defensa y el desarrollo de competencias transversales esenciales en el ámbito militar. La evaluación del impacto se realiza mediante encuestas, pruebas diagnósticas y análisis del desempeño en las simulaciones. Por último, la actividad presenta un alto potencial de transferencia y continuidad, siendo replicable en futuras ediciones y adaptable a otros contextos académicos o colaborativos. Su integración en la estrategia docente del CUD-AGM refuerza el compromiso de la institución con la formación de excelencia y el uso de metodologías activas, alineadas con los desafíos contemporáneos de la seguridad internacional.

Identificación de tipos de combustible forestal en el CENAD San Gregorio mediante sensores satelitales activos y pasivos (DESEi+d, 2025: 216)

Alberto García-Martín (Centro Universitario de la Defensa de la Academia General Militar), Darío Domingo Ruiz (Deparmento de Geografía, Universidad de Valladolid), María Teresa Lamelas Gracia (Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza), Antonio Luis Montealegre Gracia (Centro Universitario de la Defensa de la Academia General Militar) y Juan Ramón de la Riva Fernández (Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza).

Los incendios forestales son uno de los factores de perturbación más importantes en los ecosistemas mediterráneos. Además, en las últimas décadas, su recurrencia, magnitud y severidad han aumentado de forma significativa. A la hora de evaluar el riesgo de incendio en un territorio, resulta fundamental considerar las actividades que se desarrollan en él. Por esta razón, los centros de adiestramiento (CENAD) y los campos de maniobras y tiro (CMT) cuentan con un plan contra incendios forestales (PCIF) y un protocolo operativo de actuación (POA).

El combustible forestal es el único componente del paisaje relacionado con el fuego que puede modificarse mediante gestión. Por ello, es relevante conocer su distribución tanto para la evaluación del riesgo de incendio

como para el diseño e implementación de estrategias de prevención. A este respecto, la teledetección satelital se posiciona como una herramienta clave para la caracterización del combustible forestal, ya que ofrece una cobertura amplia, sistemática y continua del territorio, superando en eficiencia y alcance a los métodos tradicionales de trabajo en campo.

El objetivo de este trabajo es analizar si la combinación de imágenes adquiridas por los satélites Sentinel-1 y PAZ (equipados con un sensor activo radar), junto con imágenes satelitales de Sentinel-2 (equipado con un sensor pasivo óptico), permite obtener cartografía de tipos de combustible adecuada para apoyar el PCIF y el POA del Centro de Adiestramiento de «San Gregorio», situado en Zaragoza. La metodología se dividió en tres fases: 1) la identificación de parcelas de campo válidas para ser relacionadas con las imágenes; 2) el procesamiento de las imágenes adquiridas de forma coetánea al trabajo de campo; y 3) la clasificación digital de las imágenes mediante los modelos no paramétricos *Support Vector Machine* y *Random Forest*.

Los resultados muestran que, dentro de los sensores activos, solo la banda HV de Sentinel-1 puede contribuir a obtener modelos operativos al mismo nivel que las bandas e índices derivados de las imágenes Sentinel-2, con un coeficiente de correlación de Spearman de 0,86. Respecto a los métodos de clasificación, *Support Vector Machine* se identifica como el más adecuado cuando se incluyen tres o cuatro variables independientes. Para asegurar la parsimonia del modelo, la cartografía final del área de estudio se derivó a partir de un modelo con tres predictores (*Brightness*, ARVI y RDVI), alcanzándose una precisión global de 0,79 y un coeficiente Kappa de 0,74.

Tipos de liderazgo a través de héroes de la historia militar española (DESEi+d, 2025: 14)

Francisco Trujillo Pacheco (Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza), María Pilar Belenguer Dávila (Academia General Militar), Carlos Ruiz López (Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza), Carlos Redondo Gil (Academia General Militar), Antonio Martínez de Baños Martínez de Morentín (Academia General Militar), José Castro Milla (Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza) y Félix Ayllón Andrés (Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza).

El estudio del liderazgo ha dado lugar a una gran cantidad de investigaciones que buscan explicar los diferentes modelos de liderazgo y determinar cuál sería el más adecuado, enfocándose en identificar las cualidades o características que deben poseer los líderes para generar un impacto positivo en sus subordinados. Además, estos estudios exploran qué habilidades son necesarias para ejercer un liderazgo eficaz y si dichas habilidades son innatas o pueden adquirirse con el tiempo. A lo largo de la historia y en cada época, es posible identificar figuras destacadas que ejemplifican diversos tipos de liderazgo, como el liderazgo de rasgos, conductual, situacional o las teorías más actuales de liderazgo transformacional, auténtico, ético o de servicio. Los héroes históricos son personas que se distinguen por su valor y coraje, capaces de enfrentarse con éxito a grandes desafíos. El trabajo analiza el tipo de liderazgo de héroes de la historia militar española que lograron inspirar, guiar e influir en sus subordinados, protagonizando hazañas heroicas que han quedado grabadas en los anales

de la historia. Su contribución a la historia ha tenido un impacto trascendente. Aunque el contexto social o cultural sea cambiante, el héroe de la historia militar, en este caso, ejerce una influencia que perdura más allá del momento histórico en que tuvo lugar su acción heroica. Para la ejecución del trabajo se ha realizado un análisis descriptivo, de correlación y de regresión, utilizando un *software* de análisis cualitativo de datos, MXQDA, con el que se ha organizado, codificado y categorizado datos cualitativos extraídos de documentos bibliográficos de la época. Con la codificación de datos se han asignado etiquetas a los tipos de liderazgo que ejercían los héroes analizados. Esto ha permitido detectar patrones de comportamiento. Por último, se ha realizado una correlación entre los tipos de liderazgo y los momentos históricos en que tuvieron lugar las distintas acciones heroicas. El presente estudio permite orientar diferentes líneas de investigación, así como apuntar distintas áreas de interés que posibiliten el desarrollo de la interrelación en las competencias del liderazgo y de la historia, y su influencia en la formación de oficiales en el ámbito del Ejército de Tierra español.

Más allá de la teoría: liderazgo aplicado en la Academia General Militar (DESEi+d, 2025: 19)

Francisco Trujillo Pacheco (Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza), Nerea Vadillo Bengoa (Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza), Carlos García-Guiu López (Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza), Juan Pavón Coto (Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza), Asunción Cano Escoriaza (Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza) y Agustín Albesa Cartagena (Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza).

El liderazgo constituye una de las principales áreas en la formación militar de los futuros oficiales en el Centro Universitario de la Defensa en Zaragoza. Los caballeros alféreces cadetes de cuarto curso asumen por primera vez el mando de pelotón sobre sus compañeros de primer curso. Este trabajo tiene como objetivo describir una práctica en la que los alumnos deberán familiarizarse con los estilos de mando según la teoría de Lewin. A través de un enfoque empírico, se demostrará la validez de dicha teoría, concluyendo cuál de los estilos de mando produce los mejores resultados en una tarea sencilla, en la que el jefe se encuentra presente. Este será el estilo de mando que los alféreces deberían adoptar como el más efectivo durante la instrucción. Para este estudio, la muestra de 234 cadetes se ha organizado en seis secciones orgánicas. La práctica consiste en una competición en la que se evalúa qué sección ejecuta de manera más eficiente el movimiento de orden cerrado «sable a

la funerala», aplicando los tres estilos de liderazgo definidos por Lewin. Para ello, los líderes han sido entrenados en estos enfoques. Al finalizar la práctica, se han realizado doce entrevistas en profundidad: seis a los que desempeñaron el rol de jefes y seis a los subordinados, con el fin de conocer sus reacciones. Posteriormente, se analizaron los videos grabados por el equipo. El estudio revela que el estilo de liderazgo autocrático es el más efectivo para la ejecución del movimiento de orden cerrado, seguido del estilo democrático, que mostró un desempeño intermedio debido a su enfoque participativo. El estilo liberal obtuvo los peores resultados. Se concluye que, para tareas que exigen disciplina y coordinación estrictas, un liderazgo directivo resulta más adecuado.

Caso de éxito para la creación de una Oficina de Gestión de Proyectos TIC aplicable a defensa y seguridad (DESEi+d, 2025: 87)

Beatriz Olalla Caballero (ISDEFE), David Díaz Martín (ISDEFE) y Mariano Gómez Plaza (ISDEFE).

En el presente trabajo se expone la estrategia adoptada con el objetivo de implantar una Oficina de Gestión de Proyectos (OGP) de Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC) de diversa índole (suministros tecnológicos descentralizados, digitalización, desarrollo de aplicaciones, adquisiciones de licencias, y algunas tipologías específicas de servicios TIC), en los que participan áreas tanto de informática como de otros ámbitos funcionales, y múltiples proveedores.

A lo largo de este trabajo se describe la metodología y modelo de gobierno que sustenta y da soporte a la gestión de proyectos de esta oficina. Asimismo, se enumeran las consideraciones, observaciones, lecciones aprendidas y aspectos relevantes considerados para definirla, ponerla en marcha y mantenerla operativa a lo largo del tiempo, introduciendo las mejoras y actualizaciones que puede ir requiriendo.

Se recopila la planificación, fases, pasos e hitos significativos que se han planteado para su definición e implantación, y se acompaña de la identificación de los factores que han permitido garantizar la puesta en marcha y el mantenimiento de la OGP para superar las dificultades en

cada una de las fases y planteando diversos retos en el contexto particular de los proyectos TIC.

Se recogen, además, los mecanismos, herramientas y agentes facilitadores seleccionados para acompañar durante toda esta definición e implantación de la OGP.

A modo de conclusión del trabajo, se recopilan los factores críticos de éxito que han impulsado la definición e implantación de esta OGP, y que pueden adoptarse como guía del éxito en la implantación de una OGP de estas características en defensa y seguridad.

La integración de la metodología y un marco de gobierno adecuado como los descritos en el caso de éxito de la OGP son clave para optimizar la operativa y los resultados obtenidos, y para tener en cuenta,, por ejemplo en los procesos de relación y producción de la cadena de suministro, tan crítica y relevante en el sector de defensa. Al establecer estándares y procedimientos claros, se facilita no solo la coordinación entre los diferentes actores involucrados, lo cual asegura una mayor transparencia y eficacia, sino también permite adaptarse a los cambios de manera rápida y eficiente, lo que consigue mejorar la toma de decisiones y reduciendo riesgos. Asimismo, el modelo de gobierno implantado garantiza la alineación con los objetivos estratégicos. En conjunto, estas prácticas impulsan la competitividad y la seguridad en un entorno tan complejo y dinámico como es el ámbito de defensa.

ÁREA 14
Eficiencia energética y sostenibilidad

Modelo de optimización con variables binarias para la obtención de trayectorias de mínimo consumo (DESEi+d, 2025: 22)

Débora Cores Carrera (Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar Marín).

La optimización de trayectorias de consumo eficiente en la navegación es fundamental para reducir costes operativos y minimizar las emisiones de CO_2, contribuyendo así a la protección del medioambiente. En este trabajo, se propone modelar la trayectoria óptima de navegación como un problema de optimización, donde se busca minimizar la distancia recorrida y, en consecuencia, el consumo de combustible. Para ello, el espacio marítimo se representa mediante una cuadrícula discreta de puntos o nodos, en la que cada nodo se conecta con hasta ocho vecinos adyacentes, salvo en los bordes, donde las conexiones varían entre tres, cinco u ocho según la posición del nodo. Sobre esta estructura, se generan trayectorias factibles que conectan el puerto de origen con el puerto de destino. La trayectoria óptima se define como aquella que minimiza la distancia total entre todas las rutas posibles. En este enfoque, cada trayecto entre dos nodos se modela mediante una variable binaria: toma el valor de uno (1) si forma parte de la ruta óptima y cero (0) en caso contrario. Además, el modelo incorpora restricciones para evitar la intersección con obstáculos en el espacio marítimo. Dado su carácter binario, la resolución del modelo requiere

métodos específicos de optimización. La efectividad de esta propuesta se evaluará mediante la determinación de rutas óptimas para distintas ubicaciones en el mapa global.

Producción de combustibles estratégicos para las Fuerzas Armadas a partir de NFU: Un modelo para la resiliencia energética y la defensa nacional (DESEi+d, 2025: 54)

Esteban José Jiménez Regén (Escuela Politécnica Superior del Ejército), Antonio Cantero Obregón (Escuela Politécnica Superior del Ejército), Alejandro Fernández Arteaga (Universidad de Granada), Francisco Javier Bastante Flores (Ejército de Tierra), Miguel Carmona (Universidad de Córdoba) y Juan Bautista Ruíz-Yherla (Escuela Politécnica Superior del Ejército).

