

Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Optimización de la planificación de mantenimiento de helicópteros de la Armada

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Elena Catalina de Castellví Rodríguez

DIRECTOR: María Álvarez Hernández

CURSO ACADÉMICO: 2020-2021

Universidade Vigo



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Optimización de la planificación de mantenimiento de helicópteros de la Armada

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

Universidade Vigo

RESUMEN

La Décima Escuadrilla de aeronaves de la Armada Española es una pieza clave en los escenarios navales actuales. Sus doce helicópteros, normalmente embarcados en buques de la Armada, se caracterizan por poder cumplir una gran cantidad de objetivos en demanda de España. La prioridad de esta escuadrilla es, sin duda, optimizar la operatividad de sus unidades, teniendo en cuenta que deben recibir una serie de mantenimientos preventivos para estar disponibles. Los mantenimientos programados, aunque incrementan en corto plazo la eficacia en las operaciones y a largo plazo, la vida útil de la aeronave, también lo hace el tiempo de inactividad, reduciendo la disponibilidad de las unidades. Este proyecto presenta un modelo matemático basado en la Programación Lineal que minimiza el número de helicópteros desplegados que entran en mantenimiento. Para su formulación y posteriormente, su implantación para servir como una aplicación, se ha contado con todas las características del helicóptero SH-60B y su mantenimiento. Esto matemáticamente se expresa en forma de datos, variables y restricciones, que encauzan y acotan el problema para garantizar que por cada misión que requiere un helicóptero, hay uno estipulado. La aplicación permite asignar helicópteros a misiones según sus horas de vuelo, ya que estas indican, de forma periódica, cuando un helicóptero debe iniciar mantenimiento. Además, asegura que las semanas de mantenimiento en las misiones sean las mínimas posibles.

PALABRAS CLAVE

Investigación Operativa, helicópteros, Programación Lineal, optimización, mantenimiento preventivo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero que mis primeras palabras de agradecimiento sean para mi familia, por su apoyo y cariño incondicional durante toda mi vida, y en especial durante mis cinco años en la Escuela Naval Militar. No solo ha sido un reto grande para mí, para ellos también.

Debo agradecer a mi tutora, María Álvarez Hernández, por su dedicación , constancia y paciencia durante el desarrollo de este trabajo. Por hacer que lo difícil parezca fácil, y sobre todo por guiarme y aclarar mis dudas en cada momento que lo he necesitado.

Al Capitán de Fragata Ramón Touza Gil, por su esfuerzo y ayuda desinteresada cuando me he podido atascar con la programación de este trabajo. Agradecer además, por las presentaciones recibidas y enseñadas el primer cuatrimestre, reflejadas en la bibliografía.

No menos importante, agradecer a el Teniente de navío Alejandro Sánchez Guerrero, jefe de mantenimiento de la Décima Escuadrilla. Sin su ayuda hubiera sido imposible realizar este proyecto. Gracias por toda la información proporcionada y sobre todo, por la rapidez y calidad de sus respuestas.

Me gustaría que quedase reflejado, mi agradecimiento a mis compañeros de la promoción 421-151. Los cinco años juntos me han cambiado la vida, y he aprendido que cuando vienen momentos difíciles, la unión hace la fuerza.

Por último, quiero agradecer a mis compañeras de camareta y estudio, Cristina, Ida, María y Rocío, con las que he compartido muy de cerca este último año. Gracias por todo el apoyo y los momentos de distracción. Al resto de mis compañeras de promoción, todas ellas han sido mi fuente cercana de motivación para el desarrollo del TFG.

CONTENIDO

Contenido 1
Índice de Figuras 3
Índice de Tablas 6
Matrices 7
Glosario de acrónimos 9
1 Introducción y objetivos 11
1.1 Antecedentes y justificación 11
1.2 Objetivos 11
1.3 Estructura del trabajo 13
2 Estado del arte 15
2.1 Investigación operativa 15
2.1.1 Modelo de Investigación Operativa 16
2.1.2 Investigación Operativa del Ministerio de Defensa 17
2.1.3 Gabinete de Investigación Militar Operativa y Estadística de la Armada (GIMO) 18
2.2 Programación Lineal 19
2.2.1 Problemas con programación lineal 20
2.2.2 Programación Lineal Entera (PLE) 22
2.2.3 Método Simplex 22
2.3 Excel 25
2.3.1 Solver 26
2.4 Décima Escuadrilla de aeronaves de la Armada Española 28
2.4.1 Principales operaciones y ejercicios 31
2.4.2 Seguridad del helicóptero. 34
2.5 Mantenimiento de aeronaves de la Décima Escuadrilla 35
2.5.1 Niveles de mantenimiento 36
2.5.1.1 Nivel O 38
2.5.1.2 Nivel I 40
2.5.1.3 Nivel D 41
3 Programación del mantenimiento preventivo de la décima escuadrilla 43
3.1 Problema planteado 45
4 Validación y resultados 51
4.1 Implementación del problema en Excel 51
4.1.1 Hoja ‘DATOS’ 52

4.1.2 Hoja ‘FUNCIÓN OBJETIVO’ 53
4.1.3 Hojas ‘MISIONES’ y ‘MANTENIMIENTO’ 60
4.1.4 Solución con Solver 62
4.2 Escenario operativo 64
5 Conclusiones y líneas futuras 69
5.1 Conclusión 69
5.2 Líneas futuras 70
6 Bibliografía 73
Anexo I: Mission Essential Subsystem Matrix (MESM) 77
Anexo II: GALIA AERONAVES 79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Mantenimiento de la Décima Escuadrilla (Fuente: Décima Escuadrilla)..... 12
Figura 1-2 Estructura del trabajo (Fuente: Elaboración propia)..... 14
Figura 2-1 Modelo de optimización (Fuente: Elaboración propia) [6] 17
Figura 2-2 Distintivo IMO (Fuente: Ministerio de Defensa) 17
Figura 2-3 Investigación Militar Operativa (Fuente: Revista Española de Defensa)..... 18
Figura 2-4 Organigrama del Servicio de IMO (Fuente: Elaboración propia) [10] 18
Figura 2-5 Gráfica de un problema con dos variables (Fuente: Elaboración propia) [4]..... 21
Figura 2-6 Gráfica de un problema con solución factible (Fuente: Elaboración propia) [4] 21
Figura 2-7 Diagrama de flujo del Método Simplex (Fuente: Elaboración propia) [15]..... 23
Figura 2-8 Representación gráfica (Fuente: Elaboración propia) 24
Figura 2-9 Representación iteraciones con el método simplex (Fuente: Elaboración propia).... 25
Figura 2-10 Logotipo de Solver [18]..... 26
Figura 2-11 Acceso a Solver en la hoja de cálculo (Fuente: Elaboración propia) 26
Figura 2-12 Pantalla principal de Solver (Fuente: Elaboración propia)..... 26
Figura 2-13 Agregar restricción en Solver (Fuente: Elaboración propia)..... 27
Figura 2-14 Agregar restricción entera (Fuente: Elaboración propia) 27
Figura 2-15 Agregar restricción binaria (Fuente: Elaboración propia)..... 27
Figura 2-16 Estructura orgánica de la Flota de la Armada (Fuente: Elaboración propia) [21]... 28
Figura 2-17 Escudo 10ª Escuadrilla de aeronaves (Fuente: Armada Española) [20]..... 28
Figura 2-18 Cobertura de superficie con Radar del SH-60B (Fuente: Elaboración propia) [22] 29
Figura 2-19 Sensores helicóptero SH-60B (Fuente: Elaboración propia) [22] 30
Figura 2-20 Características del helicóptero SH-60B (Fuente: Elaboración propia) 31
Figura 2-21 Helicóptero de la 10ª Escuadrilla embarcado (Fuente: Armada Española) [20] 32
Figura 2-22 Operaciones internacionales del SH-60 B en Marzo de 2021 (Fuente: Elaboración propia) [26] 33
Figura 2-23 Operaciones internacionales del SH-60B en Junio de 2021 (Fuente: Elaboración propia) [26] 33
Figura 2-24 Previsión despliegue de buques con la Décima Escuadrilla (Fuente: Elaboración propia)..... 33
Figura 2-25 Operación Atalanta en 2019 (Fuente: Décima Escuadrilla) 34
Figura 2-26 Categorías que pueden presentar riesgos en las aeronaves (Fuente: Elaboración propia)..... 34
Figura 2-27 Elementos importantes de la aeronave en caso de accidente (Fuente: Elaboración propia) [27] 35

Figura 2-28 Organigrama Sostenimiento de Aeronaves en la Armada (Fuente: Décima Escuadrilla) [31] 37
Figura 2-29 Escuadrón de mantenimiento (Fuente: Décima Escuadrilla) 38
Figura 2-30 Secuencia de las Task cards (Fuente: 10ª Escuadrilla) 39
Figura 2-31 Realizando Turn Around (Fuente: Décima Escuadrilla) 40
Figura 2-32 Resumen de mantenimientos que recibe el SH-60B (Fuente: Elaboración propia) 41
Figura 3-1 Partes principales en las que se centra el de mantenimiento (Fuente: Elaboración propia) [34] 43
Figura 3-2 Características de la combinación de las inspecciones (Fuente: Elaboración propia) 44
Figura 3-3 Representación visual de la programación (Fuente: Elaboración propia) [37] 46
Figura 4-1 Representación esquemática del programa de mantenimiento (Fuente: Elaboración propia) 51
Figura 4-2 Hojas de cálculo del Programa (Fuente: Elaboración propia) 52
Figura 4-3 Fórmulas utilizadas para la Matriz 4-1 (Fuente: Elaboración propia) 52
Figura 4-4 Operatividad de la Décima Escuadrilla (Fuente: Elaboración propia) 53
Figura 4-5 Disponibilidad de la Décima Escuadrilla (Fuente: Elaboración propia) 53
Figura 4-6 Fórmulas utilizadas para la Matriz 4-2 (Fuente: Elaboración propia) 54
Figura 4-7 Función utilizada en la Matriz 4-3 (Fuente: Elaboración propia) 55
Figura 4-8 Función utilizada para la Matriz 4-9 (Fuente: Elaboración propia) 58
Figura 4-9 Función utilizada para la Matriz 4-10 (Fuente: Elaboración propia) 59
Figura 4-10 Función utilizada para la Matriz 4-11 (Fuente: Elaboración propia) 59
Figura 4-11 Función para la Matriz 4-13(Fuente: Elaboración propia) 60
Figura 4-12 Lista de buques de la Armada en el programa (Fuente: Elaboración propia) 61
Figura 4-13 Cuadro diálogo de Solver, para la resolución del problema (Fuente: Elaboración propia) 62
Figura 4-14 Restricciones en la hoja 'FUNCIÓN OBJETIVO' (Fuente: Elaboración propia) 62
Figura 4-15 Restricción A del problema en la Matriz 4-10 (Fuente: Elaboración propia) 63
Figura 4-16 Restricciones B, C y D aplicada en la Matriz 4-7 (Fuente: Elaboración propia) 63
Figura 4-17 Datos de un posible escenario (Fuente: Elaboración propia) 64
Figura 4-18 Operatividad para escenario propuesto (Fuente: Elaboración propia) 64
Figura 4-19 Disponibilidad helicópteros para el escenario propuesto (Fuente: Elaboración propia) 65
Figura 4-20 Centro de Buceo de la Armada (Fuente: Décima Escuadrilla) 66
Figura 4-21 Vuelo del SH-60B en formación con la Australian Navy en las aguas del Golfo de Adén (2019) (Fuente: Décima Escuadrilla) 68
Figura 5-1 Vida marina en Somalia con SH-60B (Fuente: Décima Escuadrilla) 70
Figura A1-0-1 MESM del helicóptero SH-60 (Fuente: Décima Escuadrilla) [32] 77

Figura A1-0-2 Segunda parte de la MESM (Fuente: Décima Escuadrilla) [32] 78

Figura A2-01-1 Flujo de la documentación técnica en GALIA que siguen los PMM (Fuente: Décima Escuadrilla) 80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Datos problema (Elaboración propia). 23
Tabla 2-2 Soluciones FEV con adyacentes y valor de Z (Elaboración propia) 25
Tabla 2-3 Características Helicóptero SH-60B (Elaboración propia). [21] 30
Tabla 2-4 Plataformas con capacidad para embarcar SH-60B (Elaboración propia). [26] 31

MATRICES

Matriz 4-1 Estado inicial de cada helicóptero (Fuente: Elaboración propia) 52
Matriz 4-2 Horas de vuelo de los helicópteros por semanas (Fuente: Elaboración propia) 54
Matriz 4-3 Helicópteros en mantenimiento (Fuente: Elaboración propia) 55
Matriz 4-4 Helicópteros requeridos para cada misión (Fuente: Elaboración propia) 56
Matriz 4-5 Misiones (Fuente: Elaboración propia) 56
Matriz 4-6 Mantenimiento (Fuente: Elaboración propia) 56
Matriz 4-7 Asignación de helicópteros (Fuente: Elaboración propia) 57
Matriz 4-8 Mantenimientos reales (Fuente: Elaboración propia) 57
Matriz 4-9 Helicópteros desplegados (Fuente: Elaboración propia) 58
Matriz 4-10 Helicópteros operativos en la Base Naval de Rota (Fuente: Elaboración propia) 58
Matriz 4-11 Fases de mantenimiento de los helicópteros por semanas (Fuente: Elaboración propia) 59
Matriz 4-12 Fases de mantenimiento (Fuente: Elaboración propia) 60
Matriz 4-13 Horas de vuelo en una misión (Fuente: Elaboración propia) 60
Matriz 4-14 Mantenimiento de un helicóptero desplegado en una misión (Fuente: Elaboración propia) 61
Matriz 4-15 Horas de vuelo para escenario propuesto (Fuente: Elaboración propia) 65
Matriz 4-16 Mantenimiento en el escenario propuesto (Fuente: Elaboración propia) 65
Matriz 4-17 Helicópteros requeridos para escenario propuesto (Fuente: Elaboración propia) 66
Matriz 4-18 Helicópteros desplegados para caso propuesto (Fuente: Elaboración propia) 67
Matriz 4-19 Helicópteros operativos en Rota según escenario propuesto (Fuente: Elaboración propia) 67

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

A continuación se detallan en orden alfabético una serie de acrónimos utilizados a lo largo de este proyecto.

AJAL	Almirante Jefe de Apoyo Logístico de la Armada.
ARDIZ	Arsenal de Cádiz.
ASUW	Anti-Surface Warfare (Guerra de superficie).
ASW	Anti-Submarine Warfare (Guerra antisubmarina).
BAA	Buque de Asalto Anfibio.
BAC	Buque de Aprovisionamiento de Combate.
BAM	Buque de Acción Marítima.
CMA	Certificado de Aeronavegabilidad Militar.
CMOPS	Comandante del Mando de Operaciones.
COMREL	Relé de Comunicaciones.
DISOP	Disponibilidad Operativa. Parámetro que refleja el estado de alistamiento y operatividad de una unidad.
DISOS	Dirección de Sostenimiento, perteneciente a la Jefatura de Apoyo Logístico.
FEV	Soluciones Factibles en los vértices.
FLOAN	Flotilla de Aeronaves de la Armada.
GAS FLOAN	Grupo de Apoyo al Sostenimiento de la FLOAN. El personal que forma parte de este grupo depende orgánicamente del AJAL a través del JEGAS FLOAN, encarnado en la figura del Comandante de la FLOAN. Es decir, JEGAS FLOAN tiene dos responsabilidades, la de Comandante de la FLOAN (dependiente del Almirante de la Flota) y la de JEGAS FLOAN (dependiente del Almirante de Apoyo Logístico).
GIMO	Gabinete de Investigación Militar Operativa y Estadística de la Armada.
IMC	Instrumental Meteorological Conditions.
IMO	Investigación Militar Operativa.
JAL	Jefatura de Apoyo Logístico.
JEGAS FLOAN	Jefe de GAS FLOAN.
JEMA	Jefe de Estado Mayor del Ejército del Aire.
JIT	Just In Time.
LAMPS	Light Airbone Multipurpose System.
LHD	Landing Helicopter Dock.
MEDEVAC	Operaciones Militares de Evacuación Médica.
MESM	Mission Essential Subsystem Matrix.

NAVAIR	Naval Air Systems. Sistemas aéreos de la Marina de los Estados Unidos.
NSF	Observaciones de fuego naval de apoyo.
PEB	Programación Entera Binaria.
PEM	Programación Entera Mixta.
PLE	Programación Lineal Entera.
PMI	Planned Maintenance Intervals.
PMM	Parte de Mantenimiento Mecanizado. Documento por el que se solicita una petición de asistencia de mantenimiento a la Jefatura de Mantenimiento correspondiente.
RCM	Reliability Centered Maintenance. Tipo de mantenimiento centrado en la fiabilidad. Es un proceso diseñado para garantizar que los sistemas continúen haciendo lo que sus usuarios requieren en su contexto operativo actual. Generalmente se usa para lograr mejoras en campos tales como el establecimiento de niveles de mantenimiento mínimos seguros.
SAR	Servicio de Búsqueda y Salvamento Aéreo.
SEGENTE	Secretario General Técnico del Ministerio de Defensa.
SNMG	Agrupaciones Navales Permanentes de la OTAN.
UNAEMB	Unidad Aérea Embarcada.
USGC	United States Coast Guard.
VERTREP	Vertical Replenishment.
VOD	Vertical Onboard Delivery.

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes y justificación

Para optimizar la operatividad de los helicópteros de la Armada Española, es necesario contar con una herramienta que sea capaz de gestionar su mantenimiento preventivo, basándose en las horas de vuelo. El máximo rendimiento de esta plataforma se conseguirá mediante el empleo de las matemáticas de forma precisa. También, aporta otro tipo de ventajas, como reducir el trabajo de los usuarios que coordinan cada tipo de mantenimiento para cada una de las unidades en particular, consiguiendo un proceso automatizado.

Actualmente, la Armada se encuentra en un auténtico reto de adaptación. La transformación digital que está atravesando, le permite ajustarse a un entorno completamente liderado por la tecnología, novedoso y turbulento, es decir, de constante cambio. La Armada 4.0 busca servirse de las recientes oportunidades presentadas, maximizando la eficiencia para la gestión de recursos materiales, financieros y humanos, que España pone a su disposición. En el ámbito logístico, también se ha iniciado el concepto de Sostenimiento 4.0, aplicable a los objetivos principales de la planificación llevada a cabo en este trabajo. [1]

La Armada Española necesita una flota de aeronaves que se adapte a los riesgos que España deba afrontar, reduciendo los costes y la cantidad de equipos y sistemas, pero alcanzando una sostenibilidad y operatividad inmejorables, en todo momento. Por lo tanto, en este Trabajo de Fin de Grado se propone la planificación de las operaciones de mantenimiento programado de la Décima Escuadrilla, mediante el uso de la Programación Lineal, que no debe confundirse con la programación informática. El diseño de un plan de mantenimiento óptimo es complejo y aparece como consecuencia de la necesidad de tratar con un buen número de predicados lógicos, que hay que convertir en una serie de restricciones lineales para lograr su resolución. La solución no deja de ser una decisión que apoya al mando, siendo exacta y precisa gracias al empleo de ordenadores. La planificación del mantenimiento de aeronaves militares es exigente, pues se ha de conseguir tener las aeronaves lo más disponibles posible, respetando las restricciones de capacidad de mantenimiento de la flota.

1.2 Objetivos

El coste del mantenimiento preventivo de los helicópteros está más que justificado. En primer lugar, porque garantiza la seguridad y tranquilidad del piloto y su tripulación, así como la ejecución de las misiones o servicios asignados. Este será el principal objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado. El hecho de que una aeronave esté disponible para ser desplegada, denota que se ha llevado a

cabo, un previo trabajo y esfuerzo por parte de la unidad de mantenimiento. En segundo lugar, si se asegura la realización de estos mantenimientos programados, no solo implicará un ahorro económico y de tiempo a largo plazo, sino que también, la prolongación de la vida útil del helicóptero.