La gestión de residuos en el ámbito militar representa un desafío estratégico que va más allá del cumplimiento normativo y ambiental. Los neumáticos fuera de uso (NFU) provenientes de vehículos militares, debido a sus características específicas —como una mayor resistencia estructural y tamaño—, se convierten en un recurso clave para abordar problemas asociados con la sostenibilidad y la autonomía operativa de las Fuerzas Armadas. En un escenario global marcado por la inestabilidad geopolítica, la competencia por recursos energéticos y la transición hacia una economía circular, la revalorización de estos NFU, adquiere una relevancia estratégica crucial para la producción de combustibles específicos como el F-34 (combustible de aviación militar), F-54 (gasoil militar) y F-76 (combustible naval). Este designio, propone un modelo de revalorización de NFU militares basado en procesos de pirólisis y refinación, con

el objetivo de generar combustibles propios que permitan garantizar la autonomía energética de las Fuerzas Armadas españolas. La capacidad de producir combustibles para aviación, vehículos terrestres y embarcaciones militares directamente a partir de residuos militares no solo reduce la dependencia de fuentes externas, sino que también refuerza la resiliencia logística en escenarios de conflicto bélico, donde el acceso al suministro energético pueda estar comprometido. Además, la implementación de esta solución está alineada con los principios de sostenibilidad y economía circular, contribuyendo a la reducción de la huella ambiental de las operaciones militares. Este enfoque posiciona a España como un referente en innovación tecnológica aplicada al sector defensa, fortaleciendo su capacidad de respuesta en un entorno global de alta incertidumbre y competencia estratégica. El artículo abordará la caracterización fisicoquímica y térmica de los NFU militares, su potencial como materia prima energética, y el diseño técnico de una planta de valorización adaptada a este tipo de residuo. Además, se analizará la viabilidad operativa y económica del modelo, así como sus impactos ambientales, con el fin de establecer una conexión directa entre sostenibilidad operativa, resiliencia logística y necesidades estratégicas de defensa en el siglo XXI.

Estudio de velas aeronáuticas para aplicaciones navales (DESEi+d, 2025: 64)

Estela Barroso Barderas (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), Juan Carlos Matías García (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), Jaime Fernández Antón (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) y Rafael Bardera Mora (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial).

En el contexto actual de creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental, uno de los principales desafíos a los que se enfrenta la industria naval es el de reducir el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes durante sus operaciones. El uso de velas rígidas como solución innovadora aprovecha la energía eólica para reducir emisiones de CO_2, lo que permite optimizar la eficiencia energética de los buques. Integrando tecnologías de energías renovables en un sector históricamente intensivo en carbono, se contribuye de forma activa a la sostenibilidad y a la reducción del impacto ambiental del transporte marítimo. El estudio se centra en el análisis del rendimiento aerodinámico de este tipo de velas en buques tipo mercante, con el objetivo de disminuir la dependencia de sistemas de propulsión convencionales basados en combustibles fósiles. A diferencia de las velas de embarcaciones tradicionales, estas estructuras rígidas están diseñadas siguiendo perfiles similares a los de las alas de aeronaves, permitiendo generar sustentación que se traduce en fuerza propulsiva para la embarcación, incluso con vientos aparentes desfavorables. Mediante simulaciones numéricas por medio de

software CFD, se estudia el rendimiento de distintas configuraciones de velas rígidas empleando perfiles Eppler en condiciones operativas representativas del entorno marítimo. Asimismo, se consideran aspectos clave como la posición de las velas en la cubierta del buque, la orientación de estas respecto a la corriente incidente sobre la embarcación, así como las posibles interferencias que pudieran existir entre las propias velas. Los resultados preliminares indican un potencial significativo de reducción del consumo de combustible. En algunos casos, se obtiene una reducción cercana al 60 % de la fuerza de resistencia al avance generada por el buque, lo cual conlleva una importante contribución a la descarbonización del transporte marítimo.

Evaluación y optimización de la gestión de residuos sólidos en las fragatas F-100 de la Armada española (DESEi+d, 2025: 73)

Leticia Pérez-Rial (Centro Universitario de la Defensa de Marín CUD, Escuela Naval Militar, Plaza de España s/n, 36920, Marín), Rocío Maceiras (Centro Universitario de la Defensa de Marín CUD, Escuela Naval Militar, Plaza de España s/n, 36920 Marín), Guillermo Aycart (Armada española), Víctor Alfonsín (Centro Universitario de la Defensa de Marín CUD, Escuela Naval Militar, Plaza de España s/n, 36920, Marín), Iván Garrido (Centro Universitario de la Defensa de Marín CUD, Escuela Naval Militar, Plaza de España s/n, 36920, Marín) y Jorge Feijoo (Centro Universitario de la Defensa de Marín CUD, Escuela Naval Militar, Plaza de España s/n, 36920, Marín).

El transporte marítimo representa el principal medio de comercio a escala global, con más del 90 % del movimiento de mercancías efectuado por mar a través de una flota mundial que supera los noventa mil buques. Esta intensa actividad conlleva la generación de una cantidad significativa de residuos que, en ausencia de una adecuada gestión, puede provocar impactos severos en los ecosistemas marinos. En este contexto, la Armada española, con una flota diversa y en constante operación, constituye un referente potencial en la aplicación de buenas prácticas medioambientales. El presente trabajo aborda la identificación y cuantificación de los residuos sólidos generados a bordo de las fragatas F-100, una de las clases de buques más representativas de la Armada. A partir de datos

obtenidos durante operaciones habituales, se ha estimado una producción diaria aproximada de 300 kg de residuos sólidos por jornada de navegación. De esta cantidad, destaca la fracción orgánica, que representa cerca del 87% del total. Estos residuos son habitualmente triturados y vertidos al mar de acuerdo con las directrices del convenio MARPOL. Por su parte, los residuos inorgánicos, principalmente papel y plástico, son tratados mediante compactación o incineración a bordo, y eliminados, más adelante, en instalaciones portuarias autorizadas. Además del diagnóstico de la situación actual, el estudio incorpora la evaluación de un sistema alternativo de tratamiento de residuos sólidos aplicable a las fragatas F-100. Este sistema permitiría una notable reducción del volumen de residuos generados, pasando de los 1,21 m^3 actuales por día de navegación a tan solo 0,018 m^3. El análisis económico realizado indica que la implantación de este sistema tendría un coste estimado de 166 200 €, lo que se considera razonable en función de los beneficios operativos y medioambientales que aportaría. Los resultados obtenidos permiten no solo una mejor comprensión de la gestión de residuos en buques militares, sino también la formulación de propuestas concretas de mejora sostenibles y replicables en otras unidades de la flota.

Estructura de las membranas de intercambio aniónicas y mecanismo de difusión (DESEi+d, 2025: 91)

Gerard Novell-Leruth (Centro Ibérico de Investigación en Almacenamiento Energético CIIAE) y Rodrigo García-Muelas (Centro Ibérico de Investigación en Almacenamiento Energético CIIAE).

La hidrólisis del agua es una tecnología fundamental para almacenar energía renovable en forma de enlaces químicos, de manera específica hidrógeno (H_2). El hidrógeno verde producido a partir de exceso de electricidad renovable puede servir tanto como combustible y vector energético como para descarbonizar la industria química, destacando la importancia de desarrollar tecnologías de hidrógeno verde dentro de la Unión Europea. Un electrolizador que produce hidrógeno se denomina «hidrogenerador», y su núcleo se compone de dos electrodos y una membrana, cuya naturaleza determinan el tipo de tecnología. En la actualidad, hay dos tipos de hidrogeneradores de membrana dependiendo del medio que utilizan: los de medio ácido con membranas tipo PEM y los de medio básico con membranas tipo AEM. Los electrolizadores de medio alcalino permiten trabajar a mayor temperatura y no requieren materiales nobles. Cómo tal, presentan una gran oportunidad para que el sector energético español sea independiente de influencias externas. Además, los de intercambio iónico (AEM) no contienen compuestos organofluorados como el NAFION®. El CIIAE es un centro de investigación centrado en este

polo estratégico que es la energía, siendo el hidrógeno uno de los departamentos de este centro. Este trabajo se centra en entender la estructura de las membranas y los mecanismos de transporte de agua e iones en estas a escala molecular, mediante una combinación de simulaciones de dinámica molecular clásica (MD) y *ab initio* basadas en la teoría del funcional de la densidad (DFT). Dichas propiedades son críticas para la eficiencia de todo el ensamblaje. Al centrarse en el nivel molecular, se busca superar las limitaciones de los modelos actuales. La información que proporcionan las MD, a través de las distribuciones estadísticas de configuraciones geométricas medias, proporciona un modelo básico para el estudio de reacciones con DFT, que ofrece una mayor comprensión de los mecanismos que ocurren dentro de la membrana en el intercambio iónico entre electrodos. Al centrarse en materiales no fluorados, esta investigación se alinea con los valores estratégicos energéticos y busca reducir la dependencia de las membranas fabricadas en Estados Unidos. Los resultados allanarán el camino para el desarrollo de hidrogeneradores AEM avanzados, lo cual contribuye al objetivo más amplio de soluciones energéticas sostenibles e independientes en la Unión Europea.

Generación de calor de proceso mediante un sistema portátil de concentración solar (DESEi+d, 2025: 101)

Judit García-Ferrero (Universidad de Salamanca), Rosa Pilar Merchán Corral (Universidad de Salamanca), Julián González Ayala (Universidad de Salamanca), María Jesús Santos Sánchez (Universidad de Salamanca), Alejandro Medina (Universidad de Salamanca) y José Miguel Mateos Roco (Universidad de Salamanca).

Las plantas de energía solar de concentración son comúnmente reconocidas como una de las opciones más atractivas dentro de las tecnologías de generación de energía libre de carbono debido a su alta eficiencia y sus opciones de hibridación con otra fuente de energía o almacenamiento. En este trabajo se modela un sistema de pequeña escala denominado disco parabólico. Este sistema es flexible, portátil, y solo requiere un mínimo de irradiancia solar directa para su funcionamiento. Este disco parabólico recoge la energía solar directa y la redirige hacia un receptor situado en su foco (García-Ferrero *et. al.,* 2023). A través del receptor, se hace circular un fluido (generalmente aire) que absorbe el calor y aumenta su temperatura. A la salida del receptor, el aire puede alcanzar temperaturas cercanas a los 1000°C, por lo que este sistema es ideal para aplicaciones que demanden altas temperaturas: almacenamiento de energía térmica, calor de proceso para diversos usos (tratamiento de agua o residuos, reciclado de materiales, etc.) o generación de electricidad a través de un bloque de

potencia. Asimismo, una de las aplicaciones más novedosas de este tipo de tecnologías es la producción de combustibles sintéticos, a través de procesos de gasificación con biomasa (Bartali *et al*., 2025). El receptor solar tiene una gran influencia en la eficiencia del sistema global, pues es el elemento encargado de transformar la irradiancia solar en energía térmica. Así, en este trabajo se realiza un análisis de transferencia de calor para un receptor volumétrico de aire, presurizado, acoplado a un disco parabólico. El modelo asume condiciones de estado estacionario, utilizando un conjunto de ecuaciones que tienen en cuenta los diversos mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación, y las pérdidas que puedan ocurrir. La eficiencia del receptor solar obtenida se sitúa en torno al 80 %, y la temperatura de salida del aire alcanza los 910°C. Se espera que este modelo (preciso y poco costoso desde el punto de vista computacional) pueda aportar información relevante, facilitando las futuras líneas de investigación en el diseño de receptores solares.

Bibliografía

Bartali, R. *et al.* (2025). Modelling a hydrogen production system using solar hierarchical volumetric receivers and a steam gasification reactor. *Sustainable Energy Fuels*. 9, pp. 513-526. DOI: 10 1039/d4se117 436d.

García-Ferrero, J. *et. al*. (2023). Modeling a solar pressurized volumetric receiver integrated in a parabolic dish: Off-design heat transfers, temperatures, and efficiencies. *Energy Conversion and Management*. 293, 117436. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117436

Climatización eficiente para zonas de operaciones: diseño, fabricación aditiva y pruebas de un evaporador indirecto de cobre (DESEi+d, 2025: 131)

Manuel Lopera Rodríguez (Novaindef, Soluciones Sicnova), Manuel Ruiz de Adana (Universidad de Córdoba), Francisco Comino (Universidad de Córdoba), Elena Sánchez-López (Department of Graphic and Geomatic Engineering, Campus of Rabanales, University of Córdoba), Francisco Javier Bastante Flores (Ejército de Tierra), Ramón González Merino (Novaindef, Soluciones Sicnova) y Fernando Lasagni (Novaindef, Soluciones Sicnova).

La optimización de sistemas de acondicionamiento térmico para entornos operativos remotos es fundamental, dadas las limitaciones energéticas y logísticas inherentes a los despliegues. Los sistemas convencionales de compresión de vapor imponen una carga energética significativa y dependencia de refrigerantes específicos, lo que incrementa la complejidad de instalación y mantenimiento. Como alternativa, el enfriamiento evaporativo indirecto (EEI) presenta un potencial considerable por su bajo consumo energético teórico y el uso de agua como único fluido de trabajo. Este trabajo describe el diseño conceptual y la metodología de fabricación propuesta para un intercambiador de calor de tipo EEI, fabricado en cobre mediante fabricación aditiva (FA), con el objetivo de mejorar la eficiencia

térmica y la compacidad del sistema y reducir así la complejidad logística en zonas de operaciones.

El diseño del intercambiador se fundamenta en principios de intensificación de la transferencia de calor. Se exploran y adaptan topologías que maximizan el área superficial de intercambio, explotando la libertad geométrica que ofrece la FA. Se selecciona el cobre como material base debido a su elevada conductividad térmica, factor crítico para la eficiencia en intercambiadores EEI. La estrategia de fabricación se centra en la deposición de energía dirigida por láser e hilo (WL-DED), utilizando un sistema Meltio, tecnología que permite procesar cobre y construir estructuras metálicas con canales internos de diseño complejo, de otra manera inalcanzables, mediante técnicas sustractivas o de conformado tradicionales.

La evaluación del rendimiento se enfocará en métricas clave como la eficiencia de bulbo húmedo y el coeficiente de rendimiento energético (COP) del sistema. Además, la investigación validará la viabilidad técnica del proceso WL-DED para la fabricación de estos componentes térmicos específicos en cobre.

El desarrollo de intercambiadores EEI de cobre mediante WL-DED representa una línea de investigación prometedora para obtener sistemas de climatización de bajo impacto energético y con una cadena logística simplificada. La capacidad para generar geometrías optimizadas en materiales de alta conductividad puede conducir a dispositivos más compactos y ligeros, con mayor densidad de potencia térmica, facilitando su transporte e integración. Este enfoque tiene implicaciones directas para el diseño de equipos de control ambiental críticos para el personal y equipos sensibles en escenarios operativos remotos, en particular aquellos caracterizados por alta carga térmica sensible y baja humedad relativa.

Actuaciones de eficiencia energética en la base naval de Rota (DESEi+d, 2025: 134)

José Manuel Riscart López (Jefatura de Infraestructura de Rota, Armada).

– Planta FV 4,15 MW. Ejecución de una planta fotovoltaica compuesta por un total de 6384 paneles solares fotovoltaicos de 660 Wp cada uno, con un sistema de seguimiento solar en un eje, y doce inversores de 352 kW cada uno. Se estima que la planta destinará a autoconsumo en torno a 8500 MWh al año de la producción anual, lo que supone un ahorro económico de aproximadamente 1 250 000 euros al año, y evitando la emisión de 7600 toneladas de CO_2 a la atmósfera cada año.
– Instalación de cargadores de vehículos eléctricos. Con objeto de dar impulso al vehículo eléctrico y proporcionar capacidad de recarga a la flota los vehículos eléctricos que dispone en la actualidad la Base Naval de Rota, así como para proporcionar capacidades futuras para nuevas unidades de vehículos eléctricos e híbridos, en los últimos años se han instalado numerosos cargadores de vehículos eléctricos en la Base Naval de Rota. Además, en 2025 está previsto ampliar el número de cargadores, con la instalación de seis nuevos cargadores.
– Sustitución de envolventes térmicas. Sustitución de los paneles de fibrocemento de cubierta por paneles tipo sándwich con mejores prestaciones de aislamiento térmico en varios edificios de la Base Naval de Rota. También se han sustituido las ventanas por otras de alta eficiencia óptica y reducida ganancia térmica, y se ha procedido a la sustitución

de los equipos de iluminación convencional por equipos de iluminación led equivalentes.

– Sustitución de alumbrado exterior. Se ha realizado la sustitución de proyectores y luminarias convencionales por equivalentes con tecnología led en diversas zonas de la Base Naval de Rota. De este modo se ha conseguido una mayor eficiencia energética de las instalaciones, reducción de los costes de mantenimiento, y un ahorro energético y económico para la Base Naval de Rota, además de reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera.
– Modernización de climatización. Las actuaciones realizadas en los edificios de marinería incluyen la instalación de sistemas VRV con BMS y SGE. Por su parte, en el edificio 2099 se empleará un sistema de cuatro tubos. En todos los casos se consigue una mayor eficiencia energética (la calificación energética de los edificios ha mejorado/mejorará con estas actuaciones) y generando de este modo, un ahorro energético, económico y de las emisiones de gases de efecto invernadero en los edificios de la Base Naval de Rota.

NEBULA: inteligencia distribuida para analítica energética en instalaciones militares (DESEi+d, 2025: 150)

Sergio Zaera Mata (HI Iberia) y Roberto Gómez-Espinosa Martín (HI Iberia).

La gestión energética en bases militares y entornos operativos avanzados plantea exigencias críticas en cuanto a sostenibilidad, eficiencia, autonomía y seguridad. En este contexto, se presenta NEBULA, una plataforma distribuida de predicción energética diseñada específicamente para instalaciones de defensa. Su arquitectura integra técnicas de inteligencia artificial, aprendizaje federado, *blockchain* y *smart contracts*, con el objetivo de anticipar la demanda, optimizar la asignación de recursos y reforzar la resiliencia energética en escenarios tácticos y estratégicos.

La plataforma se apoya en un enfoque de *federated learning*, donde cada subsistema energético (como una unidad logística, un edificio de mando o una microred autónoma) entrena de forma local modelos predictivos sobre sus propios datos de consumo. Estos modelos locales son posteriormente agregados en un modelo global, conservando la privacidad operativa y evitando la exposición de información sensible o clasificada. Este enfoque resulta especialmente adecuado en entornos militares, donde los flujos de datos están sujetos a restricciones de seguridad, conectividad limitada o segmentación intencionada. NEBULA permite así construir

inteligencia energética colectiva sin comprometer la soberanía del dato ni depender de una infraestructura de comunicaciones centralizada.

Uno de los aspectos diferenciales de NEBULA es el uso de modelos de IA *Physics-Informed*, diseñados para incorporar restricciones físicas y conocimiento experto del dominio eléctrico en el propio proceso de aprendizaje. Este enfoque es relevante en la predicción de series temporales energéticas bajo condiciones no estacionarias, como variaciones en la operatividad, cargas críticas o climas extremos. La combinación de estos modelos con técnicas federadas permite generar predicciones robustas y adaptables, incluso en escenarios DDIL (*Denied, Degraded, Intermittent, Limited*).

Para garantizar la integridad, trazabilidad y automatización de las operaciones, la plataforma incorpora una red *blockchain* privada, sobre la que se ejecutan *smart contracts* que gestionan eventos clave como la validación de predicciones, la activación de procesos de redistribución de carga o la priorización de consumo entre unidades. Esta combinación de FL y *blockchain* permite crear una capa de confianza digital, donde los modelos se entrenan de forma distribuida, pero sus resultados se registran y verifican de manera segura, facilitando la auditoría, la interoperabilidad entre sistemas aislados y la toma de decisiones.

El despliegue de NEBULA en infraestructuras militares ofrece beneficios tangibles: mejora la eficiencia energética y reduce la huella asociada al transporte y almacenamiento de combustibles, permite una mayor integración de energías renovables, incrementa la autonomía ante interrupciones y habilita una planificación táctica basada en datos y anticipación de la demanda.

Ingeniería enzimática con IA para el desarrollo de recubrimientos avanzados en plataformas de defensa (DESEi+d, 2025: 168)

Eduardo Abenza (HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L.).

El desarrollo de recubrimientos funcionales avanzados para aplicaciones críticas en defensa exige la integración de materiales con propiedades optimizadas, capaces de ofrecer resistencia, ligereza y durabilidad en entornos operacionales extremos. En este contexto, se presenta un enfoque innovador basado en inteligencia artificial (IA) para el diseño racional de enzimas orientadas a la producción de nanocelulosa, un nanomaterial renovable con propiedades excepcionales para su aplicación en recubrimientos de alta eficiencia energética.

Este trabajo se enmarca en el proyecto nacional NanomatIA, que tiene como objetivo desarrollar baterías de ion-litio de nueva generación mediante la convergencia de IA, nanotecnología y biotecnología. En esta línea, se propone el uso de IA generativa y modelos predictivos para el descubrimiento y optimización de enzimas capaces de degradar celulosa de manera eficiente, transformándola en nanocelulosa de alta calidad. Este material es empleado como recubrimiento funcional de los electrodos en celdas electroquímicas, mejorando tanto la estabilidad como la conductividad, además de contribuir a la sostenibilidad y seguridad del sistema energético.

El enfoque basado en IA permite explorar un espacio de búsqueda enzimático prácticamente inabarcable mediante métodos tradicionales, lo que acelera el descubrimiento de biocatalizadores con actividad mejorada y especificidad adaptada al entorno operativo. A través de algoritmos de aprendizaje automático entrenados sobre bases de datos de secuencias proteicas, y utilizando modelos generativos de última generación, como redes neuronales profundas y *transformers*, es posible predecir nuevas secuencias con propiedades catalíticas optimizadas para la hidrólisis de celulosa. Mediante técnicas avanzadas de *protein design*, acopladas a simulaciones de dinámica molecular y predicción estructural tridimensional, se identifican variantes enzimáticas que maximizan la conversión de celulosa en nanocelulosa con bajo consumo energético, elevada eficiencia catalítica y estabilidad térmica prolongada. Estas características las hacen especialmente adecuadas para escenarios militares que requieren materiales resilientes, sostenibles y capaces de mantener su funcionalidad bajo condiciones extremas de temperatura, presión o exposición prolongada a la humedad y agentes químicos. Además, este enfoque reduce de forma significativa los costes y tiempos asociados a los ciclos experimentales tradicionales de prueba y error, lo cual permite el desarrollo más ágil de soluciones tecnológicas aplicables a plataformas energéticas en entornos de defensa.

Este trabajo demuestra el potencial transformador de la IA aplicada a la ingeniería enzimática y al diseño de nuevos materiales energéticos, abriendo nuevas vías para el desarrollo de soluciones avanzadas en defensa, que combinan sostenibilidad, innovación y seguridad operacional.

Desarrollo asistido por IA de nuevos electrolitos para aumentar la seguridad y durabilidad energética en plataformas móviles (DESEi+d, 2025: 171)

Eduardo Abenza (HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L.).

La transición hacia sistemas energéticos más seguros, eficientes y sostenibles es una prioridad estratégica en el ámbito de la defensa y la seguridad, sobre todo en lo que respecta a plataformas móviles desplegadas en entornos exigentes. En este contexto, el presente trabajo expone los avances de un proyecto nacional orientado al diseño de nuevas baterías de ion-litio de última generación, desarrollado mediante un enfoque multidisciplinar que integra inteligencia artificial, nanotecnología y biotecnología.

El objetivo principal de esta investigación es el desarrollo de nuevos electrolitos líquidos y semisólidos con propiedades mejoradas de conductividad iónica, estabilidad térmica y compatibilidad electroquímica que permitan aumentar la seguridad, autonomía y vida útil de sistemas energéticos utilizados en operaciones críticas. Para ello, se emplean modelos de inteligencia artificial generativa y predictiva que permiten explorar y optimizar combinaciones moleculares complejas basadas en sales de litio, disolventes orgánicos, líquidos iónicos y matrices poliméricas funcionalizadas.

La IA generativa se utiliza para proponer formulaciones viables dentro de un espacio químico de alta dimensionalidad, mientras que los modelos predictivos, entrenados con bases de datos experimentales y simuladas, permiten evaluar de forma acelerada sus propiedades fisicoquímicas clave. Esta aproximación reduce significativamente los tiempos de desarrollo y minimiza la necesidad de ensayos extensivos, sin comprometer la calidad y fiabilidad de los resultados.

Los electrolitos identificados mediante esta metodología presentan, según las simulaciones y predicciones, un alto potencial en términos de estabilidad frente a temperaturas elevadas, resistencia teórica a la formación de dendritas y compatibilidad con nuevos materiales de electrodo. Estas propiedades los posicionan como candidatos prometedores para futuras soluciones energéticas avanzadas, sobre todo en aplicaciones estratégicas en defensa como vehículos aéreos no tripulados, sistemas portátiles de comunicaciones, sensores autónomos y otras plataformas móviles que requieran alta seguridad y durabilidad operativa.

El presente trabajo contribuye al fortalecimiento de la autonomía tecnológica nacional en almacenamiento energético, abordando retos clave como la seguridad operacional, la eficiencia energética y la adaptabilidad a escenarios extremos. Asimismo, demuestra el potencial transformador de la inteligencia artificial en el descubrimiento de materiales funcionales de nueva generación para aplicaciones duales.

Gemelos digitales para estructuras navales, anticipando la corrosión con inteligencia artificial (DESEi+d, 2025: 172)

Eduardo Abenza (HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L.).

El proyecto Kimiko, fruto de la colaboración entre Navantia e HI Iberia, se enmarca en el desarrollo de soluciones basadas en inteligencia artificial para abordar uno de los principales desafíos en el ámbito naval: la corrosión inducida por la exposición prolongada al entorno marino. Esta problemática afecta de forma crítica tanto al casco como a los sistemas internos de tuberías de los buques, comprometiendo su integridad estructural, su disponibilidad operativa y la seguridad de las misiones. Kimiko propone una plataforma tecnológica integral que combina gemelos digitales, modelado multiescala y aprendizaje automático para predecir, simular y mitigar los efectos de la corrosión en sistemas navales estratégicos.

La arquitectura de Kimiko se estructura en varios módulos interrelacionados. En primer lugar, se entrena un modelo de predicción ambiental capaz de anticipar las condiciones oceánicas (temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto) a las que se verá expuesto un buque, teniendo en cuenta su ruta, velocidad y época del año. Este componente resulta especialmente útil en ausencia de sensores embarcados. A partir de estas condiciones, un segundo modelo de predicción de corrosión dinámica estima la evolución

de la degradación de materiales en casco y tuberías internas mediante el análisis de datos experimentales y simulados.