El propósito es diseñar un plan de actuación óptimo, que resuelva por semanas, previendo con la suficiente antelación cuales deben ser dedicadas a que un helicóptero de la Armada Española deba someterse a mantenimiento y, por otro lado, cuáles puede estar esta unidad desplegada en operaciones o ejercicios. De esta forma se consigue una mayor operatividad de la aeronave, estando listas para su uso cuando se requiera. Por otra parte, nos hará estocar con la suficiente antelación las piezas de repuesto ganando agilidad y tiempo.

Este proyecto se rige por unos factores que limitan y estructuran el programa bajo consideración. Por una parte, la gran cantidad de mantenimientos [Figura 1-1] que se han de realizar en una aeronave. En este caso, solo se tiene en cuenta aquellos que son preventivos, pues aunque podemos reducir en gran medida los correctivos, estos son fruto del uso habitual de la plataforma. Por otro lado, la cantidad de escenarios en los que el helicóptero puede ser desplegado. Pero sin duda, lo que realmente nos va a condicionar es el tiempo, del que dependen los dos parámetros anteriores. Utilizando técnicas de análisis propias de la Investigación Operativa, se logra obtener decisiones de forma automática, las cuales ayudan al mando a la ejecución de sus responsabilidades de forma más eficaz y sencilla.



Figura 1-1 Mantenimiento de la Décima Escuadrilla (Fuente: Décima Escuadrilla)

1.3 Estructura del trabajo

La memoria se estructura comenzando con una introducción, en la cual se abarcan todos los conceptos esenciales del trabajo. No solo los de aplicación matemática, sino que también, para ponerse en contexto, se expone la información que tiene que ver con la unidad de helicópteros de la Armada, que se ha escogido. La parte clave del trabajo, es el mantenimiento de los helicópteros, donde se profundizará y se explicará en qué consiste. Más adelante, se formulará analíticamente el problema que optimiza la distribución temporal del mantenimiento de los helicópteros. Se realiza mediante la Programación Lineal y, según una serie de limitaciones y características operativas, que influyen y acotan el programa. Posteriormente, se diseña una aplicación gracias al software de Excel, que permite obtener una planificación óptima ante un escenario aleatorio. A continuación, se propone un escenario operativo real y con información actual, proporcionada por la unidad de helicópteros. Para terminar, se analizan los resultados obtenidos, llegando a una serie de conclusiones y líneas futuras de este trabajo.

El trabajo se divide en los siguientes apartados [Figura 1-2]:

- Estado del arte: en este capítulo se explica el concepto de Investigación Operativa, su relación con las Fuerzas Armadas y en qué consiste el modelo matemático que se implementará para el diseño del programa. Se desarrolla a su vez, el método de resolución de este modelo y la utilización de Excel. Para obtener esta información se han consultado proyectos en la red y presentaciones de asignaturas de la rama de las matemáticas. Se destaca en esta parte el libro '*Investigación de operaciones'* de Frederick S. Hillier, de donde se han contrastado procedimientos y expresiones matemáticas. Se añaden a este apartado, todo lo referente a la unidad de helicópteros SH-60B y su mantenimiento. En este caso, los datos se encontraron en la página oficial de la Armada Española, en documentos oficiales de la Jefatura del Apoyo Logístico de la Armada y contactando con la Décima Escuadrilla de aeronaves.

- Programación del mantenimiento preventivo de la décima escuadrilla: comienza presentando las características que se deben de tener en cuenta, tanto las relativas al mantenimiento, como a las de operatividad de la escuadrilla. Se continua con la formulación del problema, explicándose de forma detallada cada parámetro y función. La metodología para llevar a cabo este apartado se basó estudiando un programa similar, propuesto por la United States Coast Guard (USGC) para sus helicópteros Sikorsky HH60J.

- Validación y resultados: recoge la implementación del problema en Excel y el proceso llevado a cabo para proyectar en este software, las expresiones matemáticas. Se procede a continuación, al análisis de la solución obtenida con el complemento Solver. A continuación se propone un escenario realista, sin introducir explícitamente datos actuales, pues no se permite la difusión libre del estado operativo de cada helicóptero.

- Conclusiones y líneas futuras: en este apartado se incluyen los conceptos extraídos del trabajo y los objetivos alcanzados. Se proponen futuras líneas de investigación para mejorar la automatización de procesos de las unidades de la Armada.



Figura 1-2 Estructura del trabajo (Fuente: Elaboración propia)

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Investigación operativa

En la actualidad el mayor reto al que se enfrentan tanto empresas como instituciones es el de optimizar sus recursos tanto humanos como materiales, para obtener el mayor rendimiento, así como solventar los posibles problemas que se les pueden presentar de logística. Para ello se deberán tomar decisiones de forma estratégica. Una vez detectado el problema e identificado, se formulan los objetivos y restricciones que darán lugar a la evaluación de una serie de alternativas, de las cuales saldrá la solución óptima gracias al uso de la Investigación Operativa. De forma cuantitativa, utiliza herramientas matemáticas que permiten maximizar la efectividad en la toma de decisiones consiguiendo la combinación y la comparación de la información. La Investigación Operativa ha resuelto, de forma muy significativa, la eficiencia en todo el mundo mediante aplicaciones que ayudan a tomar decisiones complejas, normalmente cuando se da la situación de recursos muy limitados. Se considera arte y ciencia; ciencia, al basarse en técnicas y algoritmos matemáticos, pero también un arte, debido a la consecución alcanzada tras aplicar un modelo matemático que implica gran creatividad. [2]

Hacer un uso óptimo de los requerimientos disponibles es una cuestión tan antigua como la humanidad. No obstante, el primer uso real de la Investigación Operativa se remonta a la 2ª Guerra Mundial debido a la necesidad urgente por asignar recursos escasos de la manera más práctica. Fue llevada a cabo por el bando aliado para desarrollar estrategias y tácticas de guerra según la demanda de los militares, resultando muy positivo. Las operaciones militares llevadas a cabo eran de incalculable dificultad logística. La estrategia aplicada a la obtención de recursos de necesidades básicas como la distribución y el estocaje de suministros tales como agua, comida, material, refuerzos o vías de transporte constituían variables determinantes, para lo que se requería la toma de decisiones muy importantes, que obviamente, tenían tanto un coste económico como humano. Si se agrupa un gran número de soldados en un área determinada, estos podrían ser rodeados, o si su distribución fuera muy dispersa, aparecerían flancos débiles que podrían aprovecharse por el enemigo. En ese momento se hizo un llamamiento a científicos a los que se le pidió que hicieran investigaciones sobre las operaciones militares. El esfuerzo de biólogos, físicos y matemáticos, entre otros, formó la primera agrupación de la Investigación Operativa. Debido a una Alemania Nazi imparable, una de las primeras cuestiones a las que se enfrentaron, fue el desarrollo de un sistema de detección militar, el primer radar, con el que se obtuvieron excelentes resultados en las batallas. [3]

La Investigación Operativa fue de vital importancia, aplicada tanto en la formación técnica de los soldados en tierra hasta la ubicación de los submarinos, debido a los ataques aéreos. Una vez finalizada la contienda y, demostrado el éxito de estas investigaciones, esta herramienta, así como otros importantes descubrimientos, pasarían a ser aplicados fuera del ámbito militar.

Aquellos científicos que aplicaron y mejoraron las técnicas de la Investigación Operativa durante el periodo bélico se centraron en la búsqueda de resultados sustanciales en ese campo. Se introdujo el magnífico método Simplex para la resolución de los problemas de Programación Lineal, y herramientas como la Programación Dinámica, la Teoría de Colas y la Teoría de Inventarios a finales de los años 50. Sin duda alguna, el imparable avance en el desarrollo e implementación de los ordenadores facilitó y agilizó en gran manera la resolución de problemas complejos con un número elevado de cálculos, ya que llevarlos a cabo manualmente era casi imposible. [4]

2.1.1 Modelo de Investigación Operativa

La Programación Lineal es una técnica intrínseca de la Investigación de Operaciones que requiere un conjunto de aplicaciones matemáticas para asignar de forma óptima recursos limitados a demandas concretas. La parte más importante de este proceso es la definición del problema. Una respuesta incorrecta a una pregunta correcta no suele tener consecuencias fatales, ya que podrían realizarse revisiones y explorar otras alternativas. Sin embargo, la respuesta correcta a una pregunta incorrecta puede tener un desenlace desastroso. Es conveniente en esta etapa establecer unos objetivos específicos para el problema que se está analizando. A través de un estudio e informe detallado, se presentan diversas resoluciones para nuestro problema. [5]

La mayoría de los modelos manipulan un número elevado de datos, por lo que se recurre a automatizar la optimización del problema a través de un ordenador. Se utilizan entonces, distintos algoritmos matemáticos que permiten realizar un análisis de optimización. Estos modelos, no dejan de ser simplificaciones de la realidad, por lo que es preferible comprobar que la solución obtenida es óptima también en la vida real. La modelización, por lo tanto, permite reconocer un problema y cuantificarlo, transformándolo en expresiones matemáticas gracias a métodos heurísticos.

La intención en la Investigación Operativa siempre será reproducir de la forma más fiel posible la realidad. El modelo a elegir, resumirá un problema de decisión permitiendo identificar y evaluar de forma sistemática todas las posibles alternativas.

Tras haber establecido los objetivos para resolver un modelo, es importante seleccionar qué limitaciones pueden afectar a la decisión final, sin perder la idea, de que todo permanece en constante cambio y, por lo tanto, nunca se debería dejar de actualizar la información. Un modelo no deja de ser una abstracción selectiva de la realidad [Figura 2-1]. Este proceso requiere la elección de las variables de decisión que tenemos a nuestra disposición e identificar la función objetivo que es la que va a ser optimizada, respetando una serie de restricciones que podrían limitar nuestra decisión. Por lo tanto, el modelo de decisión debe contener:

- → Variables de decisión, que han sido seleccionadas de una serie de alternativas.
- → Restricciones, que permitan al equipo excluir alternativas que no son factibles.
- → Función objetivo, que establezca un criterio para evaluar y clasificar las alternativas factibles.

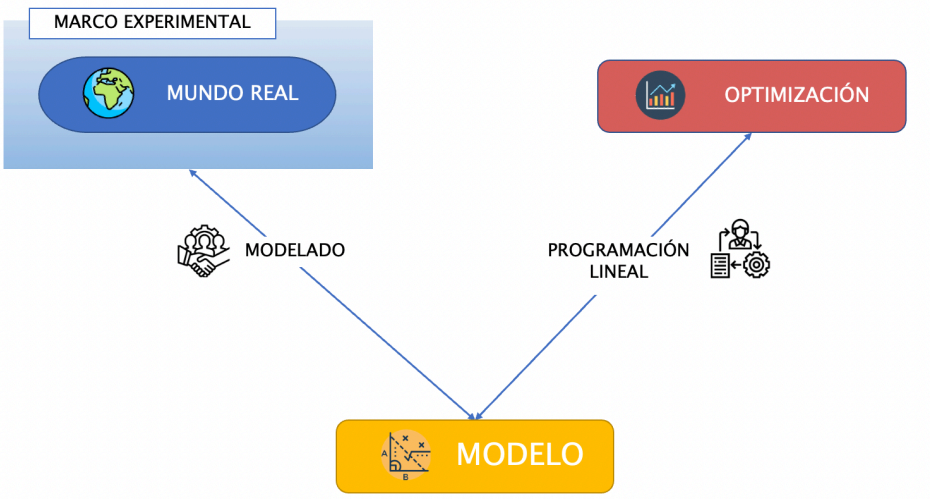


Figura 2-1 Modelo de optimización (Fuente: Elaboración propia) [6]

Cuando se ha seleccionado el modelo matemático, se crea una hoja de cálculo donde se implementa el procedimiento con los datos estudiados a resolver. Es sencillo apoyarse en herramientas como Excel, que está a disposición en ordenadores, logrando una interfaz que se ajusta sencillamente a las necesidades que están presentes en el problema.

2.1.2 Investigación Operativa del Ministerio de Defensa

La ciencia se pone al servicio de la estrategia y de la táctica militar para sacar el mayor provecho de los recursos. El servicio de la Investigación Operativa del Ministerio de Defensa de España [Figura 2-2] se basa en el uso de herramientas matemáticas tratando de optimizar los requerimientos asignados a las Fuerzas Armadas. Esta institución fue creada en 1965 por la Presidencia del Gobierno y se regula según la Orden de Defensa 3399/2009, de 10 de diciembre. [7]



Figura 2-2 Distintivo IMO (Fuente: Ministerio de Defensa)

La Investigación Militar Operativa (IMO) [Figura 2-3] busca soluciones a problemas tácticos y de gestión. Matemáticos y estadísticos trabajan diariamente en complejas fórmulas matemáticas, algoritmos y simuladores que permiten a los mandos de las Fuerzas Armadas tomar las decisiones óptimas posibles. De este modo, son resueltas preguntas que van desde la seguridad del personal, la gestión de los recursos normalmente limitados o retos logísticos que pueden surgir en operaciones. Todo su trabajo enfocado a estas cuestiones, abarca, por ejemplo: ¿Cómo debería ser la disposición de un grupo de buques para evitar el impacto de un misil? ¿Cómo ordenar el acceso a la cola de

autoservicio de alimentación para ahorrar tiempo de espera? ¿Cómo se maximiza el uso de munición en las maniobras? [8]



Figura 2-3 Investigación Militar Operativa (Fuente: Revista Española de Defensa)

2.1.3 Gabinete de Investigación Militar Operativa y Estadística de la Armada (GIMO)

La jefatura de IMO está ostentada por el Secretario General Técnico del Ministerio de Defensa (SEGENTE), que es un órgano directivo que depende directamente de la Subsecretaría de Defensa [Figura 2-4]. Entre sus cometidos, el principal es resolver los problemas planteados por los tres Ejércitos. El Gabinete de Investigación Militar Operativa y Estadística de la Armada (GIMO) forma parte, junto con los correspondientes de cada Ejército, del Servicio IMO. [9]

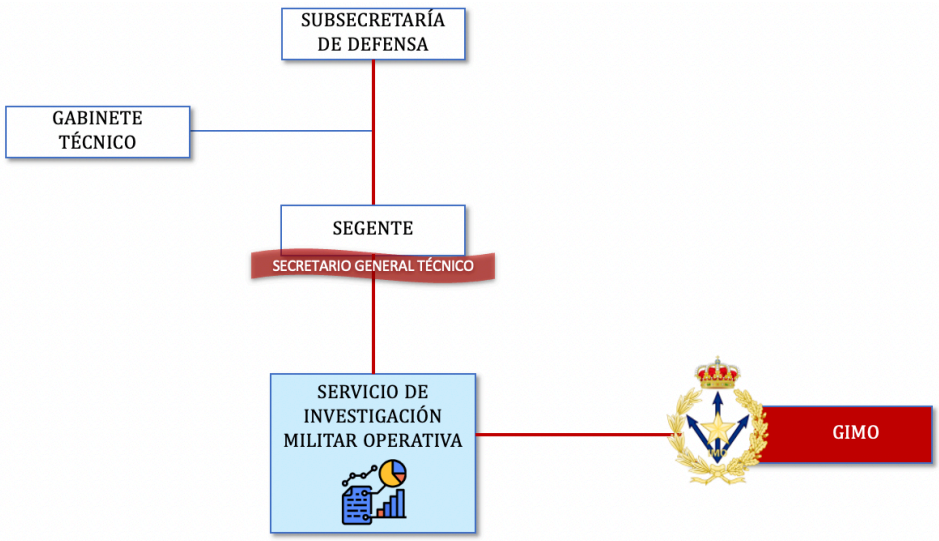


Figura 2-4 Organigrama del Servicio de IMO (Fuente: Elaboración propia) [10]

El GIMO, mediante fórmulas matemáticas y análisis estadísticos, persigue encontrar resultados que permitan optimizar, maximizar o minimizar una situación determinada en el ámbito de la Armada. El Gabinete de la GIMO se formó en diciembre de 1968 bajo la dirección del teniente coronel de Intendencia don Mateo Fernández-Chicharro.

Desde el principio, los problemas investigados son muy similares a los actuales, aunque las herramientas y tecnología lógicamente han evolucionado exponencialmente. Se ha conseguido pasar de la investigación manual a la automatizada. Sus misiones a día de hoy son las siguientes:

- Desarrollar una doctrina con todo lo relacionado a la Investigación Operativa, que abarque el empleo de los medios disponibles y la contribución de este campo con los otros dos Ejércitos y organismos, tanto nacionales como extranjeros.
- Asesorar al mando respecto a la materia de Investigación Operativa.
- Contribuir a la solución de necesidades mediante el empleo de técnicas y herramientas propias de la Investigación Operativa.
- Llevar a cabo estudios e investigaciones para aplicar los conocimientos científicos donde se requiera.
- Establecer prioridades en la ejecución de dichas investigaciones.

Cada vez que se proyecta el diseño y la construcción de un nuevo buque en la Armada en el GIMO se activan estudios para determinar cuál sería la vía de escape más rápida para evacuar un buque, en situación de abandono de buque. Se emplean programas que simularán el flujo de personas en grandes espacios. Otro de los retos actuales es la ubicación de las fragatas para dar protección a una unidad valiosa como podría ser el portaviones Juan Carlos I, donde matemáticos y estadísticos simulan escenarios incluyendo variables meteorológicas, para poder estimar la probabilidad de impacto en la unidad valiosa en varios escenarios. Estos son ejemplos de problemas que ha ido investigando el GIMO permitiendo analizar millones de situaciones a coste nulo y sin daños de ningún tipo. Además de verificar que las herramientas informáticas son eficaces, se interpretan los resultados en el ámbito naval, es decir, se da interpretación real a los números. [8]

2.2 Programación Lineal

"El militar que se encuentre desempeñando funciones técnicas realizará su trabajo con entrega, conocimientos adecuados y precisión, ya que armamento y material son instrumentos necesarios para que las Fuerzas Armadas puedan cumplir sus misiones."

Artículo 151 de las Reales Ordenanzas de las FAS [11]

La optimización matemática engloba un conjunto de métodos mediante los cuales es posible determinar los valores de las variables de decisión que intervienen en un proceso o sistema, para que el resultado sea el mejor posible. Una de las herramientas encargadas de optimizar un objetivo numérico es la Programación Lineal. Mediante una función lineal se consigue definir el comportamiento de las variables de nuestro problema, que ayudarán a construir una decisión optimizada sujeta a una serie de restricciones. Las restricciones que deben satisfacerse se presentan de forma lineal formando un sistema de ecuaciones o inecuaciones que permite resolver los problemas. La Programación Lineal no involucra la programación en términos computacionales, sino que podría asimilarse mejor a la planeación. Por lo tanto, esta herramienta matemática plantea una serie de actividades para obtener el resultado que mejor alcance la meta especificada entre todas las posibles alternativas. [11]

Claramente existe una relación muy estrecha entre la programación lineal y la actividad militar ya que se ve reflejado en las operaciones de las últimas décadas en las zonas de Irak y Afganistán. Estas operaciones fueron exitosas debido al desempeño de los combatientes, pero con la aplicación

de técnicas de optimización en estos escenarios, se consiguió una planificación y logística eficaces. [11]

Este Trabajo de Fin de Grado se basa en una rama concreta de la Programación Lineal que es la Programación Lineal con enteros (conocida internacionalmente como Integer Linear Programming) que abarca problemas cuya formulación emplea variables enteras y especialmente binarias. [12]

2.2.1 Problemas con programación lineal

Los modelos matemáticos van expresados en símbolos y expresiones matemáticas relacionadas que describen la esencia del problema. Tres elementos son los que se van a encargar de resolver un problema propio de la Programación Lineal. Como se comentó anteriormente: se tendrán en cuenta variables de decisión, una función objetivo y restricciones. [4]

- Variables de decisión

  Son las *n* variables que se pueden cuantificar relacionadas entre sí, para las que se determinan los valores respectivos ($x_1, x_{2,}\ldots,\ x_n$). Representan las incógnitas del problema.