De forma complementaria, Kimiko integra un simulador de dinámica molecular con capacidades de IA para reproducir el comportamiento de los procesos corrosivos a nivel atómico, permitiendo entender los mecanismos de degradación en diferentes aleaciones de acero. Sobre esta base, dos módulos adicionales se encargarán de generar nuevos materiales: uno orientado al diseño de aceros más resistentes mediante el análisis de composiciones y propiedades fisicoquímicas, y otro centrado en el desarrollo de recubrimientos innovadores capaces de ofrecer mayor protección frente a ambientes altamente agresivos.

Por último, los materiales generados computacionalmente se validan primero mediante simulaciones moleculares y, más tarde, se analizarán en entornos experimentales controlados, garantizando así su viabilidad y eficacia. Kimiko representa un enfoque disruptivo para la gestión proactiva del mantenimiento en plataformas navales, alineado con los objetivos de sostenibilidad, eficiencia logística y superioridad tecnológica en defensa. La integración de IA y simulación avanzada permite reducir costes operativos, aumentar la vida útil de los activos y mejorar la capacidad de respuesta ante escenarios complejos en entornos marítimos hostiles.

Optimización energética de escorias industriales mediante IA para mejorar la eficiencia energética en sistemas de defensa (DESEi+d, 2025: 173)

Eduardo Abenza (HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L.).

El presente trabajo describe una investigación aplicada a la mejora de la eficiencia energética en procesos industriales estratégicos para la defensa, centrada en la optimización de la composición de escorias mediante inteligencia artificial (IA). El proyecto, denominado Maverick, tiene como objetivo el desarrollo de un sistema inteligente para la identificación y evaluación de nuevos óxidos que mejoren el comportamiento termoquímico de la escoria generada en hornos de producción de compuestos basados en silicio. Este tipo de materiales es clave en múltiples aplicaciones del sector defensa, desde componentes electrónicos hasta materiales estructurales avanzados, donde la mejora del rendimiento energético y la reducción de costes se convierten en factores críticos.

La metodología propuesta combina técnicas de *machine learning* con modelos termodinámicos y bases de datos experimentales para simular, predecir y optimizar el comportamiento de diferentes composiciones de escoria. En particular, se ha desarrollado un modelo de optimización multiobjetivo que permite balancear eficiencia energética, coste de los precursores y viabilidad técnica de las formulaciones propuestas.

El sistema permite explorar un espacio químico amplio y generar recomendaciones sobre combinaciones de óxidos que favorecen una menor temperatura de fusión, mayor estabilidad térmica y mejor recuperación del silicio útil, lo que contribuye directamente a una reducción del consumo energético del proceso.

Se prevé que la aplicación de esta metodología pueda traducirse en una mejora significativa de la eficiencia energética global del proceso industrial, así como una reducción notable de los costes asociados a los materiales de partida. Estas mejoras contribuirían a reforzar la sostenibilidad operativa de los sistemas de producción estratégica, alineándose con los objetivos de eficiencia, resiliencia y autonomía tecnológica definidos en el marco de la seguridad nacional.

Este trabajo demuestra el potencial de la IA como herramienta clave en la optimización de procesos industriales vinculados a la defensa, promoviendo soluciones tecnológicas innovadoras que contribuyen tanto a la superioridad operativa como a la sostenibilidad de las capacidades productivas críticas.

Desarrollo de polímeros avanzados para estructuras ligeras y resistentes para aplicaciones aeroespaciales de defensa (DESEi+d, 2025: 174)

Eduardo Abenza (HI Iberia, Ingeniería y Proyectos S. L.).

El presente trabajo aborda el desarrollo de nuevos materiales poliméricos mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial con el objetivo de diseñar estructuras ligeras, resistentes y adaptadas a los exigentes requisitos de la industria aeroespacial. En un contexto en el que la eficiencia estructural, la reducción del peso, la resistencia a entornos extremos y la capacidad de adaptación de los materiales son factores críticos en plataformas de defensa aérea y espacial, surge la necesidad de innovar en el diseño de polímeros avanzados que puedan superar las limitaciones de los compuestos tradicionales.

Este proyecto se centra en la aplicación de modelos de aprendizaje automático y técnicas de representación molecular para explorar el espacio de diseño de materiales, proponiendo nuevas formulaciones poliméricas con propiedades mecánicas, térmicas y químicas optimizadas. A través de una arquitectura computacional basada en modelos predictivos y generativos, se pretende acelerar el proceso de descubrimiento de materiales, lo que reduce de forma significativa los costes y tiempos asociados al desarrollo experimental. La IA se emplea aquí como una herramienta estratégica

para establecer relaciones estructura-propiedad a partir de grandes bases de datos, permitiendo la identificación de candidatos prometedores para aplicaciones específicas.

Desde la perspectiva de defensa, el uso de polímeros avanzados diseñados con IA abre la puerta a estructuras más ligeras para aeronaves y vehículos no tripulados, con mayor capacidad de maniobra, ahorro energético y menor firma térmica. Además, la incorporación de propiedades específicas como la autorreparación, la resistencia a la radiación o la respuesta adaptativa al entorno podría dotar a los sistemas de defensa de una ventaja tecnológica sustancial. El enfoque propuesto también permitiría la personalización de materiales según escenarios operativos concretos, reforzando así la autonomía estratégica en el desarrollo de componentes críticos.

Este trabajo se encuentra en fase de desarrollo y representa una línea de investigación de alto potencial en el cruce entre ciencia de materiales, IA y aplicaciones aeroespaciales para la defensa. Se plantea como una contribución innovadora al desarrollo de capacidades diferenciales en tecnologías duales, con impacto directo en la seguridad nacional y la autonomía tecnológica del sector.

Nanotecnología: un pilar estratégico para la autonomía energética y la geopolítica de los metales críticos (DESEi+d, 2025: 179)

Gema Martínez (Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Ctra. de Huesca s/n.), Ignacio Ugarte (Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza, Ctra. de Huesca s/n.), José Luis Hueso (Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón, CSIC-Universidad de Zaragoza), Francisco Balas (Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón, CSIC-Universidad de Zaragoza) y Jesús Santamaría (Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón, CSIC-Universidad de Zaragoza).

Atrás quedó la hegemonía de las potencias que ejercían su influencia únicamente mediante su poder político y militar. El sistema energético mundial es el nuevo escenario de confrontación. La transición energética exigirá un aumento considerable del suministro de materiales críticos, ya que metales como el platino, el oro o el litio son el corazón de las tecnologías de energías renovables y de otros avances tecnológicos. En un momento en el que la hegemonía mundial está en juego, la excesiva concentración de metales en determinados países como China o Rusia añade complejidad al mercado, y podría ser utilizado como herramienta geopolítica con graves implicaciones para la seguridad internacional. En consecuencia, las potencias actuales y emergentes reconocen que el dominio tecnológico —sobre todo en el desarrollo de materiales alternativos que mitiguen la dependencia de metales críticos— es un factor decisivo para asegurar la

autonomía estratégica y proyectar poder global. Es en este contexto donde la nanotecnología, considerada la revolución tecnológica del siglo XXI, emerge como una herramienta estratégica fundamental. Su potencial ha impulsado inversiones masivas por parte de Estados Unidos, Japón y la Unión Europea. Un ejemplo tangible es el diseño de nanomateriales avanzados y su uso como catalizadores en tecnologías de energías renovables, capaces de reducir la necesidad de metales críticos hasta en un 85% sin sacrificar el rendimiento respecto a las tecnologías comerciales basadas en metales preciosos, disminuyendo así vulnerabilidades estratégicas clave. En este trabajo se presenta una nueva generación de materiales nanoestructurados: catalizadores de átomo único (SACs, *Single Atom Catalysts*) basados en metales de transición abundantes y no críticos (M= Fe, Co), y desarrollados mediante una novedosa tecnología láser. Este método de síntesis, potencialmente escalable, genera SACs en un solo paso que contienen sitios activos de naturaleza M-N-C y exhiben alta actividad catalítica en la reacción de reducción de oxígeno (ORR), un proceso electroquímico crucial para el avance de las pilas de combustible, tecnologías clave en la transición energética y la electrificación de la economía.

Baterías de flujo: almacenamiento energético fiable y eficiente de larga duración (DESEi+d, 2025: 200)

Cristina Flox (Centro Ibérico de Investigación en Almacenamiento de Energía) y Juan M. Pérez (Centro Ibérico de Investigación en Almacenamiento de Energía).

El objetivo principal de la ponencia oral es dar una visión clara sobre la integración de baterías de flujo (BF) en el ámbito de la defensa como una solución energética robusta y escalable, lo que mejora la resiliencia energética y seguridad, y donde destaca su aplicabilidad en escenarios exigentes, ambientes hostiles y despliegues logísticos complejos.

Las operaciones militares modernas requieren soluciones energéticas fiables, seguras y escalables que respondan a entornos cada vez más exigentes y variables. En concreto, garantizar la continuidad de suministro de energía eléctrica, así como la independencia de los generadores diésel, es una prioridad para las aplicaciones militares. En este contexto, las BF suponen una prometedora solución al ofrecer ventajas únicas y diferenciadoras frente a otras tecnologías convencionales. Particularmente, las BF se caracterizan por una mayor seguridad sin riesgos de explosión y estabilidad térmica lo que proporciona un nivel superior de seguridad operativa. Además, presenta una vida prolongada de hasta veinte años, capaces de proporcionar larga duración de almacenamiento —más de nueve horas— y estabilidad en el ciclado, lo cual

se traduce en una menor necesidad de mantenimiento y recambio optimizando los recursos en entornos exigentes.

Bajo la perspectiva de su estructura, las disoluciones de electrolito se separan físicamente de la celda electroquímica siendo almacenadas en tanques externos e impulsados de forma continua por todo el sistema. Esta arquitectura de flujo permite desacoplar la potencia de la energía, facilitando su diseño acorde con la aplicación y otorgando modularidad, versatilidad y flexibilidad. La posibilidad de reemplazo de electrolito en campo abre la puerta a nuevos esquemas de movilidad energética en escenarios tácticos.

Dadas las excelentes y únicas cualidades de las BF, existe un amplio abanico de tecnologías que se han demostrado y validado. En particular, la tecnología de vanadio es la que más ha penetrado en el mercado, dado que está instalada a nivel global. Otras químicas, como por ejemplo la del hierro, ofrecen ventajas adicionales como bajo coste y sostenibilidad. Si bien su densidad de energía es una limitación, en combinación con fuentes renovables intermitentes, las BF pueden generar microrredes autónomas capaces de operar sin dependencia constante de combustible, reduciendo los riesgos logísticos asociado al transporte y protección de suministros energéticos.

Se realizará un profundo análisis del papel emergente de las BF como una opción tecnológica estratégica para aplicaciones militares para mejorar la autonomía, seguridad y eficiencia energética aplicado al campo militar.

Maximizando la eficiencia energética de módulos habitables construidos con base en contenedores (DESEi+d, 2025: 204)

Adeline Rezeau (Centro Universitario de la Defensa - Academia General Militar), Beatriz Rodríguez-Soria (Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar) y Miguel Ángel García-García (Centro Universitario de la Defensa - Academia General Militar).

El cambio climático está transformando el entorno y redefiniendo las prioridades y estrategias de las distintas naciones y organizaciones a nivel global. En particular, el aumento de fenómenos meteorológicos extremos, la necesaria adaptación a temperaturas cada vez más elevadas y el desafío de garantizar la seguridad energética están ejerciendo una fuerte presión sobre la manera en que se construyen y abastecen las bases militares, incluidas aquellas desplegadas en misiones internacionales. De forma general, las bases de las Fuerzas Armadas se construyen utilizando contenedores de veinte o cuarenta pies debido a su estandarización, facilidad de transporte y manejo en zonas remotas y de difícil acceso. En estas bases, los módulos habitacionales representan una parte significativa del consumo energético, principalmente por las necesidades de climatización. A su vez, el suministro de energía suele depender, de forma casi exclusiva, de grupos electrógenos movidos por gasoil, lo que implica una logística crítica en torno a este combustible. Con el objetivo de reducir los riesgos, costes y huella ambiental asociados al uso de combustibles

fósiles en las bases, se ha desarrollado un prototipo de módulo habitable «pasivo» y completamente autónomo desde el punto de vista energético, construido a partir de cuatro contenedores de veinte pies. Este prototipo denominado ZEM (*Zero Energy Module*) ofrece una alternativa sostenible: módulos habitacionales desmontables y transportables, alimentados mediante fuentes de energías locales y sostenibles (solar y eólica), con un sistema de almacenamiento dual basado en baterías de litio y producción de hidrógeno verde. Inicialmente diseñado para su transporte y operación en la base Gabriel de Castilla, en la Antártida, el módulo ZEM se encuentra en la actualidad en funcionamiento en el Batallón de Zapadores I, en la brigada «Aragón» I del Ejército de Tierra, en Zaragoza. Durante los últimos dos años, los autores han registrado y analizado los datos relativos al consumo energético para la climatización y la iluminación del módulo, así como a las condiciones de confort térmico y calidad del aire (temperaturas interiores y radiantes, humedad relativa, concentración de CO_2, etc.). En este artículo, se presentan no solo los principales resultados obtenidos hasta la fecha, sino también los materiales y técnicas constructivas utilizados en el diseño y construcción del módulo ZEM. Finalmente, se destacan las lecciones aprendidas durante el periodo de monitorización y se proponen unas recomendaciones a tener en cuenta en posibles réplicas o desarrollos futuros.

Plataforma COOL EDGE-TOP ECO CLOUD (DESEi+d, 2025: 207)

Vicente Hernandez (CESN).

El proyecto COOL EDGE-TOP ECO CLOUD representa una apuesta tecnológica disruptiva orientada a la sostenibilidad y eficiencia energética en el ámbito de la defensa. Su objetivo es desarrollar una infraestructura Edge modular y reutilizable que supere los estándares de eficiencia de los centros de datos en la nube tradicionales, garantizando baja latencia, alto rendimiento y seguridad reforzada, con un enfoque claro en la economía circular. Desde una perspectiva científico-tecnológica, el proyecto se sitúa en la intersección de la computación Edge, la inteligencia artificial generativa y la sostenibilidad ambiental. Introduce innovaciones clave como sistemas de refrigeración eficientes sin uso de agua, independencia climática, y microcentros de datos transportables con un diseño optimizado para aplicaciones de alto rendimiento (HPC) y entornos de misión crítica en entornos de nubes de combate. La solución se alinea directamente con las áreas prioritarias del congreso, promoviendo tecnologías transversales que habilitan la fábrica autónoma y el despliegue inteligente de infraestructuras IT en contextos de defensa replicables con facilidad. La aplicabilidad para el sector de defensa y seguridad es especialmente relevante. Gracias a su arquitectura modular, el sistema puede ser desplegado en entornos hostiles o aislados, permitiendo capacidad operativa inmediata, escalabilidad, resiliencia frente a ciberataques, ataques electromagnéticos

o incendios, y una rápida evacuación o traslado en situaciones de emergencia. Esto refuerza tanto la capacidad defensiva como ofensiva de los sistemas militares, mejorando al mismo tiempo la eficiencia energética y logística. En cuanto a la calidad técnica-formal, el proyecto se articula en un plan de trabajo estructurado en tres fases: diseño, validación y despliegue. Cada etapa está respaldada por objetivos específicos que incluyen indicadores técnicos como el *Power Usage Effectiveness* (PUE), niveles de latencia y métricas de seguridad. El rigor en la argumentación técnica, así como la claridad en la presentación de resultados esperados, demuestran una madurez elevada en la propuesta. En el ámbito de la cooperación, destaca la colaboración activa con la Universidad Politécnica de Telecomunicaciones de Madrid, que aporta capacidades de I+D+i, acceso a tecnologías emergentes y talento investigador. Esta alianza fortalece el carácter dual del proyecto, conectando los ámbitos civil y militar, y reforzando su proyección internacional en entornos como la OTAN. En definitiva, COOL EDGE-TOP ECO CLOUD constituye una iniciativa de alto impacto que impulsa la sostenibilidad energética y la autonomía tecnológica en el ámbito de la defensa, alineándose plenamente con los principios de innovación responsable, eficiencia y resiliencia operativa.

Proyecto NOMAD: avances y desafíos en el ecuador del proyecto (DESEi+d, 2025: 244)

Francisca Hernández (ARPA EMC), Eduardo Manuel López (INTA-Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), Rosa María Rengel (INTA-Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), Jesús Palma (Fundación IMDEA Energía) y Enrique García-Quismondo (fundación IMDEA Energía).

El proyecto *novel energy storage technologies usable at military deployments in forward operating bases* (NOMAD), tiene como objetivo general fortalecer la competitividad y la autonomía de la industria europea de defensa en el campo del almacenamiento de energía y de las tecnologías relacionadas aplicadas a las bases avanzadas de operaciones (FOB, *Forward Operating Bases*, por sus siglas en inglés), así como ayudar a reducir la brecha tecnológica entre Europa y otros competidores potenciales en este campo. NOMAD está financiado por la DG DEFIS a través de la convocatoria 2021 del EDF. Además, también cuenta con el apoyo financiero de los Ministerios de Defensa de Alemania, Eslovenia, España, Estonia, Grecia, Hungría, Noruega y Países Bajos. En la actualidad, y tras haber superado el ecuador del proyecto, importantes hitos han sido alcanzados. En este sentido, se ha recabado información de los Ministerios de Defensa (como usuarios finales de los resultados del proyecto), entidades afines y expertos en el ámbito del almacenamiento y la gestión de energía en aplicaciones similares con el objetivo es establecer los principales indicadores y requerimientos de los sistemas de almacenamiento de

energía y tecnologías habilitadoras (como la conversión de potencia y las tecnologías de información y comunicación) para las FOB, así como para identificar posibles escenarios en los que los sistemas de almacenamiento de energía puedan jugar un papel relevante en estas instalaciones. Asimismo, se han analizado las características de una amplia variedad de tecnologías de almacenamiento de energía y habilitadores incluyendo diferentes tecnologías de almacenamiento electroquímico (como baterías), almacenamiento eléctrico (como supercondensadores) o almacenamiento mecánico (como volantes de inercia). Además, se han identificado sus principales indicadores clave en productos comerciales (COTS, *Commercial Off The Self*, por sus siglas en inglés) y en prototipos a escala de laboratorio. El proyecto encara ahora una fase crucial. Una vez definidas las tecnologías y configuraciones básicas que se integrarán en los demostradores tecnológicos del proyecto, se ha procedido a la revisión del diseño crítico de todos los sistemas para comenzar en 2025 en la fase de fabricación, integración y validación experimental en condiciones representativas. El proyecto afronta numerosos retos y desafíos, como el cumplimiento de los requisitos técnicos de los sistemas o la creación de un marco colaborativo y una metodología común de desarrollo de productos y servicios entre empresas y organismos, con diferentes intereses y filosofías de trabajo, en el ámbito del almacenamiento de energía para aplicaciones de defensa.

Sensores LiDAR para operaciones 24/7: mejora de la sensibilidad espectral en aplicaciones de defensa (DESEi+d, 2025: 249)

Amador Menéndez-Velázquez (Centro Tecnológico IDONIAL), Dolores Morales (Centro Tecnológico IDONIAL) y Ana Belén García-Delgado (Centro Tecnológico IDONIAL).

La tecnología LiDAR (*light detection and ranging*) encuentra aplicación en el ámbito de la defensa, como alternativa o complemento al radar (*radio detection and ranging*), debido a su capacidad para generar representaciones tridimensionales precisas del entorno y detectar objetos con alta resolución espacial. Esta tecnología puede proporcionar valor añadido en vigilancia, mapeo de terrenos complejos, navegación autónoma de vehículos y sistemas de guiado de misiles, donde la precisión en tiempo real resulta crítica. El funcionamiento de LiDAR se basa en la emisión de pulsos láser —por lo general radiación infrarroja— y en la medición del tiempo que tarda el haz en reflejarse y regresar al sensor. No obstante, uno de los principales desafíos para su implementación continua en entornos operativos 24/7 —es decir, en funcionamiento ininterrumpido tanto de día como de noche— es la interferencia espectral causada por la radiación infrarroja ambiental, sobre todo durante las horas diurnas. Dicha radiación puede ser erróneamente interpretada por el sensor como parte de la señal láser emitida por el sistema LiDAR, comprometiendo así su rendimiento y fiabilidad. Otra limitación adicional es la dificultad para

detectar señales provenientes de múltiples ángulos. Para mitigar estas restricciones, se propone la incorporación de dos soluciones complementarias: 1) antenas moleculares, capaces de captar radiación desde diferentes direcciones, y 2) sistemas moleculares avanzados de conversión espectral, que transforman la señal infrarroja recibida en longitudes de onda coincidentes con el *bandgap* o zona de respuesta espectral del sensor; estos sistemas solo pueden ser activados por láseres, permitiendo filtrar eficazmente la interferencia generada por fuentes infrarrojas naturales, como la radiación solar, asegurando así un funcionamiento óptimo bajo diferentes condiciones lumínicas. Ambas soluciones pueden integrarse en un dispositivo fotovoltaico conocido como concentrador solar luminiscente, el cual tiene la capacidad de generar electricidad a partir de la radiación solar, lo que abre asimismo el camino al desarrollo de sensores energéticamente semiautónomos, con menor dependencia de fuentes de energía externas. Este enfoque no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también incrementa la resiliencia de los dispositivos en entornos remotos o de difícil acceso, donde el mantenimiento y el suministro energético constante pueden ser limitados.

Proyecto ELECTRA: electrificación de componentes propulsivos en aeronaves (DESEi+d, 2025: 253)

Imanol Echevarría (TECNALIA) y Iñaki Tostado (TECNALIA).

El proyecto ELECTRA aborda el desarrollo de tecnologías clave para la electrificación de aeronaves ligeras y plataformas de despegue vertical (eVTOL), enmarcándose en los objetivos de sostenibilidad, eficiencia energética y autonomía estratégica del sector aeroespacial español. Esta iniciativa, liderada por un consorcio de empresas nacionales altamente especializadas, se orienta a la creación de un sistema completo de propulsión eléctrica, que incluye motores, controladores, baterías avanzadas y sistemas de gestión de energía, contribuyendo así al desarrollo de una aviación más limpia, silenciosa y tecnológicamente independiente.

Desde el punto de vista tecnológico, ELECTRA contempla innovaciones significativas en cada uno de sus subsistemas. En la parte propulsiva, se desarrolla un bloque integrado motor-controlador de altas prestaciones, fabricado en materiales ligeros como la fibra de carbono, optimizado para aeronaves eVTOL. Este conjunto incorpora técnicas de disipación térmica avanzadas y estrategias de minimización del impacto acústico, investigando en hélices toroidales. Asimismo, se implementa un sistema de control *fly-by-wire* con redundancia distribuida, orientado a garantizar la fiabilidad y seguridad en vuelo de aeronaves tripuladas, incluyendo el

desarrollo de un interfaz hombre-máquina optimizado mediante *joystick* específico para eVTOL.

En el ámbito energético, se avanza en el desarrollo de baterías de aluminio-aire recargables, empleando técnicas de ecodiseño, impresión electrónica y nuevos materiales para cátodos, ánodos y electrolitos no inflamables. Estas baterías buscan maximizar la densidad energética, la seguridad operativa y la sostenibilidad medioambiental. Paralelamente, se diseña un sistema de gestión de baterías (BMS) con arquitectura distribuida maestro-esclavo, con algoritmos avanzados de estimación de estado (SOX), incluyendo técnicas basadas en inteligencia artificial para el diagnóstico y predicción del comportamiento electroquímico.

La aeronave ultraligera seleccionada como plataforma de pruebas ha sido rediseñada para integrar todos estos sistemas, incluyendo simulaciones CFD y análisis estructurales para su conversión a eVTOL. La validación final se realizará sobre el propio demostrador aéreo.

ELECTRA posiciona al sector aeroespacial español en la vanguardia de la electrificación aeronáutica, aportando capacidades clave en componentes críticos, que pueden ser transferibles tanto al ámbito civil como a aplicaciones de defensa. Su enfoque modular, escalable y orientado a la certificación abre nuevas oportunidades para el desarrollo de sistemas aéreos no tripulados y plataformas aeroespaciales de nueva generación, reforzando la autonomía tecnológica nacional en un área estratégica.

PULSMES: desarrollo de un sistema pulsado de alta potencia basado en SMES (DESEi+d, 2025: 270)

Gustavo Sarmiento (SUPRASYS S. L.), Santiago Sanz (SUPRASYS S. L.), Alex López (SUPRASYS S. L.), Joseba Bastarrarena (SUPRASYS S. L.), Íñigo Jesús Galindo (SUPRASYS S. L.), Eduardo Cano (Edair Technologies), Eduardo Arca (Edair Technologies), Alfonso Torrelo (Edair Technologies), Ion López (Centro de Tecnologías Aeronáuticas), Javier Milla (independiente), Idurre Saez de Ocariz (Centro de Tecnologías Aeronáuticas) y Ignacio M. Eiriz (Centro de Tecnologías Aeronáuticas).