- Función objetivo

  Es la función matemática que se expresa a través de las variables de decisión. Representa la meta que se pretende alcanzar maximizando los beneficios o minimizando los costos.

- Restricciones

  Son las limitaciones expresadas cuantitativamente en forma normalmente de ecuaciones y desigualdades, considerándose la escasez de recursos en tiempo y espacio.

Estos elementos se emplean en la Programación Lineal de forma cuantitativa, pudiéndose expresar como [4]:

Función objetivo a maximizar/minimizar:

$$Z = c_1x_1 + \ c_2x_2 + \cdots + \ c_nx_n$$

siendo x_n las variables de decisión del modelo o el vector de variables a determinar y c_n el vector de costos asociados a las variables. Se desea elegir unos valores de los coeficientes x_n que optimicen la función en el modelo de programación lineal.

La función está sujeta a las restricciones:

$$\left.\begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \quad .... \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n = b_m \end{array}\right\} M_{m\cdot n}$$

$$x_1, x_2, \ldots, x_n \geq 0$$

$$x \in \mathbb{R}^{+n}\ , c \in \mathbb{R}^n,\ b \in\ \mathbb{R}^{+m}$$

Las restricciones forman una matriz $M_{m \cdot n}$ siendo b_m el vector de términos independientes relativos a las restricciones.

Cuando el conjunto de los posibles valores satisface todas las restricciones se conoce como región factible y sabemos que la solución está dentro de esta zona. Se considera una solución factible como la solución óptima que proporciona a la función objetivo los valores más favorables, es decir, el valor más grande si la función objetivo se maximiza o, el valor más pequeño si la función objetivo debe minimizarse:

$$x^* \in \mathbb{R} \text{ es óptima si } \forall x \in \mathbb{R}, cx^* \geq cx$$

Se muestra a continuación una gráfica [Figura 2-5] con todos los elementos mencionados aplicados a un problema/ejemplo con dos variables de decisión y con solución factible:

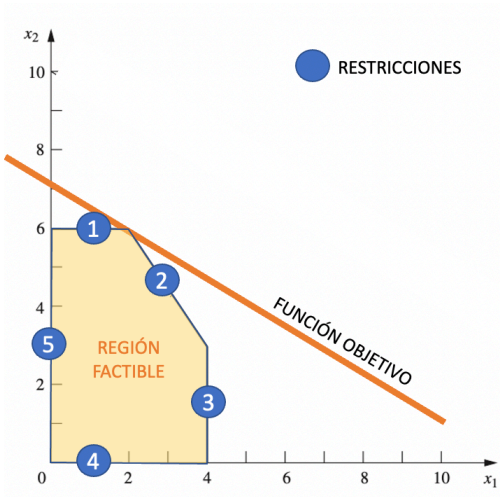


Figura 2-5 Gráfica de un problema con dos variables (Fuente: Elaboración propia) [4]

La mayoría de los problemas solo disponen de una única solución óptima [Figura 2-6]. Puede darse el caso de que un problema adquiera soluciones óptimas múltiples siendo infinitas y con el mismo valor o, que no tenga soluciones óptimas. Este último caso significa que no tiene soluciones factibles, o que sus restricciones impidan la optimización de la función. [4]

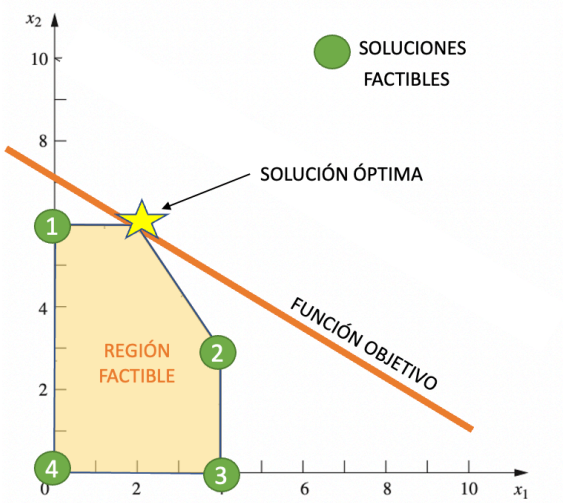


Figura 2-6 Gráfica de un problema con solución factible (Fuente: Elaboración propia) [4]

Este ejemplo matemático se puede aplicar para optimizar con restricciones formadas por igualdades, desigualdades, acotadas o no restringidas como serían las inecuaciones. Sencillamente habría que variar en el problema las restricciones de esta manera:

$$\left.\begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \leq b_2 \\ \cdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n \leq b_m \end{array}\right\} M_{m \cdot n}$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \ldots, x_n \geq 0$$
$$x \in \mathbb{R}^{+n}\ , c \in \mathbb{R}^n\ , b \in\ \mathbb{R}^{+m}$$

2.2.2 Programación Lineal Entera (PLE)

Hay problemas que solo tienen sentido si sus variables de decisión tienen como valor un número entero. Esto implica que, a la hora de aplicar la programación lineal, se debe incluir estas limitaciones como restricciones del problema. Estos casos se dan cuando los recursos a asignar son de cantidades enteras como podría ser en problemas de personal, material, maquinaria, etc. [13]

Un modelo matemático también permite tomar decisiones del tipo: sí y no. Este tipo de situaciones adquiere los valores 1 o 0 tal que: $sí = 1, no = 0$. Estamos entonces, ante un problema que debe disponer de variables binarias. Se diferencia dentro de la Programación Lineal Entera:

- Programación Entera Mixta (PEM)
- Programación Entera Binaria (PEB)

En este trabajo de Fin de Grado, abarca la programación lineal entera y binaria. Por ejemplo, al dividir este proyecto por semanas en las que el helicóptero está en misión o mantenimiento, una variable entera sería el número de la semana en la que el helicóptero se encuentra (semana 1, semana 2, …, semana *t*) y una binaria sería, si el helicóptero se encuentra en ese momento en uno de los tipos de mantenimientos o no ($sí = 1\ o\ no = 0$).

2.2.3 Método Simplex

La Investigación Operativa cuenta con una herramienta para poder resolver problemas que se apoyan en la programación lineal. Esta herramienta famosísima, conocida como el Método Simplex, fue desarrollada en 1947 por el matemático George Bernard Dantzig con el ánimo de crear un algoritmo capaz de solucionar problemas de *m* restricciones y *n* variables. A diferencia del método gráfico, este método analítico apoya a la toma de decisiones de forma cuantitativa y no se ve limitado por la cantidad de variables de decisión que se pretendan usar en el modelo. Son varias restricciones a considerar, muchas variables de decisión a contemplar y resultados diferentes. [14]

El Método Simplex es iterativo ya que permite la mejora de la solución continua en cada paso. Cada restricción del problema va formando los lados de un poliedro, conformando las fronteras de la región factible. Estas restricciones son rectas que al cruzarse entre sí forman los vértices del poliedro. Estas intersecciones son las soluciones factibles en los vértices (FEV). La mejora matemática se debe a que el método va comprobando vértice a vértice del poliedro, identificando en cual aumenta o en

cual disminuye, dependiendo de si queremos maximizar o minimizar. Usa el criterio de parada en cada vértice, chequea la optimalidad de la solución para ver si es la solución óptima o no [Figura 2-7].



Figura 2-7 Diagrama de flujo del Método Simplex (Fuente: Elaboración propia) [15]

El Método Simplex solo se encarga de analizar las soluciones FEV de la región que está acotada. Lo más rápido es ir recopilando información de las soluciones FEV adyacentes en vez de empezar por las otras alternativas. Esto se debe a que recorre menos trayectoria por las aristas hasta alcanzar la solución óptima, en vez de que sea de forma aleatoria. De salto en salto, va comprobando la tasa de optimización de *Z* (la función objetivo), de forma que, una vez *encuentra* una FEV positiva solo avanza a las siguiente FEV que tenga una tasa mayor que esta última. [16]

Cuando se llega al *Fin* del Diagrama de flujo [Figura 2-7] se ha obtenido la FEV óptima. La FEV que se ha conseguido tiene una tasa de mejoramiento de *Z* más positiva que cualquier otra.

Se propone a continuación un ejemplo de un problema aplicando el método simplex.

Una unidad responsable del mantenimiento de dos tipos de helicópteros en servicio de la Armada Española incorpora en el mantenimiento las tareas de desmontaje, limpieza y pintura. Cada tarea requiere un número diferente de horas de trabajo a la semana. Se debe decidir a cuántos helicópteros aplicar mantenimientos, para maximizar la operatividad. La unidad de mantenimiento es capaz de asignar una cifra relacionada con la utilidad de cada uno de los elementos a partir de la trascendencia operativa de las misiones que realizan las aeronaves. Se sabe que por cada helicóptero 1 se obtiene una operatividad puntuada como 3 y por cada helicóptero 2 se obtiene una operatividad puntuada como 5. Para la operatividad de un helicóptero 1 se necesita 1 hora de la tarea de desmontar y 3 horas de la tarea pintar, y para la operatividad del helicóptero 2 se necesita 2 horas de la tarea limpiar y 2 horas de la tarea pintar. Debido al horario disponible de los trabajadores de mantenimiento, se dispone de 4 horas para poder desmontar, 12 horas para realizar una limpieza y 18 horas para pintar helicópteros. En la siguiente tabla [Tabla 2-1] *podemos observar un resumen de los datos* [4]*:*

Operación	***Helo 1***	***Helo 2***	***Horas máximas***
Desmontar	*1*	*0*	*4*
Limpiar	*0*	*2*	*12*
Pintar	*3*	*2*	*18*

Tabla 2-1 Datos problema (Elaboración propia).

Para formular el modelo matemático de programación lineal de este problema se define:

X_1= nº de Helo 1

X_2= nº de Helo 2

$Z = 3X_1 + 5X_2$ = Operatividad semanal total y función objetivo a maximizar

Sujeta a restricciones:

$$X_1 \leq 4$$

$$2X_2 \leq 6$$

$$3X_1 + 2X_2 \leq 18$$

$$X_1, X_2 \geq 0$$

Gráficamente obtenemos la solución [Figura 2-8]:

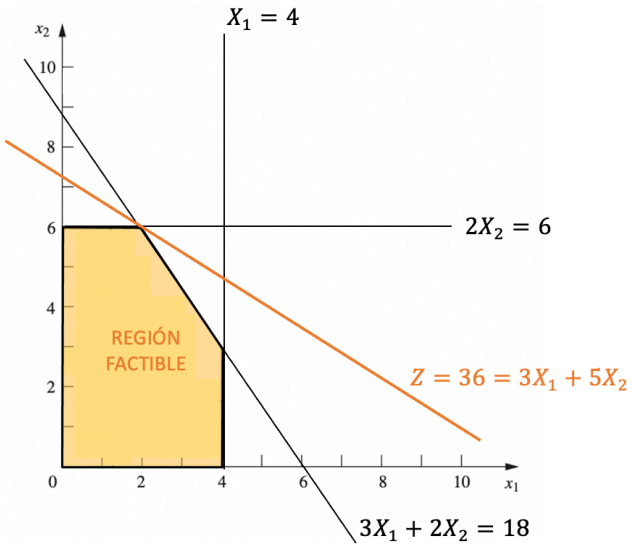


Figura 2-8 Representación gráfica (Fuente: Elaboración propia)

Como podemos observar en la Figura 2-8, se ha acotado la región factible por las restricciones, acotando el área donde están las soluciones. Las intersecciones de cada dos rectas que forman la frontera, son los vértices del paralelepípedo y representan las soluciones FEV, de las cuales saldrá la FEV óptima. Cada solución FEV está formada por dos aristas, por lo que, en este problema, cada solución FEV tendrá dos soluciones FEV adyacentes. [4]

Si aplicamos el método simplex para solucionar el problema, el primer paso será escoger uno de los vértices que constituye una solución FEV. Por simplicidad, se empieza por el origen, con solución (0,0), se le aplica la prueba de optimalidad y se comprueba que no es la solución óptima. Como se mostró en el anterior diagrama de flujo [Figura 2-7], se debe de realizar una iteración a las dos FEV adyacentes a la última FEV [Figura 2-9]. En este caso, directamente se analiza la solución (0,6) pues mejora con respecto a la solución en el origen, y es más positiva que la otra adyacente (4,0). Para hacer la prueba de optimalidad simplemente hay que sustituir los 2 valores de las variables de una solución FEV en la función objetivo *Z*. La mayor puntuación indica, mayor optimización para nuestro problema. [4]

Al realizar la prueba de optimalidad a la solución (0,6) se continúa iterando hasta obtener la FEV que da el mayor valor, al sustituirla en la función objetivo, y esa será la solución FEV óptima, ya que si se vuelve a realizar una iteración el valor de *Z* solo disminuye. [4]

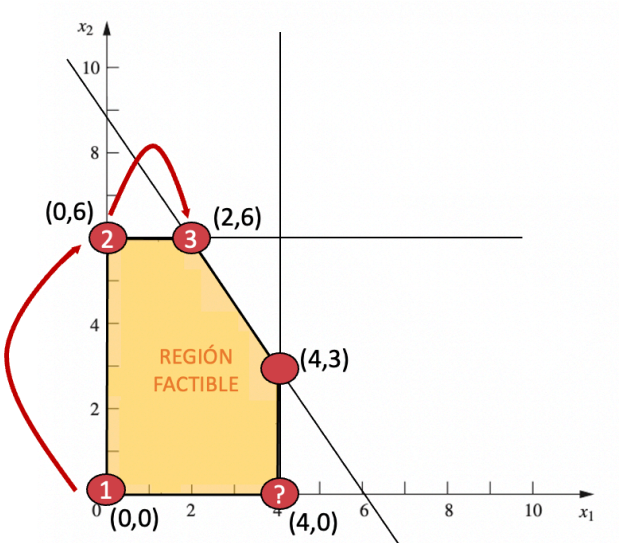


Figura 2-9 Representación iteraciones con el método simplex (Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se muestra un resumen [Tabla 2-2] de las soluciones FEV obtenidas y el valor de su optimalidad al sustituirse en la función objetivo.

Solución FEV	Soluciones FEV adyacentes	Valor de Z
(0,0)	(0,6) y (4,0)	0
(0,6)	(2,6) y (0,0)	30
(2,6)	(4,3) y (0,6)	36
(4,3)	(4,0) y (2,6)	27
(4,0)	(0,0) y (4,3)	12

Tabla 2-2 Soluciones FEV con adyacentes y valor de Z (Elaboración propia)

2.3 Excel

Excel es un entorno de trabajo basado en una hoja de cálculo. Este software informático forma parte del conjunto de programas de Microsoft Office. Tiene múltiples aplicaciones, siendo desarrollada para poder trabajar con números de una manera sencilla e intuitiva. Se puede utilizar para múltiples propósitos, destacando el almacenamiento de datos y realizar cálculos simples y complejos. Los datos y resultados a disposición de esta herramienta son correctos y exactos gracias al empleo de fórmulas matemáticas y el cálculo del propio software. El archivo en Excel recibe el nombre de libro, y este puede estar formado por una o varias hojas de cálculo. Cada hoja, está formada por un conjunto de filas numeradas por números y columnas numeradas por letras. La intersección entre filas y columnas se denomina celda, que tiene la utilidad de guardar un dato. [17]

Excel tiene un campo muy amplio de aplicación. Permite automatizar tareas ya que cuenta con funciones estadísticas, financieras, de texto, fecha y hora, etc. También dispone de la opción para generar gráficos estadísticos y matemáticos, entre otros. Existe la posibilidad de cambiar datos e incluso recalcular de manera simple, sin la necesidad de empezar de nuevo. El programa además avisa en caso de error al usuario para que pueda corregirlo y obtener el resultado. [17]

El programa es muy preciso y tiene una interfaz muy rápida y efectiva. Permite a los usuarios reducir sus tiempos de trabajo ya que mejora su organización y agiliza el proceso de realizar ciertas tareas de trabajo.

2.3.1 Solver

Solver [Figura 2-10] fue desarrollado por la compañía Frontline como complemento del programa Excel que va vinculado al motor de optimización. Puede ir incluido en todas las versiones de la hoja de cálculo y es gratuito. Puede abordar hasta un máximo de 200 variables de decisión, 100 restricciones y 400 restricciones enteras sobre las variables de decisión, límite que podría afectar al problema presente en este Trabajo de Fin de Grado. [11]

Figura 2-10 Logotipo de Solver [18]

Este complemento contiene tres posibles métodos de resolución, siendo el que se utilizará en este trabajo de fin de grado el método Simplex LP. Se escoge este método ya que proporciona una respuesta que sabemos con seguridad que es la óptima según lo que se defina y porque se puede aplicar al objetivo del problema que se va a tratar. [11]

Para acceder al complemento Solver por primera vez, hay que agregarlo en el menú de complementos de Excel. Después solo tendremos que acceder a través del grupo *Análisis* de la ficha de *Datos* [Figura 2-11]. [19]

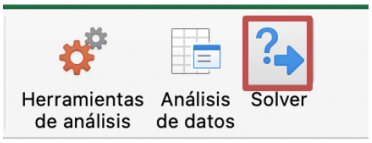


Figura 2-11 Acceso a Solver en la hoja de cálculo (Fuente: Elaboración propia)

A esta herramienta se acude cuando se ha planteado y diseñado el problema en la hoja de cálculo de Excel. De esta manera accedemos al cuadro de diálogo de configuración [Figura 2-12] que se presenta a continuación:

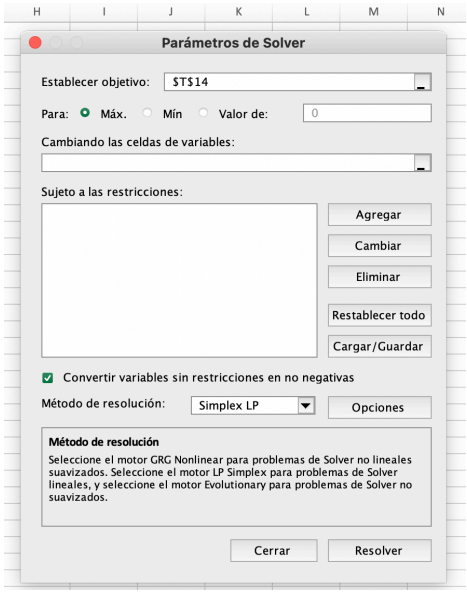


Figura 2-12 Pantalla principal de Solver (Fuente: Elaboración propia)

En este cuadro de diálogo [Figura 2-12] nos ofrecen introducir la información de nuestro problema. Lo primero que hay que rellenar es *Establecer objetivo*, donde irá seleccionada la función objetivo que se quiere optimizar. El siguiente paso, es seleccionar la optimización a realizar, es decir, maximizar, o minimizar. También se permite igualar la celda con la función objetivo a un valor particular, introduciendo manualmente la cifra o el cuadro adyacente. Lo siguiente será seleccionar las celdas correspondientes a nuestras variables de decisión. Indicaremos de este modo a Excel qué celdas debe cambiar. [19]

Para especificar las celdas de la hoja de cálculo que contienen restricciones funcionales, se pulsa el botón *Agregar* y se seleccionan celdas en su correspondiente cuadro de diálogo [Figura 2-13]. Como se puede ver, para cada restricción hay que seleccionar tres elementos: *Referencia de celda*, el operador de comparación y un valor de *Restricción*. Es importante seleccionar en el operador de comparación, si son igualdades, desigualdades o números diferentes a un determinado valor $(=, \neq, \leq, \geq)$. [19]

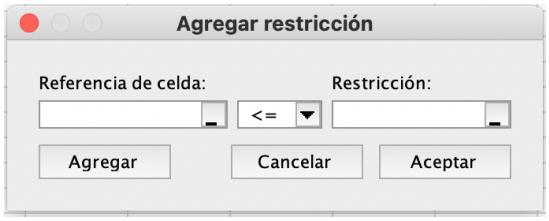


Figura 2-13 Agregar restricción en Solver (Fuente: Elaboración propia)

En este cuadro de diálogo también tenemos las opciones de establecer que las variables tomen valores enteros seleccionando *int (entero)* [Figura 2-14] o si el problema se plantea con variables binarias, se selecciona *bin (binario*) [Figura 2-15] para tomar los valores 1 o 0.