Los recientes conflictos armados han constatado la importancia de las armas de energía dirigidas, dentro de un contexto de contención y eliminación de potenciales amenazas de sistemas no tripulados en formación aislada o en enjambre. La incorporación de esta tipología de armamento presenta un importante impacto en el sistema energético de la plataforma anfitriona, ya que demandan pulsos de alta potencia, lo que obliga a una electrificación eficiente dentro de una estructura de red aislada como es una plataforma naval o terrestre y, todo ello, mientras se trata de contener el dimensionamiento de la planta generadora. El proyecto PULSMES ofrece un enfoque consistente con la problemática reseñada, ya que combina un SMES (*Superconducting Magnet Energy Store*), junto con otra tipología de sistemas de almacenamiento como baterías o ultracondensadores. Centrado en aportar seguridad y flexibilidad en la demanda dentro

de una red aislada, la solución dispone de sistema de gestión energética en un bus de corriente continua, que permite un flujo bidireccional energético consumidor-almacenador. Tras superar distintos estadios de diseño conceptual y de detalle, PULSMES se encuentra en estos momentos en fase de desarrollo experimental, con el objetivo de disponer de un sistema demostrador en grado de madurez TRL4. Consiste, por lo tanto, en un SMES de escala reducida diseñado para demostrar un almacenamiento de 18 kJ, con capacidad de entrega de corriente de 200 A. El SMES está contenido dentro de un criostato y refrigerado mediante helio gas, para que mantenga sus condiciones de operación de 20 K. Se pretenden constatar unas densidades energéticas en torno a 40 kJn/m3, así como pulsos de descarga de 10 ms. El SMES está conectado a un bus común de corriente continua de hasta 1500 V, combinado con sistemas de baterías de hasta 250 kW en potencia y 500 kWh de almacenamiento, y ultracondensadores de hasta 200 kW en potencia y 5 kWh de almacenamiento. Esta hibridación energética garantiza una operación prolongada y presenta la capacidad de ajustarse a multitud de perfiles de demanda. El sistema de gestión energética, que combina electrónica de potencia especializada para estos sistemas y algoritmos de optimización del flujo energético, permitirá la descarga controlada, adecuando el pulso a cada perfil de carga, buscando los puntos de operación óptimos de cada equipo, y manteniendo condiciones favorables de operación. Asimismo, permitirá la recarga del SMES debido a sus características bidireccionales. En esta contribución, se mostrarán los desarrollos experimentales, así como los resultados iniciales obtenidos.

Gemelo digital energético como motor de la eficiencia energética y sostenibilidad, su aplicación en sectores críticos productivos y su proyección a defensa (DESEi+d, 2025: 280)

Andrés Lluna Arriaga (ITE), Fernando Mengod Bautista (ITE), Alejandro Rubio Rico (ITE), Luís Enrique Ruiz Pérdomo (ITE) y Vicente Fuster Roig (ITE-UPV).

Actualmente, la eficiencia energética, la planificación y gestión óptima de los recursos es clave para sectores críticos productivos y de servicios; así también como para defensa. La tecnología del gemelo digital, con un gran desarrollo en los últimos años, se posiciona como una herramienta esencial en la transformación de los procesos en cuanto a su eficiencia y sostenibilidad, y para la mejora de competitividad y la resiliencia empresarial.

Si se entiende el gemelo digital como una representación virtual de sistemas que permiten la simulación, predicción, análisis y optimización, su aplicación está justificada. Existen diferentes enfoques de proyección y predicción energética, asociada a la dimensión productiva y operativa, para entornos complejos. Por ello, se revisan diferentes enfoques de planificación y gestión energética para sectores críticos como los manufactureros, servicios, infraestructuras energéticas o energías renovables.

En relación con ello, se presentan resultados de modelos y gemelos digitales energéticos basados en la dinámica de los sistemas (con ecuaciones

fundamentales y de comportamiento físico), caracterización de eventos discretos (para definición de comportamientos productivos), máquinas de estados (para representación de sistemas secuenciales automáticos); los cuales todos ellos son importantes en escenarios con dificultad para la obtención o disponibilidad de datos. También se presentan modelos basados en datos que destacan por la capacidad de implementar relaciones complejas, incluyendo no linealidades, a través de técnicas avanzadas de tratamiento inteligente de datos. El conjunto combinado de este tipo de aproximaciones de modelado y simulación dotan al gemelo digital energético versatilidad y representatividad en cada uno de los escenarios planteados a planificar, gestionar y optimizar. En este sentido, se destaca el encapsulamiento de diferentes agentes inteligentes que interactúan de forma organizada según cada enfoque mencionado, y además con otros agentes SW o sistemas IIoT necesarios.

Por ello, a partir de estos casos de éxito se justifica cómo éstos pueden proyectarse y emplearse en diferentes procesos del sector de la defensa; por ejemplo, en infraestructuras, campamentos base, logística, vehículos. Y su desarrollo y uso permitirá la mejora energética y operativa, la reducción de costes y la mejora de su ciclo de vida.

La línea mencionada se desarrolla por el Centro Tecnológico de la Energía (ITE) en diferentes proyectos I+D+i y en colaboración con diferentes empresas, sus datos de procesos productivos y experimentales, así como la validación de los diferentes resultados.

Hacia una Armada eficiente y competitiva: el desafío de España en el horizonte 2045 (DESEi+d, 2025: 288)

Pedro Carrasco-Pena (CUD-ENM) y Jorge Eiras-Barca (CUD-ENM).

La eficiencia energética (EE) se ha convertido en un elemento estratégico clave para la operatividad y sostenibilidad de los buques de guerra en el horizonte 2045. Estos sistemas navales integran propulsión, armamento y múltiples subsistemas con altas demandas energéticas, lo que se traduce en costes operativos elevados y dependencia de combustibles fósiles. A su vez, las normativas internacionales y europeas, inicialmente dirigidas a la marina mercante, exigen una adaptación al ámbito militar para reducir emisiones y fomentar la adopción de tecnologías limpias. Este trabajo explora la adaptación de metodologías basadas en el análisis de datos masivos procedentes de los sistemas integrados de control de plataforma (SICP), resaltando la importancia de las herramientas de control estadístico de la calidad (CEC) para medir, supervisar y mejorar la EE en tiempo real. El trabajo aporta un análisis realizado sobre un buque de escolta, donde el combustible puede suponer cerca del 40 % del coste del ciclo de vida operativo. Incluso reducciones marginales en el consumo —en torno al 1 %— podrían acarrear ahorros de millones de euros anuales, además de reducir la frecuencia de reabastecimiento y elevar la autonomía táctica. En paralelo, se discute la pertinencia de adaptar instrumentos regulatorios civiles, como el EEDI, SEEMP y EEOI, al marco de la Armada, y se

revisan tecnologías emergentes que contribuyen a la reducción de firmas, mejorando la supervivencia. La implantación de estas estrategias junto con la necesaria formación de personal, el mantenimiento predictivo y digitalización avanzada posibilitarán la transición hacia buques de guerra

Predicción de la inmisión de gas radón en edificios mediante modelos de inteligencia artificial (DESEi+d, 2025:295)

Ángela Merello Pérez (Armada española), Arturo González Gil (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), Ana Ogando Martínez (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), Antón Cacabelos Reyes (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), Pablo Falcón Oubiña (Universidade de Vigo) y Miguel Ángel Gómez Rodríguez (Universidade de Vigo).

El radón, isótopo radiactivo originado por la desintegración del uranio en rocas, se infiltra en edificaciones a través de la porosidad y las discontinuidades de la envolvente en contacto con el terreno, se acumula principalmente en plantas bajas y constituye un riesgo significativo para la salud de los ocupantes tras exposiciones prolongadas. La tasa de inmisión de radón en interiores es multifactorial, influenciada por variables meteorológicas, características constructivas y patrones de ocupación y ventilación. Este trabajo presenta una metodología innovadora que emplea algoritmos de inteligencia artificial para la predicción de la tasa de inmisión de radón a través del suelo en espacios cerrados, lo que favorece la optimización de estrategias de control y mitigación. El estudio se basa en un análisis detallado de la tasa de inmisión de radón a través del suelo de un despacho ubicado en la planta baja del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar (CUD-ENM), realizada según la

norma UNE-EN ISO 11 665-7, bajo diversas condiciones ambientales a lo largo de aproximadamente un año. Tras un análisis de correlación inicial, se redujo el conjunto de variables predictoras y, con base en estas, se evaluaron y entrenaron diversos algoritmos de inteligencia artificial. Después de un proceso de optimización de dichos algoritmos, se obtuvo el modelo de regresión más preciso y se identificó el número mínimo de variables de predicción. Este trabajo contribuye de manera significativa al desarrollo de una herramienta predictiva para el control eficiente de los niveles de radón en interiores, facilitando la implementación de estrategias preventivas y de mitigación personalizadas y energéticamente optimizadas. Esta investigación, enmarcada en el proyecto RnMod (financiado por el CUD-ENM), promueve la sostenibilidad al minimizar la necesidad de ventilación excesiva y, por consiguiente, el consumo energético asociado a la climatización, alineándose con los principios de eficiencia energética y calidad del aire interior.

Mitigación de radón en edificios mediante estrategias de ventilación energéticamente eficientes (DESEi+d, 2025: 299)

Arturo González Gil (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), Antón Cacabelos Reyes (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), Lara Febrero Garrido (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), Lorena González Gil (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), Pablo Falcón Oubiña (Universidade de Vigo) y Miguel Ángel Gómez Rodríguez (Universidade de Vigo).

La clasificación del radón como carcinógeno humano y la prevalencia de concentraciones elevadas en una parte significativa del parque nacional de edificios provoca que la exposición a este gas constituya un problema de salud pública en España. En este contexto, el Real Decreto 1029/2022 establece la obligatoriedad de medir la concentración de radón en todos los lugares de trabajo situados en planta bajo rasante o planta baja, en aquellos municipios declarados como zonas de actuación prioritaria por el Consejo de Seguridad Nuclear (17% del territorio nacional, con especial incidencia en Galicia, Extremadura y la Comunidad de Madrid). En este trabajo se presentan las actuaciones de monitorización y control de radón implementadas en el edificio del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, en cuya planta baja se ha comprobado que las concentraciones de este gas pueden llegar a superar ampliamente los

límites recomendados. La solución propuesta se fundamenta en el diseño de una estrategia de ventilación óptima que garantice niveles aceptables de radón con un consumo energético mínimo en climatización. En el trabajo se describe el sistema desarrollado para la visualización, el registro y el análisis remoto de los datos de concentración de radón en las diferentes las dependencias del edificio. Se analiza la variación dicha concentración en función de diferentes estrategias de ventilación y se compara el consumo energético correspondiente a través de un modelo dinámico que permite simular tanto el funcionamiento del sistema de acondicionamiento de aire como la respuesta térmica del edificio. Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que, en edificios de dimensiones relativamente grandes, puede existir una variabilidad notable de la concentración de radón, tanto temporal como espacial, y que, por lo tanto, resulta necesario implementar una monitorización continua y distribuida en diferentes puntos de la misma planta. Además, se verifica que es posible mantener los niveles de radón dentro de los límites establecidos por la legislación vigente mediante estrategias de ventilación energéticamente optimizadas. Estos resultados pueden ser de relevancia para el diseño medidas de monitorización y control en las diferentes bases e instalaciones de las Fuerzas Armadas y del Ministerio de Defensa que se encuentran en zonas de riesgo elevado.

Cinética de adsorción en interfaces sólido-líquido en catálisis heterogénea y electrocatálisis para combustibles sintéticos (DESEi+d, 2025: 75)

Thaimy Brito-Molina (Centro Ibérico de Investigación en Almacenamiento Energético, CIIAE), Gerard Novell-Leruth (Centro Ibérico de Investigación en Almacenamiento Energético, CIIAE) y Rodrigo García-Muelas (Centro Ibérico de Investigación en Almacenamiento Energético, CIIAE).

Las interfaces sólido-líquido juegan un papel fundamental en la catálisis heterogénea y electrocatálisis, las cuales son esenciales para aplicaciones energéticas e industriales como la fabricación de combustibles sintéticos. Esta última es un área estratégica para garantizar la independencia energética de España y la Unión Europea en un contexto global incierto. Mientras que la cinética de desorción desde superficies sólidas sigue una cinética bien conocida, descrita por la ecuación de Eyring, aún no existe una ecuación equivalente para el proceso inverso: la adsorción desde fases líquidas o acuosas. Para subsanar esta falta, se suele acudir a artificios como: 1) utilizar la ecuación de Hertz-Knudsen, derivada originalmente para la adsorción gas-sólido; 2) utilizar ecuaciones similares a la de Eyring, las cuales solo son aplicables a sistemas homogéneos y que introducen inconsistencias dimensionales cuando se extienden a superficies heterogéneas; 3) emplear modelos cinéticos simplificados basados

en el paso determinante de la velocidad (por ejemplo, difusión, reacción, adsorción o desorción), y 4) realizar ajustes empíricos de parámetros cinéticos para adaptarlos a datos experimentales. Sin embargo, estas aproximaciones no funcionan bien para la adsorción desde fase líquida, ya que conllevan a discrepancias de hasta siete órdenes de magnitud en el prefactor de adsorción. Aquí, se presenta una descripción fundamental de la cinética de adsorción desde fases líquidas hacia superficies sólidas. El enfoque de este trabajo desarrolla ecuaciones y modelos basados en termodinámica estadística, mediciones experimentales y datos de teoría del funcional de la densidad (DFT). Como prueba de concepto, se propone un modelo microcinético adaptado para la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis. Los resultados de este trabajo resultados mejoran significativamente las estimaciones de la cinética de hidrólisis y de pilas de combustible Al cerrar la brecha entre las predicciones teóricas y las observaciones experimentales, se mejora la comprensión de fundamental de las interfaces sólido-líquido, y se ofrece un modelo robusto y preciso para estudiar dicha cinética a escalas mayores y a procesos más complejos como la producción de amoniaco, metanol y otros combustibles sintéticos con posibles aplicaciones civiles y militares.