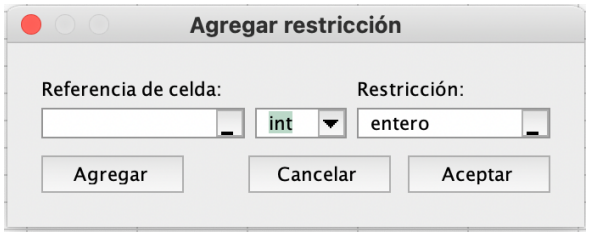


Figura 2-14 Agregar restricción entera (Fuente: Elaboración propia)



Figura 2-15 Agregar restricción binaria (Fuente: Elaboración propia)

Lo último que queda por seleccionar en los parámetros de Solver es el método de resolución, que es Simplex LP ya que el problema es lineal.

2.4 Décima Escuadrilla de aeronaves de la Armada Española

La Décima Escuadrilla [Figura 2-17] está compuesta por doce helicópteros SH-60B Seahawk. En 1988 se desarrolló esta unidad pasando a formar parte de la Flotilla de Aeronaves (FLOAN) [Figura 2-16] y estableciendo su base en la Base Naval de Rota (Cádiz), con su hangar en la plataforma de poniente. Sin embargo, la Escuadrilla normalmente está desplegada a bordo de los buques de la Armada que tienen capacidad aérea, como por ejemplo las fragatas del tipo "Santa María" (FFG) o "Álvaro de Bazán" (F-100). Abarca misiones de Guerra de Superficie (ASUW) y Guerra Antisubmarina (ASW), pudiendo desarrollar a su vez, misiones de salvamento y rescate (SAR), de evacuación médica (MEDEVAC) y de transporte logístico (VERTREP y VOD). [20]

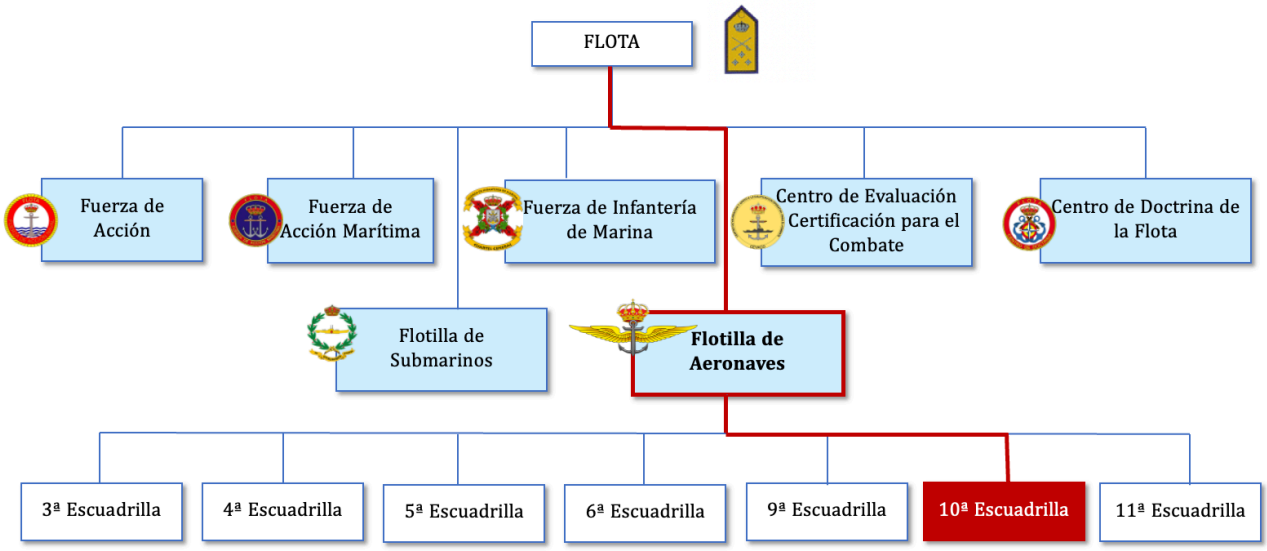


Figura 2-16 Estructura orgánica de la Flota de la Armada (Fuente: Elaboración propia) [21]



Figura 2-17 Escudo 10ª Escuadrilla de aeronaves (Fuente: Armada Española) [20]

La escuadrilla fue creada en 1988 al recibir sus primeros seis helicópteros. Tras constituirse como Décima Escuadrilla, realizó su primer embarque en 1989 a bordo de la fragata F-82 "Victoria" del tipo "Santa María", para la calificación de pilotos en este nuevo escenario. El primer embarque

operativo se realizó en las maniobras SHARP-SPEAR en 1989 a bordo de la fragata F-82 "Victoria" y F-83 "Numancia". Fue en el año 2002 cuando se adquirieron el resto de unidades de la escuadrilla actual, con un total de doce helicópteros. Se tomó la decisión de modernizar las seis primeras, incluyéndose nuevas estructuras y equipamiento. Desde ese momento, la escuadrilla ha participado en numerosas operaciones y ejercicios nacionales e internacionales, demostrando un valor operativo muy alto. [20]

Hoy en día, es difícil considerar una fuerza naval operativa, sin el empleo de un arma realmente fuerte, robusta y moderna como son estos helicópteros. Esta escuadrilla realiza operaciones reales y de entrenamiento en la gran mayoría de escenarios, en los que la Armada ha tenido posibilidad de participar. Lo que realmente llama la atención es el sistema que lleva integrado trabajando con el buque en el que va desplegado, como una única unidad. Este sistema conocido como Light Airbone Multipurpose System (LAMPS) amplía el área de vigilancia del buque, así como el área de actuación y control. En la Figura 2-18 se puede ver cómo el helicóptero amplía la cobertura, siendo la inicial de la fragata más pequeña en color rojo. Todo ello ha sido posible gracias a la tecnología avanzada a bordo de la unidad, así como la profesionalidad y dedicación del equipo que compone esta Escuadrilla. [20]

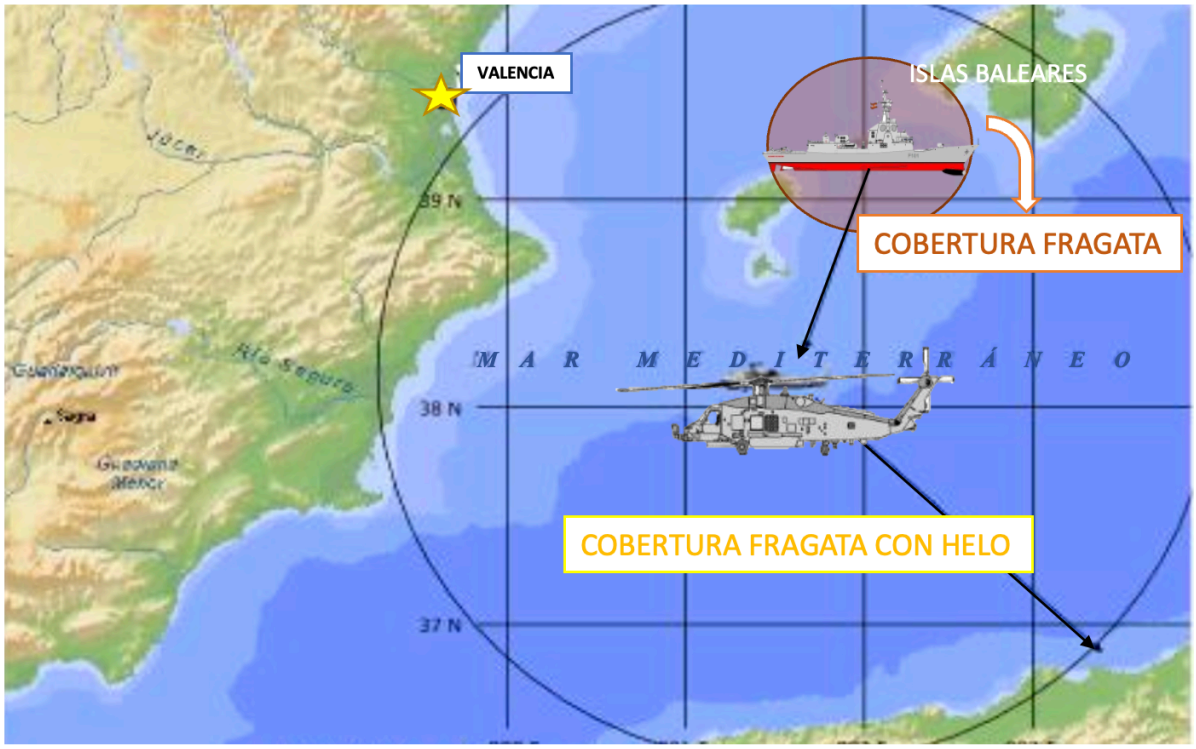


Figura 2-18 Cobertura de superficie con Radar del SH-60B (Fuente: Elaboración propia) [22]

Las unidades de esta escuadrilla están a la vanguardia de la tecnología, configurando un helicóptero versátil y con gran cantidad de capacidades. Además de las misiones principales, pueden realizar Relé de Comunicaciones (COMREL), Observación de fuego naval de apoyo (NSFS) y apoyar a Operaciones especiales.

El SH-60B es un helicóptero cuatripala propulsado por 2 turbinas y está dotado de equipos de comunicaciones VHF y UHF, así como los equipos de navegación TACAN y GPS. En la actualidad, disponen de un gancho baricéntrico [Figura 2-19] para efectuar misiones de carga. El helicóptero tiene las siguientes características [Tabla 2-3]:

SH-60B Block I LAMPS III	
PESO	6191 Kg en vacío / 9843 Kg máximo
LONGITUD	19,76 m
DIÁMETRO ROTOR PRINCIPAL	16,36 m
ALTURA	5,8 m
AUTONOMÍA	Media 3,5 horas. Podría estar en vuelo 24 horas seguidas si no se desembraga.
DOTACIÓN	Hasta 5 (Piloto, copiloto, operador de sensores y 2 más)
SENSORES	FLIR (Cámara Infrarroja), Radar de superficie APS-124, Interrogador IFF, Detector de Anomalías Magnéticas (MAD), Detector de Emisiones Electrónicas (ESM), Capacidad de vuelo con Gafas de Visión Nocturna y Alertador de Amenaza de Misiles con Dispensador de Chaff y Bengalas.
ARMAMENTO	Hasta 3 Torpedos MK-46, 1 misil Penguin AGM-119 o 4 Hellfire AGM-114K, Ametralladora 12,7 mm, Lanzador de sonoboyas y Designador Láser.
TECHO	13.000 pies
VELOCIDAD	180 Kts máxima /130 Kts crucero

Tabla 2-3 Características Helicóptero SH-60B (Elaboración propia). [20]



Figura 2-19 Sensores helicóptero SH-60B (Fuente: Elaboración propia) [22]

Actualmente el helicóptero también es llamado para realizar despliegues junto con la Infantería de Marina y el resto de Ejércitos. En los últimos años se han mantenido dos SH-60B desplegados permanentemente en la zona del Índico y del Mediterráneo, con aproximadamente 20 personas. [20]

En la Base Naval de Rota, el personal de la Décima Escuadrilla se encarga del mantenimiento y alistamiento de sus aeronaves. Esto permite mantener un altísimo grado de preparación y disponibilidad que exige la completa y correcta ejecución de las misiones que puedan ser asignadas.

Esta fuerza naval posee las siguientes características [Figura 2-20]: movilidad, disponibilidad, flexibilidad, simbolismo, permanencia y autonomía logística. Movilidad para trasladarse a la zona del conflicto en escenarios internacionales, en alta mar, sin ser limitada por la existencia de fronteras u otros límites, ya sean políticos o geográficos. La libertad de vuelo de la que gozan las aeronaves en alta mar, hace que estas unidades sean de las primeras en ser desplegadas. Esta disponibilidad es posible por la gestión y control de sus horas de vuelo y mantenimientos. Destacar que al poder llevar a bordo de un buque de la Armada Española, la propia logística, permiten que estas aeronaves

permanezcan en el área de operaciones durante semanas e incluso meses antes de ser relevados. Muy importante es tener en cuenta la flexibilidad de este arma aérea, actuando con el buque al que ha sido asignado y llevando a cabo sus propias misiones, sin necesidad de que sean militares. Por último, y no menos importante, la Décima Escuadrilla ha constituido una expresión del nivel tecnológico y de la capacidad de defensa de España. Siendo una herramienta más al servicio de la política exterior, también tiene una serie de inconvenientes, ya que son muy costosos y difíciles de obtener. [23]

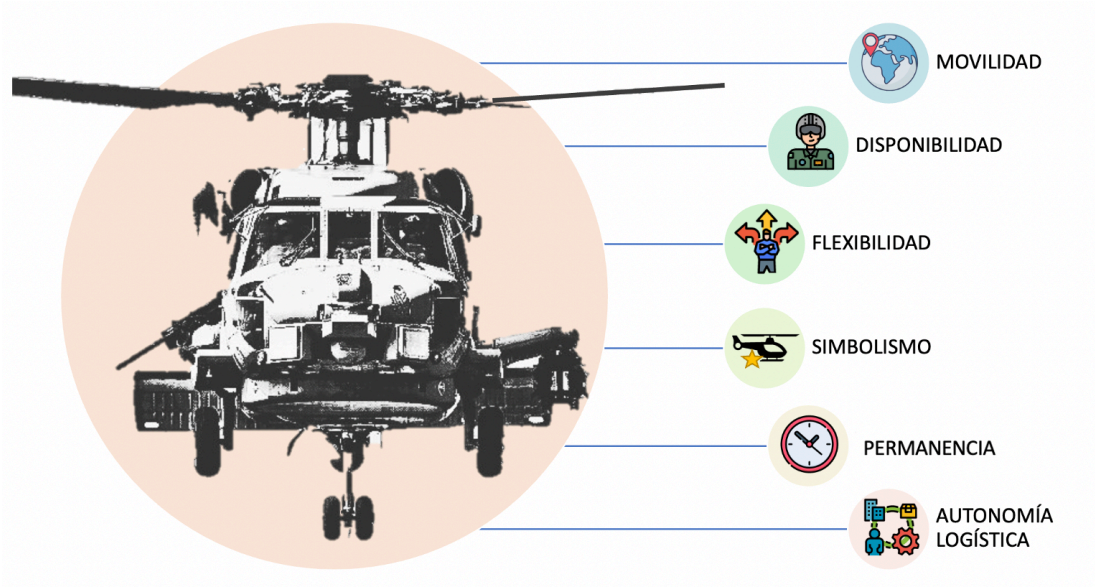


Figura 2-20 Características del helicóptero SH-60B (Fuente: Elaboración propia)

2.4.1 Principales operaciones y ejercicios

Los buques que tiene la capacidad para embarcar los SH-60B son [Tabla 2-4]:

- Las seis fragatas FFG, pueden llevar dos helicópteros, pero siempre embarca uno.
- Las cinco fragatas F-100, tienen un hangar para sólo un helicóptero.
- Los cuatro Buques de Acción Marítima (BAM), con capacidad para un helicóptero.
- Los dos Buques de Asalto Anfibio (BAA), pudiendo embarcar hasta cuatro helicópteros.
- Los dos Buques de Aprovisionamiento de Combate (BAC), embarcando máximo un helicóptero.
- El Landing Helicopter Dock (LHD) Juan Carlos I. Este buque no embarcará los SH-60B por su tipo de misión. No obstante, si lo hace dependerá del espacio disponible que le permitan otras aeronaves. [24]

PLATAFORMA	CAPACIDAD SH-60B
FFG	1
F-100	1
BAM	1
BAA	4
BAC	1

Tabla 2-4 Plataformas con capacidad para embarcar SH-60B (Elaboración propia). [25]

Todas estas plataformas mencionadas en la Tabla 2-4 pueden embarcar las aeronaves, la diferencia entre ellas, es el tipo de misión a desempeñar. Los principales tipos de misiones, comentados anteriormente, se suelen llevar a cabo en las fragatas FFG y F-100 [Figura 2-21], debido a que disponen de equipo Data Link y por lo tanto se puede emplear el sistema LAMPS.



Figura 2-21 Helicóptero de la 10ª Escuadrilla embarcado (Fuente: Armada Española) [20]

El helicóptero SH-60B ha estado presente en la mayoría de misiones que ha realizado la Armada Española. Internacionalmente participó en las siguientes [20]:

- Operación Sharp Guard de embargo a la antigua Yugoslavia.
- Libertad Duradera de lucha contra el terrorismo en el Océano Índico.
- Despliegue en el Líbano.
- Guerra de Irak donde el helicóptero fue integrado en un portaviones americano.
- Agrupaciones permanentes de la OTAN por el Mediterráneo y el Atlántico.
- Operación Active Endeavour de lucha contra el terrorismo en el Mediterráneo.
- Coalición internacional en Libia.

Hay que tener en cuenta, que también participó en otros múltiples ejercicios nacionales e internacionales. Hasta el año 2020 la escuadrilla participó en la Operación ATALANTA [Figura 2-25], en lucha contra piratería en el Índico, a bordo de los buques de la Armada Española que en ella participan. A comienzos del 2021, la Décima Escuadrilla fue relevada por la Tercera, con su modelo AB-212. Actualmente [Figura 2-22, Figura 2-23 y Figura 2-24], está participando en las Agrupaciones Navales Permanentes de la OTAN (SNMG por sus siglas en inglés) que son básicamente una fuerza marítima multinacional, constituida por buques de países aliados. Todo buque está permanentemente a disposición de la OTAN para abarcar ejercicios y, si fuera necesario, intervenir en misiones operativas. A continuación, se muestra una previsión del despliegue de la Décima Escuadrilla, junto con su Unidad Aérea Embarcada (UNAEMB), en los meses de Marzo y Junio del 2021. [20]



Figura 2-22 Operaciones internacionales del SH-60 B en Marzo de 2021 (Fuente: Elaboración propia) [26]

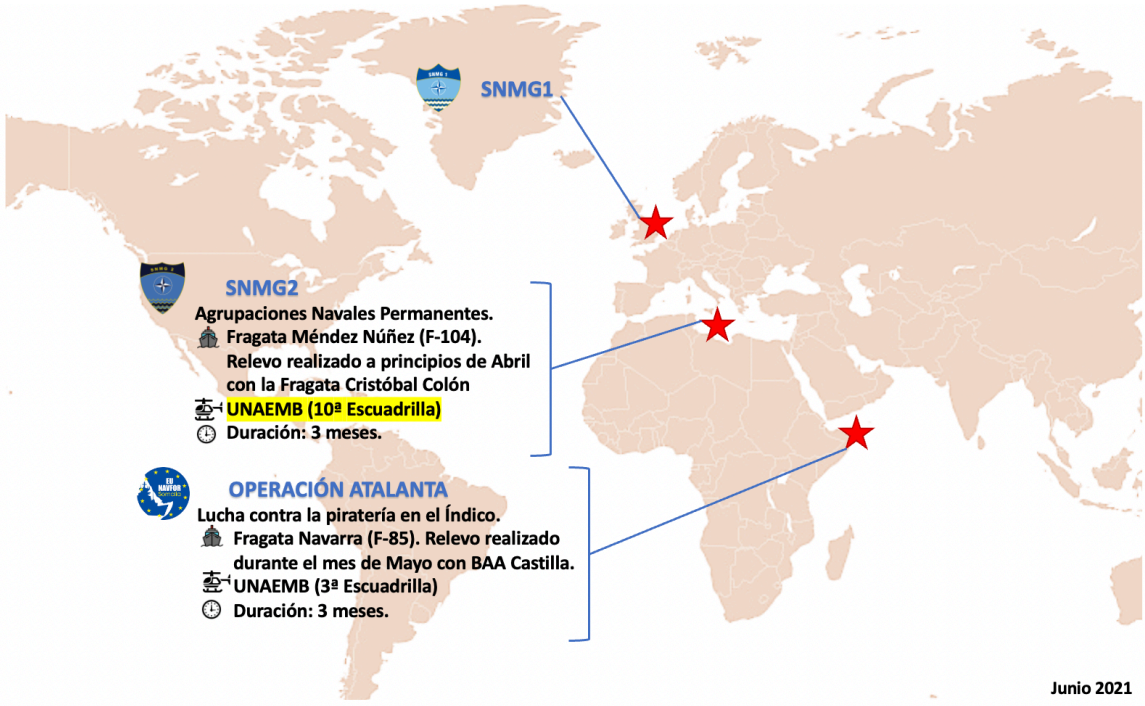


Figura 2-23 Operaciones internacionales del SH-60B en Junio de 2021 (Fuente: Elaboración propia) [26]

OPERACIONES	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
SNMG-2	Fragata Cristóbal Colón		Fragata Méndez Núñez				

Figura 2-24 Previsión despliegue de buques con la Décima Escuadrilla (Fuente: Elaboración propia)



Figura 2-25 Operación Atalanta en 2019 (Fuente: Décima Escuadrilla)

2.4.2 Seguridad del helicóptero.

Las misiones exitosas o los contratiempos, no suceden por casualidad. Hay una serie de indicadores que señalan si una unidad está funcionando de forma correcta o no. Las causas básicas [Figura 2-26] de aquellos problemas que puedan aparecer, se recogen en varias categorías: la misión, el personal, la maquinaria, la gestión y el medio. [27]

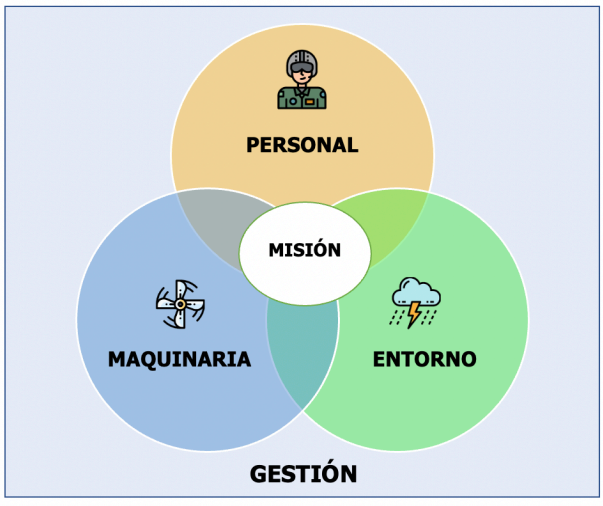


Figura 2-26 Categorías que pueden presentar riesgos en las aeronaves (Fuente: Elaboración propia)

El recurso humano es posiblemente donde pueda haber más variabilidad y mayor cantidad de riesgos. Los errores humanos son influenciados por las circunstancias individuales personales, el estado de ánimo y el enfoque del trabajo de cada situación. Desde los conocimientos del piloto, pasando por su estado físico y mental, la experiencia del personal de mantenimiento, la forma de

superar imprevistos, la motivación, hasta, por ejemplo, las horas de sueño previas a realizar un vuelo de una operación. Este cómputo de factores se intenta mejorar, siguiendo una serie de recomendaciones, aunque no llega nunca a una fiabilidad completa.

Por otro lado, tenemos que tener en cuenta todos riesgos que se presentan en el entorno, en el cual una misión va a ser ejecutada. En esta categoría se considera el clima, el ambiente operativo y el ambiente higiénico. Antes de realizar una misión, siempre se comprueban las condiciones meteorológicas como pueden ser la visibilidad y el viento. Pero también será de importancia, aquellas no tan previsibles, como la calidad del aire, incluyéndose el polvo, posibles contaminantes y los ruidos o vibraciones, afectando tanto a la aeronave como al personal que realiza el vuelo. Cada escuadrilla tiene establecidos una serie de límites, que determinan si es seguro que la aeronave vuele o no. En el Anexo I vienen reflejados una serie de equipos y sistemas que se deben llevar en vuelo, para realizar ejercicios en los distintos entornos. Vale decir, que se disponen de unos parámetros empíricos, para decidir si una aeronave puede desplegarse o no. [28]

Los riesgos en la maquinaría, engloban aquellos que aparecen en todos los equipos y sistemas que componen la unidad [Figura 2-27]. Estas particularidades, a diferencia de las anteriores, si son más fáciles de prevenir, y por lo consiguiente, se alcanza un alto grado de confianza. El diseño, el mantenimiento y la logística consiguen que un helicóptero obtenga un certificado que le permita volar y por lo tanto clasificarlo como segura. En ningún contexto, todo lo comentado evita que ocurran situaciones imprevisibles y peligrosas, pero si se reduce al mínimo cualquier riesgo. La clave siempre será realizar una serie de mantenimientos preventivos, para apoyar la seguridad de los helicópteros. Si encima, se automatizan estas gestiones, existe mayor garantía y tranquilidad, dos elementos muy decisivos para llevar a cabo una operación de vuelo. [27]

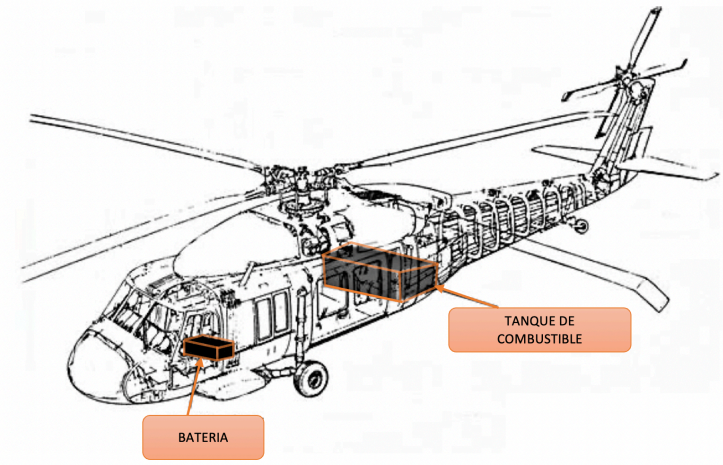


Figura 2-27 Elementos importantes de la aeronave en caso de accidente (Fuente: Elaboración propia) [27]

2.5 Mantenimiento de aeronaves de la Décima Escuadrilla[1]

La unidad de mantenimiento de la 10ª Escuadrilla tiene el propósito de normalizar las labores de mantenimiento para que todo su personal conozca las que le corresponden y tratando que todo mantenimiento tienda a garantizar el buen funcionamiento del material aéreo.

El mantenimiento de los helicópteros debe ser programado, es decir, se debe realizar una revisión completa de la aeronave, cada vez que esta cumpla con un número concreto de horas de vuelo. Para

[1] La mayor parte de la información que se expone a continuación, ha sido proporcionada por el Teniente de Navío Alejandro Sánchez Guerrero, Jefe del mantenimiento de la Décima Escuadrilla.

establecer el número de ciclos, antiguamente se hacía una estimación y se fijaba un número determinado. Esto era así hasta que se produjeran fallos en los equipos antes de lo estimado, por lo que se iban restando horas, para que las aeronaves entrarán antes en revisión. Este método condujo a un incremento de los gastos de mantenimiento, implantándose sistemas de control y planificación. Más adelante se implementa una filosofía moderna conocida como Just In Time (JIT) que se basa en la gestión de inventarios. La necesidad de reducir gastos y la idea de tener justo el material necesario y en el momento preciso, trajo muchas ventajas. Gracias al JIT, una avería o un retraso en una aeronave dejó de suponer la paralización de todo el mantenimiento. Aplicando el JIT, se realizaban pedidos de piezas para que estas llegasen cuando se fueran a requerir, de manera que se ahorrasen los grandes costes de stock de la maquinaria. Quedaba por resolver aquellas situaciones en las cuales varias aeronaves llegaban en cortos espacios de tiempo y se atascaba el proceso. La unidad de mantenimiento decide dar un paso más con esta nueva filosofía, de manera que se planeaban los vuelos de la escuadrilla, atendiendo al momento que había que mandar cada helicóptero a revisión. [29]

Se descubrió que las aeronaves no fallaban sólo debido a que sus horas de vuelo incrementaran, por lo que aparece el Reliability Centered Maintenance (RCM) en la escuadrilla. Este método se centra en realizar un profundo estudio del modelo que falla, que cada elemento presenta y, en consecuencia, el tipo de mantenimiento a llevar a cabo. La técnica ayuda a mejorar la comprensión del funcionamiento de equipos, a analizar todas las posibilidades de fallo y a determinar una serie de acciones y mecanismos para poder evitarlos. Se olvidó la idea de mantenimiento periódico, introduciendo la idea de mantenimiento preventivo. Se consiguió que se mantuviera la fiabilidad de los equipos durante el vuelo de los helicópteros, reduciéndose los accidentes en gran medida. [29]

Actualmente en la Armada Española todos los mantenimientos de aeronaves funcionan con RCM. Esta filosofía garantiza que no haya ninguna aeronave parada esperando a ser revisada por mantenimiento. Se debe asegurar el despliegue de unidades aéreas embarcadas por largos periodos de tiempo, alejados del territorio nacional, garantizando su aeronavegabilidad. No obstante, siempre primará la seguridad de la tripulación y de la aeronave. La herramienta que hay hoy en día para la gestión del mantenimiento de aeronaves es la aplicación GALIA, sin la cual no es posible llevar el control exhaustivo que implica el mantenimiento de la aeronavegabilidad. Esta aplicación lleva el control de todas las modificaciones/reparaciones que se realizan en las aeronaves. Se detalla en el Anexo II. [30]

Dos de los aspectos críticos de la aviación naval es el lanzamiento seguro de una aeronave para el vuelo y la aceptación de la aeronave. Ambas funciones son esenciales y van de la mano para garantizar la seguridad de la tripulación y la aeronave. Se deberá revisar el Libro de Vuelo usando la MESM (Mission Essential Subsystem Matrix) que es el listado de equipos que limitan la operatividad, añadida en el Anexo I.

2.5.1 Niveles de mantenimiento

Las unidades de mantenimiento tienen el objetivo de realizar inspecciones del material aéreo con la mayor uniformidad, rapidez y eficacia. Se plantea una división en tres tipos de mantenimiento que se pueden realizar de acuerdo con la organización Naval Air Systems (NAVAIR), la cabecera técnica que emite y sanciona las publicaciones. Estos niveles son Organisational Level (O), Intermediate Level (I) y Depot Level (D). La denominación es particular de las escuadrillas que utilizan el formato de la US Navy como la 10ª o la 9ª (aviones Harrier II). En los tres niveles se realizan trabajos de mantenimiento preventivo y correctivo. No obstante, el Almirante Jefe de Apoyo Logístico de la Armada (AJAL) dictó una instrucción permanente de sostenimiento, la 01/2019, sobre el mantenimiento de aeronaves en la Armada y que especifica los niveles de forma general.

La dirección [Figura 2-28] centralizada del mantenimiento de las aeronaves en el marco del Apoyo Logístico le corresponde a la Jefatura de Apoyo Logístico (JAL), por medio de la sección de Aeronaves, encuadrada en la Dirección de Sostenimiento (DISOS), mientras que su ejecución descentralizada le corresponde al Arsenal de Cádiz (ARDIZ), por medio del Grupo de Apoyo al Sostenimiento de la FLOAN (GAS FLOAN). [31]

El Jefe de GAS FLOAN (JEGAS FLOAN), planea, dirige, controla y ejecuta las acciones de mantenimiento de primer y segundo escalón de las aeronaves, sistemas y equipos de la FLOAN que tengas asignadas, y realiza el control y supervisión de las actividades del tercer escalón ordenadas. [31]

Del mismo modo, bajo la supervisión del Área de Aeronavegabilidad de la JAL, JEGAS FLOAN debe asegurar la aeronavegabilidad de todas las aeronaves de la FLOAN y garantizar su control de calidad. [31]

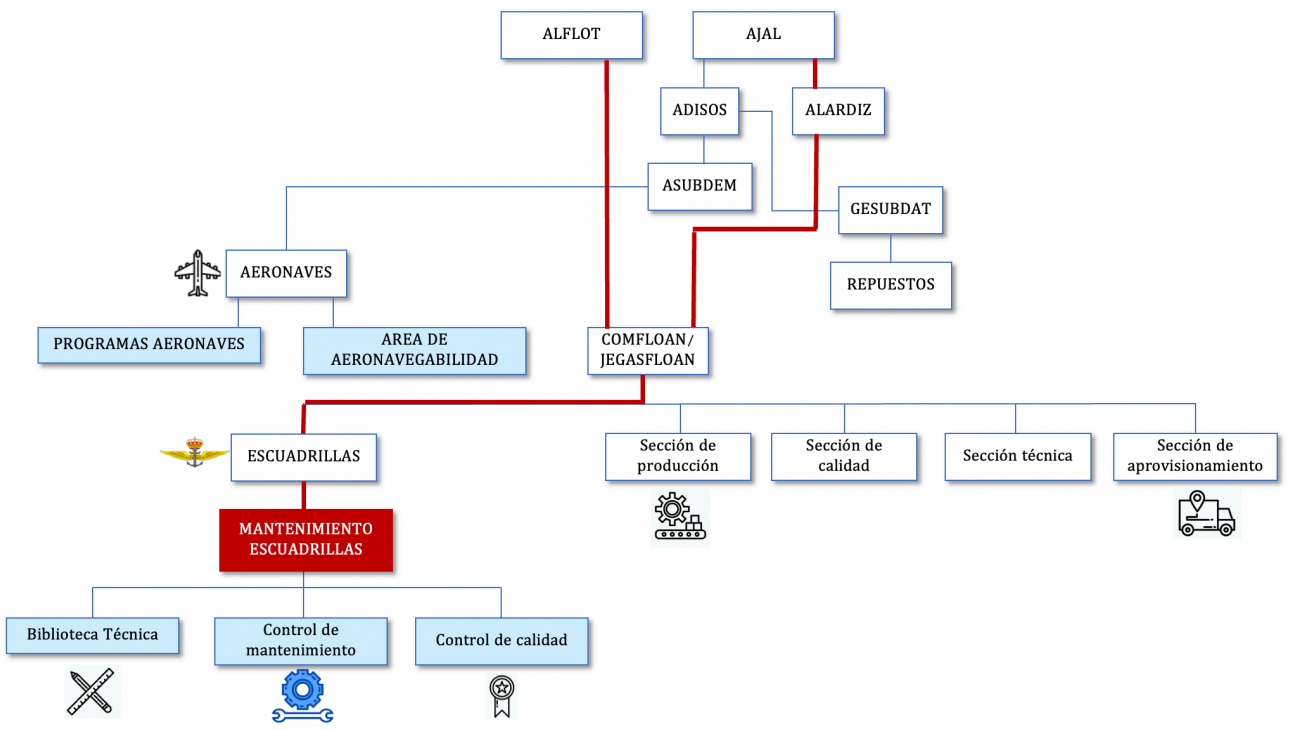


Figura 2-28 Organigrama Sostenimiento de Aeronaves en la Armada (Fuente: Décima Escuadrilla) [31]

La Décima Escuadrilla tiene su propio Escuadrón de Mantenimiento en la base para poder realizar los dos primeros niveles de revisión. En caso de estar la nave destinada en otra base aérea de la Armada u otra base de los otros ejércitos, podrán realizar los niveles O e I en las Maestranzas Aéreas o Centros Logísticos, que actuarían como Grupos de Apoyo Logístico. Existe la posibilidad de poder realizar el mantenimiento preventivo y correctivo O e I si el helicóptero estuviera embarcado en una fragata, o desplegada en el marco operativo de una misión o ejercicio. [31]

Es importante definir qué acciones de mantenimiento corresponden a cada nivel en función de la complejidad de las tareas, la cualificación del personal y de los equipos de apoyo. Las tareas serían las siguientes:

- Mantenimiento de aeronaves [Figura 2-29].
- Mantenimiento de motores.
- Mantenimiento de sistemas, componentes y accesorios de material de vuelo.

- Mantenimiento de armamento.
- Mantenimiento de electrónica y telecomunicaciones.



Figura 2-29 Escuadrón de mantenimiento (Fuente: Décima Escuadrilla)

2.5.1.1 Nivel O

El nivel O es primer escalón de mantenimiento, llevado a cabo por la escuadrilla y su responsable es el Jefe de la Escuadrilla. La función de este nivel es preparar al helicóptero antes de cada vuelo y dejarlo en buenas condiciones tras el vuelo para que pueda volver a salir. Por lo tanto, incluye revisiones pre-vuelo, entre-vuelo y post-vuelo, en las cuales se inspeccionan los equipos y se prepara la aeronave para la misión, en concreto, que se dispone a llevar a cabo. Labores como repostar combustible, comprobar que lleva el equipo adecuado para su misión y una comprobación global y completa de la aeronave, son el objetivo. Es un mantenimiento a nivel básico, que se suele realizar en el aparcamiento o hangar donde suela reposar la aeronave. No se debe restar importancia a este nivel por muy básico que sea, ya que, en este nivel, es donde es posible la detección y evaluación de averías que surgen por unos motivos o por otros, con un uso corriente de los helicópteros. Todo piloto que vuelve de volar tiene la obligación de informar de cualquier anomalía que haya podido detectar. Entonces la unidad de mantenimiento decidirá si puede solucionarse rápidamente o si hay que ascender al segundo escalón de mantenimiento, el nivel I. [32]

Dentro del Organisational Level puede haber tareas que sean programadas y no programadas o accidentales. Si nos centramos en las programadas, también se distinguen cuatro tipos de tareas: Especiales, las Condicionales, por Fases y las Diarias o Turn Arounds. Cada una de ellas tiene su propia publicación donde se detallan los procedimientos a llevar a cabo.

- Revisiones Especiales

Dentro de las Especiales se realizan las inspecciones por días de calendario, por ejemplo, cada siete días o cada 14 días. Es totalmente independiente de si la aeronave ha efectuado un vuelo o no. También hay trabajos que se realizan tras ciertas horas de vuelo, por ejemplo, cada 30 horas, 60 horas, 525 horas, etc.