Sensórica avanzada e IA para caracterización *in situ* de materiales locales idóneos para infraestructura militar (DESEi+d, 2025: 120)

Jaime Moreno-Juez (TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance BRTA, Astondo Bidea, Edificio 700, 48160 Derio, España), Verónica García-Cortés (TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance BRTA, Astondo Bidea, Edificio 700, 48160 Derio, España), Jon-Ander Iturrioz-Aguirre (TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance BRTA, Astondo Bidea, Edificio 700, 48160 Derio, España), Carlos Folgoso-Bullejos (TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance BRTA, Astondo Bidea, Edificio 700, 48160 Derio, España), Ángel Doblado-Pérez (TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance BRTA, Astondo Bidea, Edificio 700, 48160 Derio, España) y Ekain Cagigal-Montalban (TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance BRTA, Astondo Bidea, Edificio 700, 48160 Derio, España).

Garantizar un desplazamiento rápido y fluido de personal, material y equipos militares, incluso con poca antelación, a gran escala, dentro y fuera de la UE suponen un gran reto logístico para los ejércitos. La construcción de bases, campamentos e infraestructuras militares en desplazamiento implica proyectar, construir y operar instalaciones en zonas remotas, de difícil acceso y siempre con materiales disponibles localmente (áridos, suelos, agua, madera, etc.). En este contexto, los ingenieros disponen de escasa información acerca de las propiedades físicas, mecánicas y geotécnicas de los materiales (granulometría, capacidad portante, resistencia, humedad,

plasticidad, etc.) que les permita definir la idoneidad de uso en las unidades de obra necesarias y las condiciones de aplicación por lo que la toma de decisiones tiene que estar basadas en experiencias empírica, no siempre en datos, con los riesgos que ello supone. Para facilitar la caracterización *in situ* y de precisión de los materiales locales, se necesita investigar en sistemas móviles y autónomos de análisis que permitan una evaluación en tiempo real de las propiedades del material y que permita predecir su comportamiento en distintas condiciones para facilitar la toma de decisiones de los ingenieros. El centro tecnológico TECNALIA está desarrollando el equipo TRAZIA, un sistema de sensórica avanzada multimodal, espectral y visual, que utiliza inteligencia artificial integrada para la caracterizar y predecir características múltiples de recursos materiales primarios y secundarios en tiempo real. La combinación de sensórica y algoritmia de aprendizaje profundo permite obtener información de recursos materiales como su morfología, color, tamaño o composición química para mejorar la toma de decisiones respecto a la utilización de materias primas o reciclaje de residuos minerales. Actualmente, la investigación se centra en el desarrollo de un equipo fácilmente transportable y autónomo para diferentes aplicaciones en campo, como la valorización de residuos *in situ*, ejecución de infraestructura en zonas remotas o detección de emplazamientos potencialmente contaminados, como algunos ejemplos. Gracias a estas nuevas tecnologías autónomas y portátiles, se mejora la toma de decisiones para emplear de forma más eficiente los recursos materiales disponibles localmente, optimizando así la cadena de suministro, los tiempos de desplazamiento y la seguridad de las infraestructuras ejecutadas.

DED-lw + SLA solución para reparación en piezas sometidas a alta presión y desgaste de forma inmediata (DESEi+d, 2025: 162)

Gerardo Epifanio Rodríguez Mendoza (Armada española), Javier Racero Catalán (Novaindef), Arnold Biehler Pollaci (Novaindef), Ignacio Virués de Segovia (Novaindef), Francisco Javier González (Novaindef), Fernando Adrián Lasagni (Novaindef), Milton Pérez Cruz (USN FDRMC DET ROTA SP, US NAVY) y Nicholas Bratney (USN FDRMC DET ROTA SP, US NAVY).

Los eductores son dispositivos que utilizan el flujo de un fluido para impulsar otros fluidos o sólidos. A diferencia de los eyectores, empleados para generar vacío, los eductores se utilizan para bombear fluidos mediante una única bomba. Habitualmente, se fabrican por fundición (CuSn/CuNi/CuNiAl) y, debido a las condiciones de operación a las que están sometidos, son componentes expuestos a un desgaste continuo que limita su vida útil. Por ello, su sustitución debe planificarse con antelación, teniendo en cuenta los largos plazos de fabricación asociados a la fundición, sobre todo en producciones unitarias. No obstante, esta planificación a menudo se ve dificultada por la complejidad de evaluar el estado real de los componentes, ya que la medición de espesores mediante técnicas de ultrasonido puede resultar imprecisa o limitada por la geometría de la pieza o debido a la propia ubicación de la pieza. La fabricación aditiva ofrece una alternativa eficaz para este tipo de situaciones, al permitir tiempos de entrega reducidos en la producción de piezas unitarias o

de bajo volumen. Esta característica la convierte en una estrategia ideal para la elaboración de repuestos o componentes especiales sin *stock* disponible o con una cadena de suministro lenta, especialmente en piezas de fundición. En el ámbito de defensa, la adopción de soluciones de fabricación aditiva es cada vez más común, con el objetivo de maximizar la operatividad de los equipos, simplificar cadenas de suministro, fomentar la interoperabilidad y mejorar la capacidad de respuesta ante imprevistos. Este artículo presenta un caso de estudio que demuestra las ventajas de la fabricación avanzada —combinando tecnologías aditivas y sustractivas— en la sustitución de un eductor. Ante una necesidad urgente, se diseña un plan de acción en dos fases: primero, se fabrica un repuesto temporal mediante tecnología de impresión 3D plástica (SLA) con una resina de alta dureza (> 450 HB) para resolver la emergencia; al mismo tiempo, se inicia la producción del componente definitivo en acero inoxidable 316L utilizando tecnología DED-Lw (Meltio). El estudio detalla todo el proceso de ingeniería, desde el escaneo de la pieza dañada hasta el sobredimensionamiento del repuesto provisional, incluyendo su validación mediante análisis CFD y estructural, pruebas de presión a más de 400 psi, así como la posterior fabricación del componente definitivo.

Remediacion de suelos contaminados por actividades militares mediante bioingeniería y bioadsorbentes: una estrategia de sellado y reduccion de la biodisponibilidad de HAP (DESEi+d, 2025: 164)

Damian Serrano-Martínez (Universidad Politecnica de Cartagena), José Luis García-Fernández (Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, IRNAS-CSIC), Rosa Posada-Baquero (Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, IRNAS-CSIC), Carmen Fernández-Lopez (University Centre of Defence at the Spanish Air Force Academy) y José Julio Ortega-Calvo (Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, IRNAS-CSIC).

Las actividades militares pueden dar lugar a suelos contaminados por hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) derivados de combustibles, explosivos o actividades logísticas. Estos compuestos representan un riesgo ambiental y sanitario significativo.

En el ámbito de la defensa, existen diversas normativas, de entre las cuales destaca el Plan de Prevención y Recuperación de Suelos Contaminados en Instalaciones Militares (PPRSCIM) aprobado por la Orden DEF/427/2021.

Esta propuesta se orienta a sistemas de descontaminación sostenibles que puedan ser desplegados en entornos complejos como bases

militares o zonas de entrenamiento, empleando técnicas innovadoras, de bajo coste y ecológicas.

El objetivo ha sido evaluar la eficacia de técnicas de bioingeniería, empleando *Bacillus subtilis*, y el uso de biochar como bioadsorbente, para la reducción de la biodisponiblidad de contaminantes orgánicos mediante el sellado de poros y reducción de difusión, utilizando naftaleno y fenantreno, ambos como compuestos modelo.

En el caso del naftaleno, se realizaron pruebas en tubos de ensayo y biorreactores con membranas de 3 µm de poro. Se compararon tratamientos con biochar, *B. subtilis* y su combinación, utilizando ácido gamma-aminobutírico (GABA) como agente quimiotáctico para potenciar la formación de *biofilms*.

En el caso del fenantreno, se emplearon los mismos tratamientos, pero exclusivamente en biorreactores.

En ambos casos, la difusión de los compuestos, marcados por carbono-14, se midió mediante trampas de ciclodextrina y detección por centelleo líquido.

Los resultados del empleo de *B. subtilis* han producido una reducción superior al 80 % de la difusión de los HAP mientras que, en el caso de biochar, del 50 %. La combinación de ambos confirmó que el principal efecto era atribuible a la bacteria.

Por ello, se concluye que el uso de biochar y bacterias quimiotácticas constituye una estrategia efectiva para disminuir la biodisponibilidad de contaminantes en suelos.

Esta metodología presenta una alta aplicabilidad en entornos militares, donde se requiere minimizar la dispersión de contaminantes sin necesidad de intervenciones agresivas.

Además, el uso de estos HAP como modelo permite extrapolar los resultados a otros compuestos aromáticos comunes en actividades militares, entre los cuales se encuentran derivados del JP-8, explosivos, y productos de combustión.

Evaluación del potencial del HVO como combustible sostenible en lanchas de instrucción de la Armada (DESEi+d, 2025: 231)

Lara Febrero Garrido (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, Grupo InTeam, Plaza de España, s/n, Marín, 36920, España), Antón Cacabelos Reyes (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, Grupo InTeam, Plaza de España, s/n, Marín, 36920, España), Arturo González Gil (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, Grupo InTeam, Plaza de España, s/n, Marín, 36920, España), André Louis Boehman (Department of Aerospace Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, 48109, MI, USA), Carlos Pérez Collazo (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, Plaza de España, s/n, Marín, 36920, España) y Alejandro Gordillo Herranz (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, Plaza de España, s/n, Marín, 36920, España).

En el contexto actual de transición energética y lucha contra el cambio climático, las Fuerzas Armadas españolas, y en particular la Armada, están adoptando medidas orientadas a la sostenibilidad, sin comprometer la seguridad, fiabilidad y operatividad de sus sistemas. Uno de los principales desafíos en el proceso de descarbonización del sector naval es la reducción del uso de combustibles fósiles en los buques actuales. La Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID-2020) ya establece como prioridad el desarrollo e incorporación de combustibles

no derivados del petróleo, promoviendo el uso de alternativas renovables en motores y generadores existentes. En este marco, se plantea un estudio comparativo entre dos lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar (ENM): una propulsada con gasóleo B y otra con HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*), un diésel 100 % renovable. El objetivo principal es evaluar el potencial del HVO para reducir la intensidad de carbono asociada a las operaciones navales, sin comprometer el rendimiento de los sistemas. Durante las pruebas, se analizaron diversos parámetros operativos como el consumo de combustible, revoluciones, velocidad, presiones y temperaturas de los motores. Además, se empleó un analizador de gases portátil para medir las emisiones - incluyendo dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOX) - generadas durante la navegación. Esta metodología permite una evaluación objetiva del comportamiento de ambos combustibles en condiciones reales de uso. Los resultados del estudio demuestran que este combustible no solo es plenamente compatible con los sistemas actuales, sino que también aporta beneficios medioambientales relevantes, lo cual aporta una reducción significativa de las emisiones contaminantes sin comprometer el rendimiento operativo de las lanchas. Esta característica convierte su implementación en una solución viable, de bajo impacto técnico y con efectos positivos tanto a nivel ambiental como estratégico. Además, el uso de combustibles renovables como el HVO contribuiría a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y a reforzar la autonomía energética y la resiliencia de la cadena de suministro en el ámbito de la defensa. Desde un punto de vista científico-técnico, este estudio puede ser de utilidad para orientar futuras decisiones en el proceso de transición energética del entorno militar.

Aplicación de baterías de aluminio-ion para la optimización energética en campamentos militares desplegables (DESEi+d, 2025: 254)

Joaquín Chacón (Zelestium Technologies) y Paloma Almodóvar (Zelestium Technologies).

Los campamentos militares desplegables requieren soluciones energéticas fiables, seguras y sostenibles que garanticen la continuidad operativa en entornos remotos o de difícil acceso. Las fuentes convencionales, como generadores diésel y baterías de Litio-ion, presentan limitaciones relacionadas con la logística de abastecimiento, el riesgo de inflamabilidad, y el impacto ambiental. En este contexto, las baterías de Aluminio-ion (Al-ion) emergen como una alternativa tecnológica innovadora que podría transformar la manera en que se gestiona la energía en entornos militares.

Este trabajo analiza el potencial de las baterías Al-ion como sistema de almacenamiento energético en campamentos militares temporales y móviles. A través de una revisión comparativa con tecnologías existentes, se destacan sus principales ventajas: alta seguridad térmica, rápida capacidad de recarga, vida útil prolongada, bajo coste de materiales y ausencia de metales críticos o de difícil obtención. Asimismo, se exploran sus posibilidades de integración con microrredes híbridas, sobre todo aquellas basadas en fuentes renovables como paneles solares y turbinas eólicas portátiles, lo cual reduce la dependencia de combustibles fósiles.

Se presentan casos de estudio simulados y datos preliminares obtenidos en condiciones controladas que demuestran la eficacia de estas baterías en escenarios con variabilidad de carga y temperaturas extremas. También se discuten aspectos logísticos clave, como la simplificación en la cadena de suministro, y la mejora en la seguridad del personal al evitar combustibles inflamables y materiales reactivos.