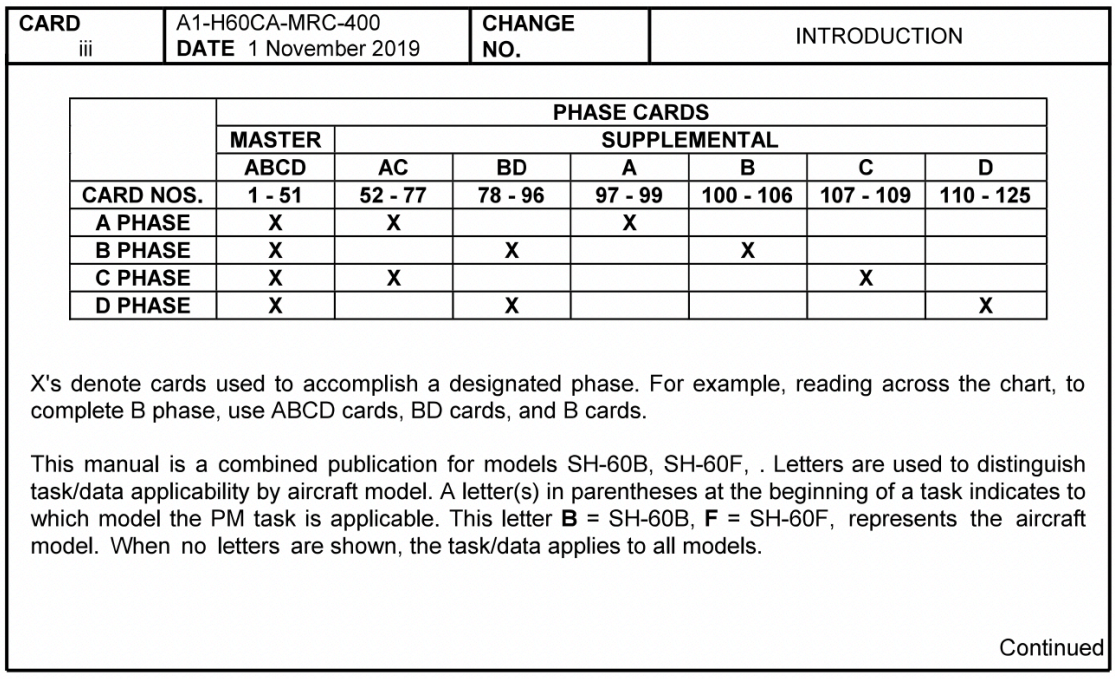
- Revisiones Condicionales

En las Condicionales solo se realizan las acciones de mantenimiento cuando se han dado ciertas condiciones en el vuelo, como por ejemplo si hay impacto de ave en el helicóptero, después de una misión SAR en condiciones marítimas y salinas, si se ha operado en un medio ambiente desértico o arenoso, si las palas han tocado el cono de cola, etc.

- Revisiones por Fases

Los requisitos de mantenimiento de cada inspección de intervalo de fase se llevan a cabo al caducar las 200 horas de vuelo, contadas cuando ha finalizado la inspección de intervalo de la fase anterior. El ciclo para los helicópteros SH-60B consiste en cuatro fases, identificadas como “Fase A”, “Fase B”, “Fase C” y “Fase D”. Las fases están distanciadas cada 200 horas. Si recibimos un helicóptero nuevo de fábrica, a las 200 horas de vuelo realizará la fase A. A las 400 horas de vuelo desde haberlo traído nuevo y a 200 horas de vuelo de haber realizado la fase A, se lleva a cabo la fase B. A las 600 horas de vuelo desde nuevo y a 200 horas de vuelo de la fase B, se realiza la fase C. A las 800 horas de vuelo desde nuevo y a 200 horas de vuelo de la fase C, se lleva a cabo el mantenimiento de fase D. El mantenimiento por fases se repite en este orden, e ininterrumpidamente, durante la vida útil de la aeronave. Las fases A, B y C se pueden realizar navegando o en la base, indistintamente. La fase D, sin embargo, suele requerir algunas inspecciones del 2º escalón en caso de aparecer anomalías, algo que es frecuente, por tanto, esa siempre se realiza en base.

Aunque cada fase tiene trabajos específicos, hay una serie de tareas que son comunes a todas las fases. Por ejemplo, en la fase A se realizan tareas comunes a las otras cuatro fases (ABCD), más otras comunes a la A y C (AC) más otras específicas a la A. Con el resto de fases sucede algo similar. No obstante, lo anterior, también se puede realizar más de una fase al mismo tiempo, es decir, por ejemplo, juntar las fases A y C en un mismo periodo de mantenimiento, aunque debería de autorizarse. En cualquier caso, no es lo habitual. Las cartas de cada tarea a llevar a cabo, conocidas como “Task cards”, están etiquetadas para identificar su fase aplicable. Los requisitos de inspección que son comunes a todas las fases se consolidan en una task card identificada como “ABCD”. A continuación, se ve con más claridad, las Task cards que implican cada fase [Figura 2-30]:



CARD iii	A1-H60CA-MRC-400 DATE 1 November 2019	CHANGE NO.	INTRODUCTION

	PHASE CARDS						
	MASTER	SUPPLEMENTAL					
	ABCD	AC	BD	A	B	C	D
CARD NOS.	1 - 51	52 - 77	78 - 96	97 - 99	100 - 106	107 - 109	110 - 125
A PHASE	X	X		X			
B PHASE	X		X		X		
C PHASE	X	X				X	
D PHASE	X		X				X

X's denote cards used to accomplish a designated phase. For example, reading across the chart, to complete B phase, use ABCD cards, BD cards, and B cards.

This manual is a combined publication for models SH-60B, SH-60F, . Letters are used to distinguish task/data applicability by aircraft model. A letter(s) in parentheses at the beginning of a task indicates to which model the PM task is applicable. This letter **B** = SH-60B, **F** = SH-60F, represents the aircraft model. When no letters are shown, the task/data applies to all models.

Continued

Figura 2-30 Secuencia de las Task cards (Fuente: 10ª Escuadrilla)

Los trabajos por fases, al igual que los mantenimientos especiales, son principalmente inspecciones de la aeronave para comprobar que todo está bien. No se contempla la sustitución de componentes, salvo que se observen anomalías.

- Revisiones Diarias o Turn Arounds

Las revisiones Diarias son las que se llevan a cabo antes de entregar la aeronave al comandante piloto y es una revisión general y principalmente de la zona externa del helicóptero. Tiene una validez de 72 horas mientras el helicóptero no vuela y 24 una vez haya despegado la primera vez. Las tareas Turn Arounds [Figura 2-31] corresponden a la comprobación de los niveles de los fluidos, como, por ejemplo, el nivel de aceite lubricante en motores y cajas de engranajes, aceite hidráulico en bombas, nitrógeno en amortiguadores y acumuladores, presión en los neumáticos, etc. Se lleva a cabo siempre que se realiza una revisión Diaria y, al contrario que la anterior, tiene una validez de 24 horas si la aeronave no vuela. En caso de parar más de una hora entre vuelos hay que volver a realizarla.



Figura 2-31 Realizando Turn Around (Fuente: Décima Escuadrilla)

2.5.1.2 Nivel I

El segundo escalón de mantenimiento engloba aquellas acciones que requieren la paralización de la aeronave durante un periodo de tiempo. Los trabajos se realizan en instalaciones del GAS FLOAN por personal militar y/o civil y son responsabilidad del JEGAS FLOAN. Este mantenimiento se lleva a cabo si ha vencido algún plazo establecido previamente, como, por ejemplo, el número de despegues del helicóptero, o por mantenimiento correctivo si ha ocurrido algún fallo en el funcionamiento de cualquier parte de la aeronave. El principal mantenimiento del helicóptero de nivel I es el Baseline o Planned Maintenance Intervals (PMI). Este se realiza con una periodicidad de tres años y en la práctica, suele durar un año. También existen otros mantenimientos de componentes y su frecuencia de mantenimiento viene determinada, normalmente, por las horas de vuelo. Un ejemplo son los amortiguadores de las palas del rotor principal, conocidos comúnmente como dampers. Tienen 800

horas de vuelo entre revisiones. Cuando cumplen este tiempo, la escuadrilla tiene que desmontar el helicóptero y entregarlo al GAS FLOAN para su revisión. Tras realizarse la paralización y haberse abarcado las tareas propias del nivel O, se realiza una prueba en vuelo comprobando si la avería ha sido completamente subsanada.

2.5.1.3 Nivel D

En el tercer escalón, el personal de mantenimiento se encarga de las tareas de mayor envergadura, siendo una inspección que se realiza según un número determinado de horas de vuelo. Es llevado a cabo por empresas o personal ajeno a la Armada y son responsabilidad de JEGAS FLOAN, como el anterior nivel. El nivel D implica desmontaje completo de la aeronave y una revisión meticulosa de cada componente que forme parte de ella. El objetivo es claro, asegurar la operatividad de los sistemas realizando las reparaciones que superen los dos primeros niveles de mantenimiento.

Para que se entiendan mejor los últimos dos niveles se pone un ejemplo. Nos ponemos en el supuesto de que un helicóptero tiene que realizar una inspección mayor, llamada PMI. Esta corresponde al nivel I, es decir, segundo escalón de mantenimiento. GAS FLOAN es el responsable de ejecutar este trabajo. Para realizarlo hace uso de su personal e instalaciones. En caso de no disponer de personal militar o civil, lo externaliza a una empresa para que se encargue de realizarlo en instalaciones de Armada y controlado por personal de la Armada. Ahora imaginemos un radar que tiene una avería que corresponde al nivel D, es decir, tercer escalón. GAS FLOAN sigue siendo responsable de este mantenimiento, pero en este caso no es él quien lo ejecuta, sino que lo externaliza directamente a una empresa especializada con capacidad para realizar este trabajo. La acción de mantenimiento se lleva a cabo en las instalaciones de la propia empresa, no de la Armada. En resumen, GAS FLOAN se responsabiliza de ambos niveles I y D, aunque en el caso de los de nivel D, se externalizan directamente a empresas especializadas.

Teniendo en cuenta estos niveles y tipos de mantenimiento, el presente Trabajo de Fin de Grado se centrará en la planificación de las revisiones por Fases, incluido dentro del nivel O. Se introducen también los mantenimientos I y D, que se reflejan en el estado operativo de la aeronave. Cuando se mencione 'Obras GAS FLOAN' significará que el helicóptero está cumpliendo mantenimiento de uno de estos dos niveles. A continuación, se muestra un diagrama de árbol [Figura 2-32] donde quedan recogidos todos los mantenimientos, a modo de resumen.

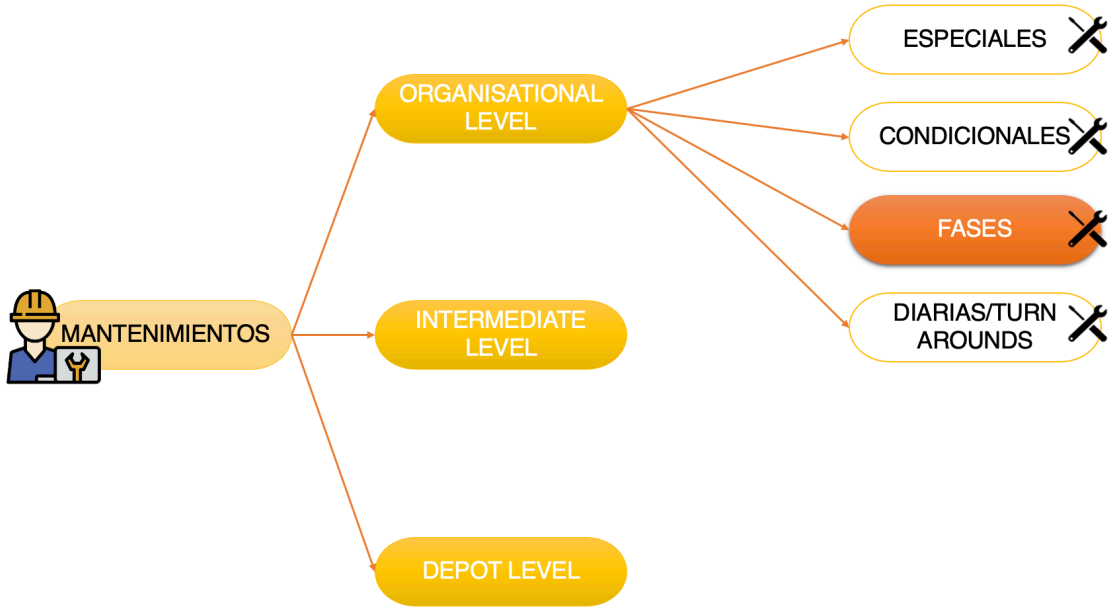


Figura 2-32 Resumen de mantenimientos que recibe el SH-60B (Fuente: Elaboración propia)

3 PROGRAMACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE LA DÉCIMA ESCUADRILLA

Para atenuar los efectos dañinos existentes en las misiones, se ha planeado un programa para el mantenimiento preventivo de los helicópteros SH-60B según sus horas de vuelo, basado en el mantenimiento por Fases que se les aplica a estas aeronaves. El programa utiliza la Programación Lineal Entera de modo que organiza por semanas, cuándo una aeronave debería estar en mantenimiento y cuándo podría desplegarse para llevar a cabo una operación. Los requisitos de los mantenimientos programados son el mínimo necesario en todas las condiciones y son obligatorios para asegurar, descubrir y corregir oportunamente los defectos. Es decir, tras un número exacto de horas de vuelo, el helicóptero debería volver (si es que no lo está haciendo aún) a la Base Naval de Rota para mantenimiento, en el caso de estar volando. Si el helicóptero se encuentra embarcado, no será necesario, pues se aplican otras condiciones que se mostrarán más adelante. El personal de mantenimiento lleva a cabo los cuatro tipos de inspecciones "A", "B", "C" y "D" en cada helicóptero cada 200 horas de vuelo. Cada tipo de mantenimiento posee diversos grados de complejidad e implica la inspección de diferentes partes del fuselaje [Figura 3-1]. [33]

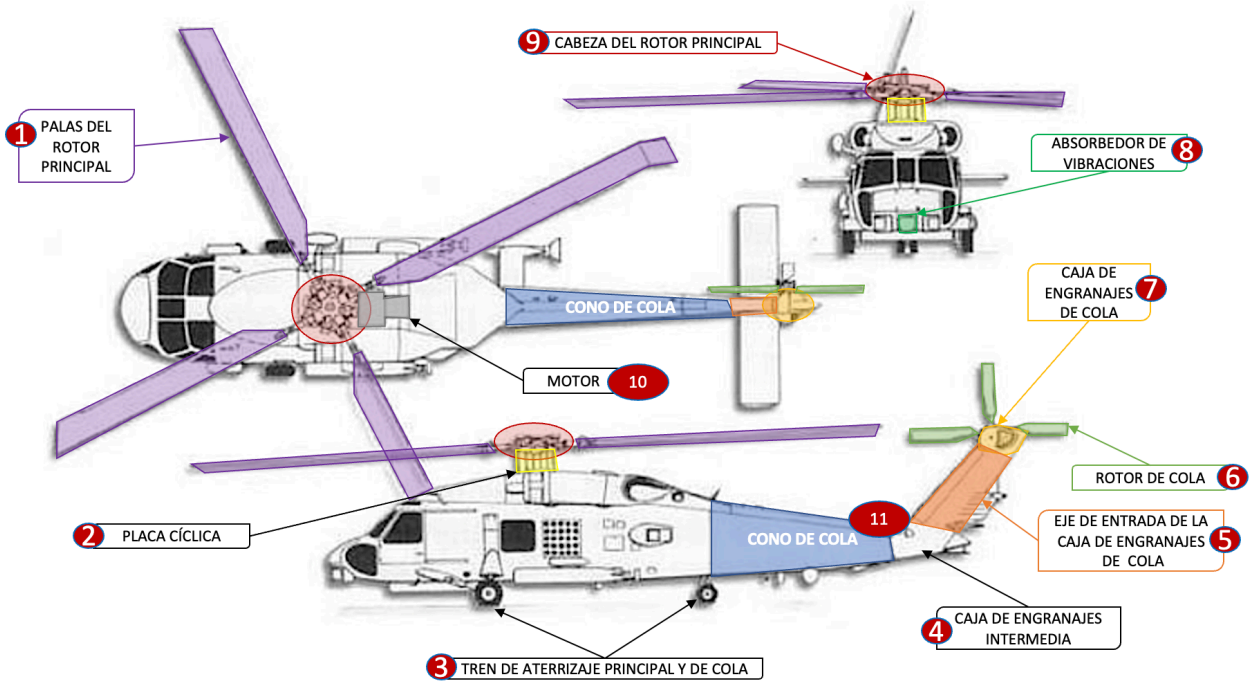


Figura 3-1 Partes principales en las que se centra el de mantenimiento (Fuente: Elaboración propia) [34]

De manera sencilla y genérica, una inspección A se centra en los trenes de aterrizaje, en las ruedas y en el cono de cola. Normalmente los mecánicos también revisan la placa cíclica, componente del rotor principal para el control de dirección y para la detección de partículas metálicas, que suele ser el primer motivo de fallo del motor. La revisión B requiere la inspección del motor, de los filtros de aceite y combustible, y los rotores principal y de cola. El mantenimiento del tipo C revisa el absorbedor de vibraciones, la caja de engranajes del rotor principal y los extremos de las palas del rotor principal, que es donde más se desgastan. Por último, el mantenimiento tipo D requiere el desmontaje completo e inspección del rotor principal. Por su complejidad, no se realiza este tipo de mantenimiento a bordo de un buque. Estas cuatro posibles combinaciones de inspecciones de distintas duraciones, se llevan a cabo en secuencia, cada ciclo de 800 horas. En la tabla [Figura 3-2] se marca con el símbolo "✕" las cartas que hay que emplear para llevar a cabo cada fase. Por ejemplo, si nos fijamos, para completar la fase B, usamos la carta ABCD, BD y B. [35]

		TASK CARDS								
COMBINACIONES	FASES	ABCD	AC	BD	A	B	C	D	TIEMPO DE EJECUCIÓN (horas)	DURACIÓN (semanas)
1	FASE A	✕	✕		✕				98,8	3
2	FASE B	✕		✕		✕			89,8	3
3	FASE C	✕	✕				✕		98,8+2	3
4	FASE D	✕		✕				✕	135,8	3

Figura 3-2 Características de la combinación de las inspecciones (Fuente: Elaboración propia)

Cuando se realiza una de estas combinaciones, el helicóptero se mantiene paralizado y no puede volar. Todos los mantenimientos se deben hacer en la fecha u horas de vuelo determinadas. El no hacerlo deja la aeronave inmediatamente fuera de vuelo. No obstante se permite cierta flexibilidad para programar los mantenimientos y hacer frente a situaciones inusuales. Para programar los mantenimientos hay que considerar, por una parte, los tipos de mantenimientos, unificándose en uno, que se repite cada 200 horas de vuelo. Pese a que cada tipo de mantenimiento tiene un tiempo de ejecución distinto, la duración es la misma, pues hay que considerar los medios disponibles, los mantenedores y el horario de trabajo del Escuadrón de mantenimiento. Hay que tener en cuenta que esos tipos de trabajo, se llevan a cabo junto con el mantenimiento diario del resto de aeronaves. Si la aeronave está embarcada, cada fase de mantenimiento requiere también tres semanas de trabajo en la mar. Hay ocasiones en las que se puede tardar ligeramente menos y otras más, pero lo más habitual son tres semanas.

Se introducido a su vez los mantenimientos de los niveles I e D, comprimiéndolos en uno. Estos no dependen de las horas de vuelo, si no que se realizan cada tres años. Se incluyen en el estado de la aeronave, que puede ser: operativo, en mantenimiento o en obras GAS FLOAN. Su tiempo de ejecución es de 6715 horas, pero suele tardarse un año entero en completarse.

Con toda esta información, se presenta en este Trabajo de Fin de Grado, un programa basado en un modelo de Programación lineal, que permite organizar el mantenimiento y el despliegue en un horizonte de 24 semanas [Figura 3-3]. La elección de este periodo es debido a que un buque no permanece en misión más de seis meses, es más, lo normal es que sea relevado por otro buque a los tres meses. Los SH-60, como se explicó anteriormente, llevan a cabo otros mantenimientos, que en este caso no afectan al mantenimiento por fases, siendo el objeto del proyecto a estudio. Cuando las

aeronaves disponen de pocas horas de vuelo antes de recibir un mantenimiento, normalmente se aplica un margen, permitiendo cierta flexibilidad. Se puede aplicar un margen de más o menos tres días o un margen de más o menos 10 por ciento. De ser así, las próximas inspecciones se programarán como si no se hubiera producido ninguna desviación.