Finalmente, se propone una hoja de ruta para la adopción progresiva de esta tecnología dentro de las fuerzas armadas, incluyendo fases de prueba, validación operativa y escalado, con miras a su integración en futuras doctrinas de sostenibilidad energética militar.

Este estudio contribuye al avance de soluciones energéticas resilientes y sostenibles, alineadas con los objetivos de eficiencia operativa y reducción del impacto ambiental en entornos de defensa.

ECOBALLIFE: desarrollo de sistemas de protección balística sostenibles (DESEi+d, 2025: 271)

Iñigo Agote (TECNALIA Research y Innovation), Cristina Guraya (TECNALIA Research y Innovation), José Gisber (Asociación de la investigación textil (AITEX).) y Michela Cantú (PETROCERAMICS).

El presente trabajo tiene como objetivo presentar los resultados más relevantes del proyecto ECOBALLIFE. ECOBALLIFE es una iniciativa financiada por la Unión Europea en el marco del programa EDF-2021-MATCOMP-R-PHE, y está supervisada por la Agencia Europea de Defensa (EDA). Su finalidad es el desarrollo de sistemas de protección balística innovadores y sostenibles, tanto para el combatiente individual como para plataformas operativas, como vehículos. El proyecto se centra en el diseño y fabricación de soluciones de blindaje que ofrezcan altos niveles de protección, utilizando materiales ecoeficientes que minimicen el impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida. Para ello, se integran tecnologías avanzadas de materiales cerámicos, metálicos y poliméricos, junto con procesos de fabricación sostenibles. Asimismo, se consideran aspectos clave como la ergonomía, el peso y el confort para garantizar una protección eficaz sin comprometer la movilidad del usuario. Durante esta presentación se exponen los resultados más destacados relacionados con el desarrollo de nuevos sistemas de protección personal mediante el uso de cerámica reciclada. Se han empleado dos tipos de materiales

cerámicos a base de carburo de boro (B_4C): piezas defectuosas generadas durante el proceso de fabricación y piezas densas recuperadas tras su uso en servicio. Con estos materiales reciclados se han fabricado sistemas de protección balística, comparándolos con sistemas equivalentes que emplean cerámica virgen. A lo largo del proyecto, se ha optimizado tanto el proceso de reciclaje de estas cerámicas como su posterior procesado. Los materiales reciclados se han integrado en un sistema tipo ICW (*In Conjunction With*), caracterizado por su ligereza (<32 kg/m² para la placa rígida). Este sistema combina un panel flexible con un panel rígido desmontable, lo que permite adaptar el nivel de protección al tipo de amenaza, incrementando así tanto la superficie protegida como el grado de protección ofrecido. Se han desarrollado sistemas híbridos que combinan cerámicas de B_4C con soportes (*backings*) de UHMWPE (polietileno de ultra alto peso molecular). Estas soluciones junto con el panel flexible se han ensayado para resistir múltiples impactos de acuerdo con los requisitos del Nivel IV de la norma NIJ 0101.06. Finalmente, se presentan los resultados comparativos entre los sistemas que utilizan cerámica reciclada y aquellos basados en cerámica virgen, lo cual evidencia el potencial de las soluciones recicladas como alternativa sostenible y eficaz para la protección balística.

Optimización del tratamiento de aguas residuales de buques mediante tecnologías avanzadas de adsorción y oxidación (DESEi+d, 2025: 278)

Santiago Domínguez Gómez (Ministerio de Defensa, Armada española), Lorena González Gil (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, CUD-ENM), Rosa Devesa Rey (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, CUD-ENM), Santiago Urréjola (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, CUD-ENM) y Francisco Javier Rodríguez Rodríguez (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, CUD-ENM).

El tratamiento eficiente y sostenible de aguas residuales en buques es clave para mitigar su impacto ambiental en los ecosistemas marinos. Este trabajo se enmarca en el contexto del cumplimiento del convenio MARPOL y otras normativas nacionales e internacionales, sobre todo relevantes para la Armada española. En él se analiza la viabilidad de aplicar tecnologías avanzadas de postratamiento en entornos navales, con el objetivo de optimizar los sistemas de depuración en uso en las unidades de la Armada en la actualidad, basados mayoritariamente en procesos fisicoquímicos de coagulación-floculación y desinfección por hipoclorito, el cual genera subproductos tóxicos en presencia de materia orgánica y puede alterar el medio marino por la presencia residual de cloro en el efluente. En el presente estudio se han evaluado tres alternativas

innovadoras: radiación ultravioleta (UV), procesos de oxidación avanzada con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y adsorción mediante hidróxidos dobles laminares (HDL) tipo hidrotalcita, sintetizados en laboratorio. Estas tecnologías se aplicaron individualmente y en combinación sobre muestras reales de aguas residuales provenientes de la fragata F-102. En concreto, el agua residual se obtuvo de un punto intermedio de la planta de tratamiento, antes de la adición del floculante y del hipoclorito. El objetivo es evaluar si estas tecnologías permiten reducir de forma más eficiente que los sistemas actuales contaminantes clave, como la materia orgánica, nitrógeno y fósforo, así como la turbidez. El estudio incluyó un diseño experimental tipo Box-Behnken para optimizar parámetros operativos (concentración de HDL, porcentaje de H_2O_2 y tiempo de exposición UV), que permitan obtener mejoras significativas en la eficiencia de eliminación de contaminantes. Los resultados demuestran que la combinación óptima de HDL (5 mg/ml), UV (70 min) y H_2O_2 (3 % v/v) permite alcanzar eliminaciones de materia orgánica, nitrógeno y fósforo superiores al 90 %, y valores de turbidez muy bajos. Las altas eficacias alcanzadas, junto con la simplicidad operativa, y el bajo impacto ambiental asociado a estas tecnologías, sugieren que se trata de estrategia robusta y adaptable al entorno naval, con potencial para integrarse en los sistemas actuales de tratamiento a bordo. Esta aproximación no solo mejora la calidad del efluente tratado, sino que también contribuye a reforzar el compromiso medioambiental de la Armada española. Además, la investigación llevada a cabo sienta las bases para futuras implementaciones a escala real y abre nuevas líneas de trabajo centradas en el desarrollo de sistemas modulares, energéticamente eficientes y adaptables a las condiciones específicas de operación en buques.

Propulsión naval sostenible: estudio de viabilidad tecno-económica para su implantación en la Armada (DESEi+d, 2025: 282)

Carlos Pérez Collazo (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), Lara Febrero Garrido (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), Antón Cacabelos Reyes (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), Arturo González Gil (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar), José Gómez-Vizcaíno Escudero (Escuela Naval Militar) y Andre Boehman (Department of Mechanical Engineering, University of Michigan).

El actual panorama de cambio climático ha provocado una creciente conciencia social respecto a la necesidad de adaptar el funcionamiento de la sociedad a un modelo más sostenible. En esta línea, la Unión Europea establece un objetivo de cero emisiones para el año 2050. Para ello, resulta indispensable la transición progresiva hacia el uso de combustibles renovables que sustituyan a los combustibles fósiles que se usan mayoritariamente hoy en día. Asimismo, el ámbito de la defensa se encuentra involucrado en este proceso de cambio con el objetivo de minimizar la huella de carbono producida por las operaciones militares. Este trabajo aborda la realización de un estudio tecno-económico de los combustibles alternativos más prometedores para su implementación en los buques de la Armada, así como identificar las plataformas navales más aptas para

su transición a corto plazo hacia estas nuevas formas de obtención de la energía necesaria para sus operaciones. Para ello, se emplea un análisis del coste total de propiedad, de la mano de un análisis DAFO de diferentes combustibles renovables, tales como el hidrógeno, el amoniaco, el metanol renovable o los aceites vegetales hidrotratados (HVO).

Análisis integral de las aguas residuales generadas en buques de la Armada: caracterización y eficacia de diferentes sistemas de depuración (DESEi+d, 2025: 296)

Lorena González Gil (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, CUD-ENM), Guillermo Huertas Roldán (Armada española, Ministerio de Defensa), Sofía Garro Martínez (Armada española, Ministerio de Defensa), Leticia Pérez Rial (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, CUD-ENM), Arturo González Gil (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, CUD-ENM) y Lara Febrero Garrido (Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, CUD-ENM).

La Armada española dispone de una amplia variedad de buques que presentan importantes diferencias en cuanto a tamaño, dotación, año de fabricación, sistemas de recogida y separación de aguas residuales, así como en frecuencia y duración de navegación. Estas particularidades hacen que tanto las características de las aguas residuales generadas como los sistemas de tratamiento empleados varíen de manera significativa entre unidades. Para poder proponer mejoras en los sistemas de depuración a bordo, y avanzar en el cumplimiento de los requisitos establecidos en el anexo IV del convenio MARPOL, resulta esencial conocer en detalle los caudales y la carga contaminante de las aguas generadas, así como la eficacia de los diferentes sistemas instalados. En este contexto, se llevó a cabo la

cuantificación y caracterización de las aguas residuales (mezcla de aguas negras y grises) generadas en sietes buques representativos (dos fragatas de la serie F100, una F80, un buque de aprovisionamiento, un buque de asalto anfibio, un buque de acción marítima y un buque multipropósito). El análisis incluyó parámetros fisicoquímicos convencionales (pH, turbidez, sólidos, materia orgánica —DQO—, nitrógeno y fósforo) y contaminantes emergentes (antibióticos y antiinflamatorios), cuya presencia en aguas residuales de buques no ha sido estudiada. Los resultados revelaron una elevada carga contaminante en las aguas, generalmente superior a la observada en buques civiles y redes urbanas, con especial énfasis en los niveles de nutrientes y materia orgánica. Asimismo, se evaluó la eficacia de cuatro plantas de depuración a bordo (tres fisicoquímicas y una biológica) con diferentes sistemas de desinfección (hipoclorito, ozono y lámpara UV), mediante muestreos en distintas fases del proceso. Además, los resultados se compararon con los límites de contaminación establecidos por MARPOL. Se concluye que las plantas fisicoquímicas pueden alcanzar una buena eliminación de nutrientes, mientras que la planta biológica presenta mejores eliminaciones de sólidos en suspensión. No obstante, la calidad del efluente final presenta oportunidades de mejora en todas las tipologías de tratamiento evaluadas. El análisis comparativo de tecnologías, además de identificar fortalezas y debilidades de los sistemas actuales, permitió formular propuestas orientadas a optimizar su rendimiento, sostenibilidad y cumplimiento normativo. Este estudio pretende ser un punto de partida hacia una gestión más eficiente y ambientalmente responsable de las aguas residuales generadas en buques militares.

Eliminación de contaminantes en medios acuosos mediante filtros poliméricos dopados con algas (DESEi+d, 2025: 297)

Rosa Devesa Rey (Centro Universitario de la Defensa), Jorge Ruiz de Almiron Denia (ENM - Centro Universitario de la Defensa) y Jesús del Val García (Centro Universitario de la Defensa).

Uno de los grandes desafíos actuales es el mantenimiento de la calidad de los recursos hídricos, los cuales se encuentran sometidos a una gran presión debido a la actividad humana industrial de alto impacto. Todo ello produce efluentes con altas concentraciones de contaminantes de diversa índole, como aguas residuales ricas en nitrógeno, metales pesados, compuestos orgánicos, o fosfatos. El vertido al medioambiente de estos contaminantes sin un tratamiento previo adecuado puede provocar fenómenos de eutrofización, llegando a provocar disminuciones irreparables de la biodiversidad del medio y pérdida de la calidad del agua. Para el tratamiento de las aguas contaminadas está extendido el uso de técnicas de filtración con distintos reactivos químicos que sin embargo tienen una serie de problemas, como la obturación de los filtros o la propia toxicidad de los reactivos empleados, que dan lugar tanto a la disminución de su eficacia como a la necesidad de un entorno de aplicación controlado.

En los últimos años ha ido creciendo el interés en la utilización de microalgas para la eliminación de contaminantes en medios acuosos debido a que tienen una gran capacidad de adsorción y bioacumulación de diversos

compuestos, además de que, por su propia naturaleza, no presentan toxicidad para el medio. Sin embargo, una de sus mayores desventajas es la dificultad de fijar las microalgas en una zona concreto, lo cual hace necesario circular el agua contaminada a través de diversos depósitos y conductos donde previamente se ha cultivado las microalgas. Es por ello por lo que en este trabajo se propone la fijación de microalgas en mallas de fibras de poliméricas, fabricadas mediante la técnica de *electrospinning*, que permitan fabricar filtros a medida en función de necesidades específicas, tanto a nivel geométrico como de los tipos de contaminantes a eliminar del medio acuoso. Se ha llevado a cabo un estudio sistemático de mallas de fibras dopadas con microalgas en distintas concentraciones, y analizado su comportamiento frente a diversos contaminantes.





PUBLICACIONES DE DEFENSA

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE DEFENSA

SUBSECRETARÍA DE DEFENSA
SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PUBLICACIONES Y PATRIMONIO CULTURAL