3.1 Problema planteado

La programación del mantenimiento requiere satisfacer una serie de limitaciones que negocian entre los requisitos de la operatividad y el mantenimiento. Se busca organizar los periodos de los helicópteros, de tal modo, que una aeronave no tenga que abandonar una operación hasta que alcance un determinado número de horas de vuelo, antes de su próximo mantenimiento. En el caso de realizarse una misión en la cual la aeronave va embarcada, se alcanzarán solo los mantenimientos A, B y C. La duración de estos mantenimientos a bordo, es la misma que en la base. Navegando el helicóptero dispone de una UNAEMB de 16 a 18 mantenedores disponible solo para él, las 24 horas del día. A parte de la Base Naval de Rota, el helicóptero puede ubicarse en las fragatas FFG y F100, así como los buques BAA. A la hora de elegir qué helicóptero se embarca, se optará sencillamente por aquel que no tenga previsto efectuar la fase D navegando, entre otras. Hay que tener en cuenta, que en los despliegues no se vuela durante tanto tiempo. Como mucho se realizarán de 150 a 200 horas de vuelo. Para que un helicóptero pueda ser desplegado en una misión debe cumplir con cinco condicionantes:

1) No debe haber una fase D programada.
2) No cumplir el mantenimiento de 365 días.
3) No debe de haber programado el mantenimiento de 547 días.
4) No debe caducar un componente de vida limitada que no pueda ser sustituido a bordo.
5) No debe caducar el Certificado de Aeronavegabilidad Militar (CMA).

Estas restricciones son prácticas, no teóricas. Es decir, una fase D, una inspección de 547 días o incluso la renovación del CMA se podría hacer embarcado. El problema es que durante algunos trabajos, si al inspeccionar aparecen daños, desgastes o discrepancias, es posible que se requiera el apoyo del segundo escalón de mantenimiento. Por estos motivos y por razones económicas, debe evitarse. [36]

Por otro lado, se promueve una distribución equitativa de las horas de vuelo entre todos los helicópteros durante el horizonte de planificación. Los helicópteros de la Décima Escuadrilla acumulan muchas horas de vuelo debido a su operatividad en distintos escenarios, por lo que, en la planificación se incluye un máximo número de horas de vuelo, que se debe cumplir por semana para cada helicóptero.

La capacidad que tiene la unidad de mantenimiento es de reparar como máximo un helicóptero durante cualquier semana. La plantilla de la Escuadrilla permite la realización de una sola fase en la base. Se debe recordar que este tipo de trabajo hay que simultanearlo con el mantenimiento diario del resto de aeronaves. Navegando también sería únicamente una aeronave. Una fase es un tipo de inspección que requiere semanas de trabajo en la mar. Durante este periodo, por motivos operativos, nunca se van a sincronizar las fases de dos aeronaves que puedan estar embarcadas en una fragata. Para prevenir el realizar más combinaciones de mantenimiento de lo necesario, no se programa a un helicóptero realizar mantenimiento hasta que finalicen sus horas de vuelo. Al alcanzar el tiempo de vuelo disponible, se fuerza a que la aeronave comience el mantenimiento. La programación también controla la cantidad de tiempo entre dos de las combinaciones de mantenimiento. Hay cuatro posibles

combinaciones de inspección, y cada una de ellas debe ser llevada a cabo cada 200 horas de vuelo. Por lo tanto, cada combinación ocurre en este caso cada 800 horas, y el tiempo entre cada combinación se reduce dependiendo de las horas de vuelo de la aeronave.

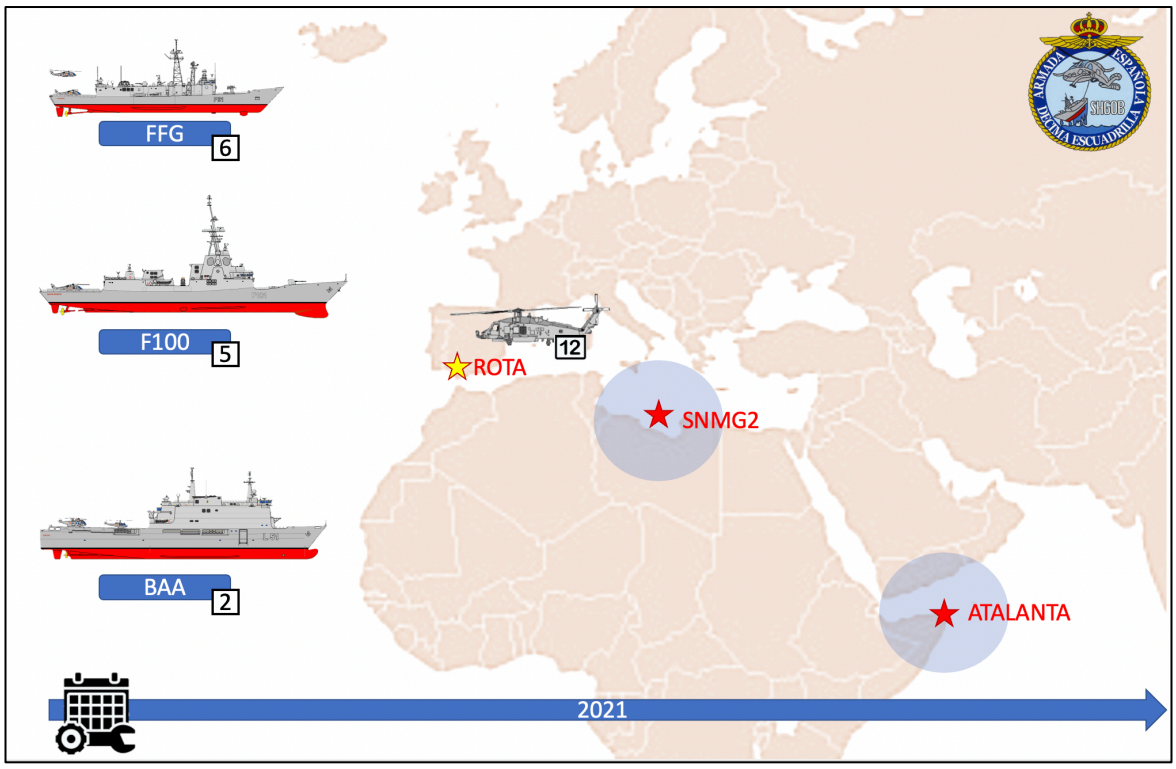


Figura 3-3 Representación visual de la programación (Fuente: Elaboración propia) [37]

Las condiciones iniciales tienen en cuenta tres distintos tipos de información. El primero es el número de horas al comienzo, para que cada helicóptero deba realizar una determinada inspección. La segunda sería el lugar donde cada helicóptero está estacionado al principio de la planificación. Y, por último, si el helicóptero estuviera realizando algún tipo de mantenimiento al inicio. Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se expone la formulación a continuación: [38]

Índices:

h	Helicóptero de la 10ª Escuadrilla
t	Semana
u	Ubicación (0 = Base Naval de Rota)

Conjuntos:

H	Helicópteros de la Escuadrilla $H = \{1, \dots, 12\}$.
T	Semanas del horizonte de planificación $T = \{1 \dots, 24\}$.
U	Lugares operativos del helicóptero $U = \{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$.

Datos:

A Número de horas de vuelo que un helicóptero puede realizar antes de un mantenimiento.

$$A = 200$$

B_u Máximo número de helicópteros que pueden realizar mantenimiento en una ubicación u.

$$B_u = 1$$

C_h Número de semanas que dura el mantenimiento de cualquier helicóptero.

$$C_h = 3$$

D Número de horas que un helicóptero vuela por semana.

$$D = 30$$

F_u Capacidad de helicópteros en una ubicación u, cuando el helicóptero va a bordo de un buque en una misión.

$$F_u = 1$$

m_{hu} Semanas que dura una misión, en la ubicación u.

n_t Número de aeronaves que deben estar operativas durante la semana t.

J_{ht} Horas de vuelo realizadas del helicóptero h en la primera semana.

Variables de decisión:

Estado del helicóptero

a_{htu} Binaria. 1 Si helicóptero h está desplegado en ubicación u durante la semana t, 0 si lo contrario.

b_{htu} Binaria. 1 Si helicóptero h está en mantenimiento en la semana t en una ubicación u, 0 si lo contrario.

Horas de vuelo

x_{ht} Número de horas de vuelo disponibles del helicóptero h al comienzo de la semana t antes del mantenimiento.

y_{ht} Número de horas de vuelo acumuladas por el helicóptero h durante la semana t.

Forma compacta:

Se desea minimizar, el número de ocasiones en las que helicópteros desplegados están en mantenimiento en el horizonte de planificación.

$$min \qquad \sum_{h\in H}\sum_{u\neq 0}\sum_{u\in U}\sum_{t\in T} b_{htu}$$

Restricciones:

(1) El número de aeronaves operativas a lo largo de una semana, no puede ser inferior al de aeronaves que deben estar operativas, en dicha semana.

$$|H| - \sum_{h\epsilon H}\sum_{u\in U} b_{htu} \geq n_t \qquad \forall t \,\epsilon\, T$$

(2) Al menos una aeronave debe estar operativa en la Base Naval de Rota.

$$\sum_{h\in H} a_{htu} \geq 1 \qquad \forall t \,\epsilon\, T, \qquad u = 0$$

(3) Asegurar que se cumple con el máximo número de helicópteros ubicados en un buque por semana.

$$\sum_{h\in H}(a_{htu} + b_{htu}) \leq F_u \qquad u \neq 0,\ u \in U$$

(4) Asegurar un reparto equitativo, de tal modo que solo se pueda asignar un helicóptero como mucho a una misión en el horizonte de seis meses.

$$\sum_{u\in U} a_{htu} \leq 1 \qquad \forall\ h\ \in H, \qquad u \neq 0$$

(5) Asegurar que no más de un helicóptero realiza mantenimiento en una ubicación, en el mismo periodo de tiempo.

$$\sum_{h\in H} b_{htu} \leq B_u \quad \forall h\ \in H, \quad t \in T, \quad u \in U$$

(6) Las horas de vuelo disponibles de un helicóptero al comienzo de la semana no pueden ser superiores al número de horas de vuelo que un helicóptero puede realizar tras mantenimiento.

$$x_{ht} \leq A \cdot a_{htu} \qquad \forall h \in H, \quad t \in T, \quad u \in U$$

(7) Las horas de vuelo disponibles de un helicóptero deben ser mayores que las horas de vuelo realizadas.

$$x_{ht} \geq y_{ht} \qquad \forall h \in H, \quad t \in T$$

(8) Prevenir que helicópteros con muchas horas de vuelo se puedan desplegar estando en la base. El margen como se indicó anteriormente es $\pm 10\%$ de las horas de vuelo, previo a realizar un mantenimiento.

$$A - 0{,}1 \cdot A \leq x_{ht} \cdot a_{hut} \leq 0{,}1 \cdot A + A \quad \forall \ h \in H, \quad t \in T, \quad u \in U$$

(9) Si el helicóptero está en un buque, debe estar en esta ubicación hasta que finalice la misión.

$$\sum_{t \in T} (a_{htu} + b_{htu}) = m_{hu} \quad \forall \ h \in H, \ u \in U = \{1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$$

(10) A continuación se muestra una restricción que traslada los datos iniciales según su situación inicial a las variable correspondiente.

$$x_{ht} = J_{ht} \qquad \forall \ h \in H, \ t \in T = 1$$

(11) Las restricciones que imponen la no negatividad de las variables de decisión no binarias.

$$x_{ht}, y_{ht} \geq 0 \quad y \quad enteras \qquad \forall \quad h, u, t$$

(12) Finalmente, las restricciones que imponen carácter binario a algunas variables de decisión.

$$a_{htu}, b_{htu} \quad binarias \qquad \forall \quad h, t, u$$

El programa propuesto, por su complejidad, no cumple con todos los requerimientos de una programación de mantenimiento realista. En primer lugar se obliga a que todos los helicópteros operativos realicen cada semana 30 horas de vuelo. Como se indicó antes, lo normal es que haya un máximo. Estos helicópteros están diseñados para volar 24 horas seguidas relevando los pilotos en caliente. Cada 24 horas hay que realizar una inspección Diaria y Turn Around para poder continuar. Además, una vez a la semana le va a tocar un mantenimiento especial que requerirá cierto tiempo y dependiendo del que sea, este tiempo puede ser de 2 o 3 horas o varios días. A efectos prácticos, lo normal es que un helicóptero vuele dos días a la semana unas 10-12 horas y emplear los otros tres días para hacer mantenimientos. Algunas semanas sólo podrá volar un día y ocasionalmente ninguno. De todos modos, si se han introducido los niveles I y D, que no son dependientes de las horas de vuelo sino que se realizan cada vez que la aeronave cumple tres años.

En segundo lugar, no se cumple con que se realice un único mantenimiento a la semana en la Base Naval de Rota. Para ello sería necesario introducir una nueva variable, que mantenga a un helicóptero en espera en caso de haber agotado sus horas de vuelo y que haya ya un helicóptero pasando por mantenimiento. Debe quedar reflejado que la variable x_{ht}, que son las horas disponibles de una aeronave previas a realizar mantenimiento, no interviene en la función objetivo del programa diseñado con Excel. Aporta información útil para la unidad de la Décima Escuadrilla, pero no afecta a la solución del problema.

Por último, tampoco se ha considerado que la fase D de mantenimiento se deba realizar siempre en la base. Según lo formulado y lo que posteriormente se ha implementado en la aplicación, la fase D se realiza indistintamente en la base y estando embarcado.

Pese a que se ha reducido el problema por estos factores, el programa funciona correctamente. Se asignan helicópteros a las unidades navales cuando hay una misión, según sus horas de vuelo y por lo tanto, según los mantenimientos preventivos previstos. El programa resetea las horas de vuelo de los helicópteros cada 200 horas de vuelo. No obstante, se han implementado los cuatro tipos de mantenimientos por fases, conociendo en cada periodo y si la aeronave está en mantenimiento, qué fase de mantenimiento corresponde.

4 VALIDACIÓN Y RESULTADOS

4.1 Implementación del problema en Excel

En este apartado se explica cómo se ha pasado de la formulación matemática a una aplicación que permita la programación del mantenimiento de los helicópteros. Cabe indicar que se realizará, al principio, introduciendo datos de un escenario al azar, dentro de las limitaciones comentadas en el apartado anterior. A continuación se presenta un esquema [Figura 4-1] donde se indican los inputs y los outputs del programa. Con inputs se refiere a los índices, los datos, las variables y las restricciones formuladas en el desarrollo. Los outputs serían la solución óptima, resuelta gracias al complemento Solver. Se adjudica el color verde a aquellos elementos que involucran la operatividad de la aeronave y, por otra parte, el color rojo representará todo lo que tenga que ver con el mantenimiento de la aeronave. Los dos recuadros que se muestran en un tono amarillo, implican que el usuario que opere el programa, debe actualizar esa información de forma manual con la situación de ese momento, para que el programa funcione con exactitud y datos reales. Destacar que se deben actualizar un total de tres datos: las horas de vuelo realizadas hasta el momento, los helicópteros requeridos por semanas en una misión y la última fase de mantenimiento recibida. La introducción de estos datos incluye que se renueve la información de las horas de vuelo que ha realizado cada aeronave, teniendo en cuenta que cada 200 horas de vuelo se resetean. También se modifican manualmente aquellas celdas de la plantilla, que impliquen en qué periodo va a ser necesario el desplegar una aeronave para una determinada misión. La recopilación de esta información suele obtenerse con suficiente antelación, permitiendo que se pueda lograr una planificación de cada helicóptero en particular.

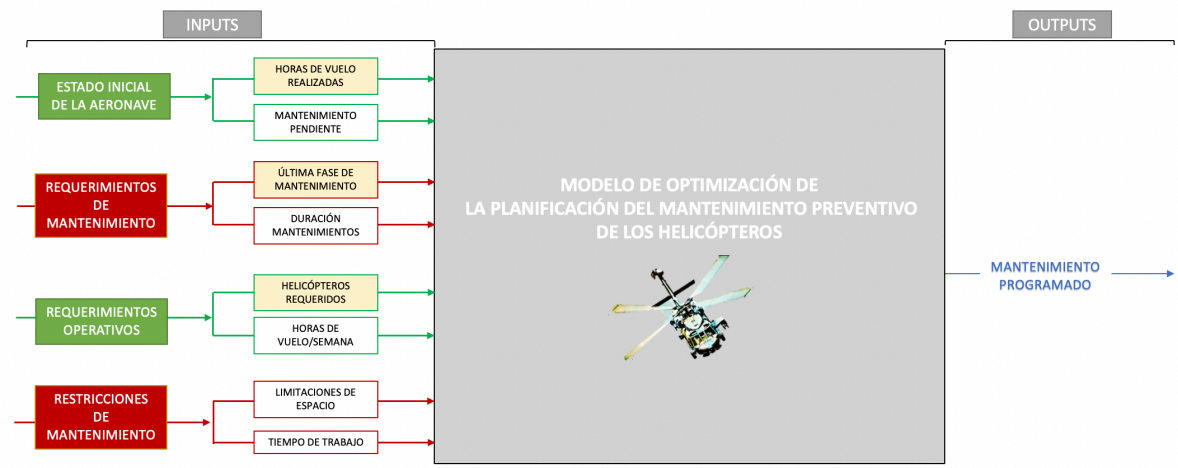


Figura 4-1 Representación esquemática del programa de mantenimiento (Fuente: Elaboración propia)

En primer lugar se abrió un nuevo 'Libro en blanco' en Excel, formado por cinco hojas de cálculo [Figura 4-2] nombradas como: 'DATOS', 'FUNCIÓN OBJETIVO', 'MISIONES', 'MANTENIMIENTO' y 'BUQUES DE LA ARMADA'.



Figura 4-2 Hojas de cálculo del Programa (Fuente: Elaboración propia)

4.1.1 Hoja 'DATOS'

La primera hoja se encarga de recoger los datos iniciales de los que se parte. Es decir, se ha creado una tabla, donde con insertar las horas de vuelo de cada helicóptero (dato J_{ht} del apartado 3.1), teniendo en cuenta que cada 200 horas se resetea a 0 horas (dato A del apartado 3.1), y la última fase de mantenimiento recibida, se obtiene el estado operativo. No solo eso, sino que también, al ejecutarse todo el programa, se obtienen el resto de datos del inicio de la programación. Esto es posible pues, se ha implementado una tabla [Matriz 4-1] que está conectada a sus correspondientes tablas de la hoja 'FUNCIÓN OBJETIVO'.

La primera columna de la Matriz 4-1 son los números de cola de cada helicóptero. La segunda columna, es donde manualmente, el operario introduce las horas de vuelo de cada helicóptero. En este momento es importante considerar que algunos helicópteros pueden no estar operativos durante un año por las obras GAS FLOAN de los mantenimientos I y D. En ese caso, en vez de introducir un número de horas, se podrá 'I' de Intermediate Level. La quinta columna es el segundo dato que debe rellenar el operario. Se trata de introducir, como se indica en la columna, la última fase que ha recibido cada aeronave. Al rellenarse estas dos columnas, se actualiza el resto de la tabla de forma automática. La tercera columna indicará el estado de la aeronave, en la primera semana. Aquí se verá reflejado si una aeronave se encuentra operativa, en mantenimiento o en obras GAS FLOAN. Se realiza utilizando un condicional [Figura 4-3]. La función condicional 'SI' que comprueba si se cumple una condición, y devuelve un valor si se evalúa como 'verdadero' y otro valor si se evalúa como 'falso'. La cuarta columna muestra, si está en mantenimiento, qué fase se está realizando. La sexta y séptima columnas actúan de forma auxiliar. Las horas de vuelo disponibles, son aquellas que le faltan a una aeronave operativa, para entrar en mantenimiento. La última columna extrae de la quinta columna los datos, para facilitar la construcción de una tabla de la hoja de 'FUNCIÓN OBJETIVO'.

HELICÓPTERO	HORAS DE VUELO	ESTADO	FASE DE MANTENIMIENTO	ÚLTIMA FASE	HORAS DE VUELO DISPONIBLES	ÚLTIMO MANTENIMIENTO
01-1001	20	OPERATIVO		B	180	2
01-1002	0	OPERATIVO		D	200	4
01-1003	34	OPERATIVO		B	166	2
01-1004	55	OPERATIVO		A	145	1
01-1005	179	OPERATIVO		C	21	3
01-1006	177	OPERATIVO		C	23	3
01-1007	200	MANTENIMIENTO	C	B	0	2
01-1008	I	OBRAS		D	0	5
01-1009	99	OPERATIVO		D	101	4
01-1010	33	OPERATIVO		B	167	2
01-1011	155	OPERATIVO		B	45	2
01-1012	5	OPERATIVO		D	195	4

Matriz 4-1 Estado inicial de cada helicóptero (Fuente: Elaboración propia)

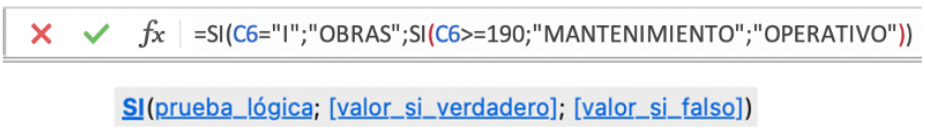


Figura 4-3 Fórmulas utilizadas para la Matriz 4-1 (Fuente: Elaboración propia)

En esta hoja se incluyen también dos gráficos que, ofrecen una información rápida y visual del estado de la Décima Escuadrilla. La primera gráfica [Figura 4-4] se refiere al número de helicópteros que al principio de cada periodo, están operativos. La segunda gráfica [Figura 4-5], extrae los datos de la sexta columna de la Matriz 4-1. En ella se muestran el número de horas disponibles al principio de cada periodo (variable x_{ht} del apartado 3.1) , es decir, el potencial de esfuerzo que podría desarrollar la Décima Escuadrilla hasta que sus aeronaves operativas tengan que entrar en un mantenimiento por fases. Para el problema propuesto de forma aleatoria, se obtiene lo siguiente:

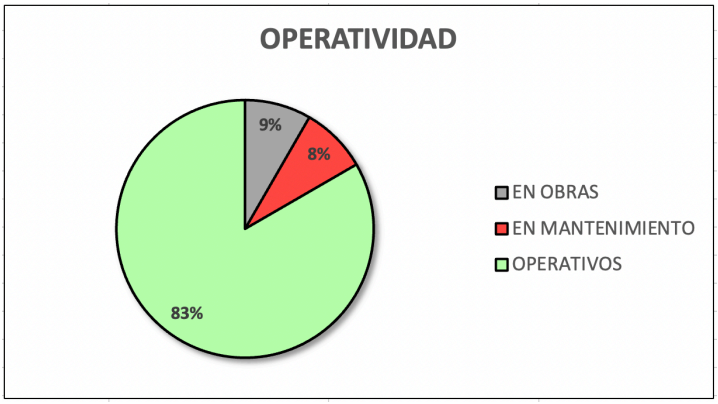


Figura 4-4 Operatividad de la Décima Escuadrilla (Fuente: Elaboración propia)

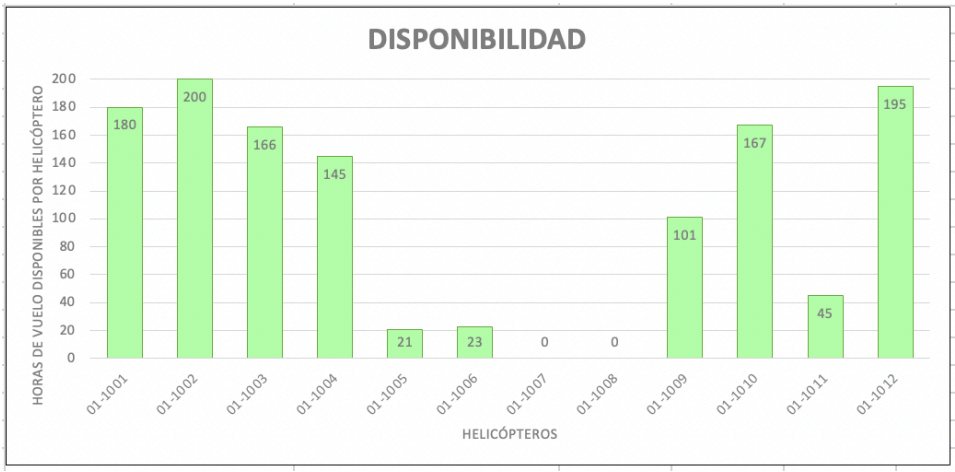


Figura 4-5 Disponibilidad de la Décima Escuadrilla (Fuente: Elaboración propia)

4.1.2 Hoja 'FUNCIÓN OBJETIVO'

Esta hoja servirá para que, automáticamente, se obtenga la asignación de helicópteros a cada misión, en el horizonte de 24 semanas. Por otra parte también se da la información de la cantidad de helicópteros que están operativos en la Base Naval de Rota, siendo un dato importante por si sucediera cualquier emergencia o ejercicio de forma inesperada, poder responder con rapidez.

Para conseguir lo anterior, se levantó una tabla [Matriz 4-2] con los valores de las horas de vuelo acumuladas de los helicópteros por semanas (variable y_{ht} del apartado 3.1). En las filas se muestran los periodos semanales *S#* y en las columnas las aeronaves de la Décima Escuadrilla *H#*. Se ha insertado una semana *S0* inicial en la cual se actualizaría la información de las horas de vuelo que lleva realizadas cada unidad de la escuadrilla. Estas fueron introducidas manualmente en la hoja anterior.

	HORAS DE VUELO DE LOS HELICÓPTEROS POR SEMANAS											
	SEMANAS	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
	S0	20	0	34	55	179	177	200	I	99	33	155	5
MES 1	S1	50	30	64	85	209	207	0	0	129	63	185	35
	S2	80	60	94	115	0	0	0	0	159	93	215	65
	S3	110	90	124	145	0	0	0	0	189	123	0	95
	S4	140	120	154	175	0	0	30	0	219	153	0	125
MES 2	S5	170	150	184	205	30	30	60	0	0	183	0	155
	S6	200	180	214	0	60	60	90	0	0	213	30	185
	S7	0	210	0	0	90	90	120	0	0	0	60	215
	S8	0	0	0	0	120	120	150	0	30	0	90	0
MES 3	S9	0	0	0	30	150	150	180	0	60	0	120	0
	S10	30	0	30	60	180	180	210	0	90	30	150	0
	S11	60	30	60	90	210	210	0	0	120	60	180	30
	S12	90	60	90	120	0	0	0	0	150	90	210	60
MES 4	S13	120	90	120	150	0	0	0	0	180	120	0	90
	S14	150	120	150	180	0	0	30	0	210	150	0	120
	S15	180	150	180	210	30	30	60	0	0	180	0	150
	S16	210	180	210	0	60	60	90	0	0	210	30	180
MES 5	S17	0	210	0	0	90	90	120	0	0	0	60	210
	S18	0	0	0	0	120	120	150	0	30	0	90	0
	S19	0	0	0	30	150	150	180	0	60	0	120	0
	S20	30	0	30	60	180	180	210	0	90	30	150	0
MES 6	S21	60	30	60	90	210	210	0	0	120	60	180	30
	S22	90	60	90	120	0	0	0	0	150	90	210	60
	S23	120	90	120	150	0	0	0	0	180	120	0	90
	S24	150	120	150	180	0	0	30	0	210	150	0	120

Matriz 4-2 Horas de vuelo de los helicópteros por semanas (Fuente: Elaboración propia)

Para extraer los datos de la tabla anterior [Figura 4-6], se ha utilizado la función condicional 'SI', utilizada anteriormente. Dentro de esta función, se introduce la función lógica 'Y' que, comprueba si todos los argumentos son 'verdaderos', y devuelve 'verdadero' si todos los argumentos son 'verdaderos'.

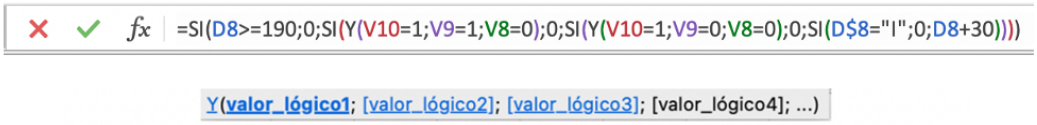


Figura 4-6 Fórmulas utilizadas para la Matriz 4-2 (Fuente: Elaboración propia)

Básicamente, lo que se hace en cada celda es mostrar un resultado que sume 30 horas de vuelo (dato *D* del apartado 3.1) a las horas de vuelo de la semana anterior. No obstante, también hay que considerar los períodos de mantenimiento (donde se tienen en cuenta la restricciones número (6) y (7) del apartado 3.1), para ello, se adjunta una segunda tabla [Matriz 4-3] que organiza esta información. Para considerar el factor mantenimiento, teniendo en cuenta que la duración es de tres semanas (dato C_h del apartado 3.1), se comprueban las tres semanas anteriores en la tabla que se muestra a continuación. Es decir, en la función [Figura 4-6] se hace referencia a las celdas de la tabla de mantenimiento. Por ejemplo, si las tres semanas anteriores se ha realizado mantenimiento, la función aplicada resetearía las horas de vuelo y la aeronave pasaría a estar operativa. En el caso de solo haber realizado dos periodos de mantenimiento, la función fuerza a que la aeronave permanezca una semana más en la inspección. Una peculiaridad de la siguiente tabla, es el espacio introducido en la fila a continuación de la fila *H#*. Este espacio es esencial para que en la primera celda de la [Matriz 4-2] se pueda seguir teniendo en cuenta las tres teóricas semanas previas de mantenimiento o no, siendo en este caso '*0*' y por lo tanto, estado operativo. Así, se permite que se unifiquen todas las funciones en una, pudiéndose arrastrar a lo largo de toda la matriz, evitando posibles fallos.

En la Matriz 4-3 se puede contemplar, que los mantenimientos duran tres periodos semanales. Exceptuando aquellas aeronaves que están en las obras GAS FLOAN, que duran un año. El valor '*1*', significa que la aeronave se encuentra en mantenimiento. Esto funciona por la función utilizada [Figura 4-7]. Si una aeronave alcanza el límite de horas de vuelo permitido antes de recibir mantenimiento, es decir, las 200 horas de vuelo, o si sus horas de vuelo son cero, significa que está en mantenimiento, y por lo tanto adquiere valor '*1*'.

	HELICÓPTEROS EN MANTENIMIENTO												
	SEMANAS	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	Σ
	S0													
MES 1	S1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
	S2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	4
	S3	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	5
	S4	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	4
MES 2	S5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	3
	S6	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	3
	S7	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	6
	S8	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	7
MES 3	S9	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	6
	S10	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	3
	S11	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
	S12	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	4
MES 4	S13	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	5
	S14	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	4
	S15	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	3
	S16	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	3
MES 5	S17	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	6
	S18	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	7
	S19	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	6
	S20	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	3
MES 6	S21	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
	S22	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	4
	S23	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	5
	S24	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	4

Matriz 4-3 Helicópteros en mantenimiento (Fuente: Elaboración propia)

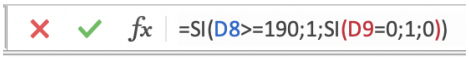


Figura 4-7 Función utilizada en la Matriz 4-3 (Fuente: Elaboración propia)

Se puede observar, pese a que el límite de horas de vuelo permitido es de 200 horas, que se ha introducido el valor de 190 horas de vuelo [Figura 4-7]. Esto se debe a la flexibilidad permitida que se da a cada aeronave. El margen, comentado a lo largo del desarrollo, es un 10% de las horas de vuelo por encima y por debajo. Es decir, se permite que el helicóptero realice 180 horas de vuelo (-10% de 200 horas), o que realice hasta 220 horas de vuelo (+10% de 200 horas) y entre en mantenimiento. Esto se consigue en la fórmula con el *'>=190'* y sumando a cada celda, las 30 horas de vuelo semanales. Esta limitación hace referencia a la restricción número (9) del apartado 3.1.

Una tabla imprescindible para este programa es la de los helicópteros requeridos en una misión (dato n_t del apartado 3.1), según la demanda del Comandante del Mando de Operaciones (CMOPS) para la participación de los buques de la Armada. En la Matriz 4-4 se muestra una matriz modificable por el usuario, según las misiones que tengan lugar y sean asignadas a la Décima Escuadrilla. En las filas se seguirán mostrando las semanas *S#*, y en las columnas, las misiones *B#*. Pese a que en la hoja 'BUQUES DE LA ARMADA' se muestran más unidades que misiones *B#* posibles, se ha considerado solo introducir nueve posibles misiones distintas. En ningún momento, siendo realistas, se asignan más de nueve misiones a la Décima Escuadrilla en un horizonte de seis semanas. De hecho, lo normal es que no se llegue ni a cinco misiones. Pero se ha propuesto mantener las nueve, debido a que no solo hay que considerar las misiones importantes a nivel internacional, sino también, aquellos ejercicios o maniobras en los que un helicóptero SH-60B va embarcado. Otro motivo es, que la FLOAN dispone de más escuadrillas con helicópteros, que pueden coordinarse con la Décima para ser desplegados, y por lo tanto tener más helicópteros operativos en la Base Naval de Rota. En la Matriz 4-4, el usuario debe introducir '1' (dato F_u del apartado 3.1) cuando se necesite una aeronave para una misión. A su vez, el helicóptero debe permanecer en esa ubicación hasta que finalice la permanencia del buque en que se embarca, en la misión (dato m_{hu} y restricciones número (1) y (9) del apartado 3.1).

		HELICÓPTEROS REQUERIDOS EN CADA UNIDAD									Σ
	SEMANAS	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	
MES 1	S1	1									1
	S2	1			1						2
	S3	1			1						2
	S4	1	1		1			1			4
MES 2	S5	1	1		1			1			4
	S6		1					1	1		3
	S7							1	1		2
	S8			1				1	1	1	4
MES 3	S9			1				1	1	1	4
	S10			1				1	1	1	4
	S11			1					1		2
	S12			1							1
MES 4	S13			1		1					2
	S14					1					1
	S15					1					1
	S16					1					1
MES 5	S17					1					1
	S18					1					1
	S19					1					1
	S20					1					1
MES 6	S21										0
	S22						1				1
	S23						1				1
	S24						1				1

Matriz 4-4 Helicópteros requeridos para cada misión (Fuente: Elaboración propia)

Para poder continuar, hay que desarrollar las hojas 'MISIONES' y 'MANTENIMIENTO' que se explica en el siguiente apartado. De ellas se extraen los datos para las matrices o tablas que se muestran a continuación. Cada celda de la Matriz 4-5, es el sumatorio de horas de vuelo acumuladas por helicóptero desplegado en una misión B#. De tal modo, se crearon nueve tablas auxiliares por cada misión en la hoja 'MISIONES'. Lo mismo ocurre con la Matriz 4-6, se han creado nueve tablas auxiliares por cada misión para ver cuántas veces un helicóptero desplegado entra en mantenimiento. Ambas tablas reflejan en sus filas las misiones B# y en sus columnas, cada helicóptero H#. En cada celda de estas tablas, se hace referencia a los sumatorios de sus correspondientes tablas de una hoja u otra, por helicóptero y por misión.

	MISIONES											
	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
B1	550	450	620	725	239	237	90	0	696	615	400	475
B2	510	450	552	380	90	90	180	0	219	549	30	465
B3	300	180	300	450	660	660	540	0	630	300	750	180
B4	500	420	556	640	30	30	90	0	567	552	215	440
B5	690	750	690	630	630	630	840	0	570	690	450	750
B6	270	180	270	360	210	210	0	0	450	270	390	180
B7	540	660	582	470	630	630	840	0	399	579	450	680
B8	290	420	304	180	810	810	750	0	300	303	630	430
B9	30	0	30	90	450	450	540	0	180	30	360	0

Matriz 4-5 Misiones (Fuente: Elaboración propia)

	MANTENIMIENTO											
	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
B1	0	0	0	1	3	3	3	6	2	0	3	0
B2	0	0	0	0	2	2	1	3	1	0	2	0
B3	2	3	2	1	2	2	3	6	0	2	1	3
B4	0	0	0	0	3	3	2	4	1	0	3	0
B5	3	3	3	3	2	2	1	8	3	3	3	3
B6	0	0	0	0	2	2	3	3	0	0	1	0
B7	3	3	3	3	1	1	0	7	3	3	2	3
B8	3	3	3	3	0	0	1	6	2	3	0	3
B9	2	3	2	1	0	0	0	3	0	2	0	3

Matriz 4-6 Mantenimiento (Fuente: Elaboración propia)

Es el momento de introducir la matriz que va a ser modificada por Solver. La Matriz 4-7 es la variable en la cual se obtiene y se decide de forma automática e instantánea, qué helicóptero debe ser desplegado en una misión. Es una tabla binaria, es decir devolverá un '1' en el caso de que la aeronave se despliegue a la misión, '0' si lo contrario. Con sus correspondientes sumatorios de cada fila y cada columna, se conseguirá acotar la solución óptima del problema. Los sumatorios de esta tabla, como se indicará más adelante, forman parte de las restricciones del problema. Si hay nueve misiones, la última columna, el sumatorio, siempre valdrá 1, pues todas las misiones deben de ser asignadas a un helicóptero. Por otra parte, el sumatorio de las filas será siempre menor o igual a uno, pues no asignaremos más de una misión a un helicóptero en el horizonte de seis meses.

	ASIGNACIÓN DE HELIÓPTEROS												
	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	Σ
B1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
B2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
B3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
B4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
B5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
B6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
B7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
B8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
B9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Σ	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	

Matriz 4-7 Asignación de helicópteros (Fuente: Elaboración propia)

Con toda la información anterior, se diseña la Matriz 4-8 en función de la Matriz 4-6 y la Matriz 4-7. En ella se informa, una vez se han introducido los datos en el cuadro diálogo de Solver y se haya ejecutado el programa, aquellos helicópteros que reciben mantenimiento estando desplegados (variable b_{htu} y restricción número (1) del apartado 3.1). Es decir, el número '*2*' que se observa en la celda '*H5B5*' es la optimización del problema. La función que se ha designado en la primera celda, para luego desplazarse a lo largo de toda la tabla es simplemente, una multiplicación. Se multiplica la primera celda de la Matriz 4-6 por la primera celda de la Matriz 4-7, y así, se continuaría con el resto.

	MANTENIMIENTOS REALES											
	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
B1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B5	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
B6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Matriz 4-8 Mantenimientos reales (Fuente: Elaboración propia)

Para completar el programa, se introducen dos tablas nuevas más. La primera, la Matriz 4-9, sirve para contabilizar aquellos helicópteros que han sido asignados a la misión (variable a_{htu} del apartado 3.1) por Solver y, por lo tanto, muestran sus periodos de operatividad a bordo de un buque de la Armada Española. Para su obtención, cada celda es igual a la multiplicación de cada celda de la columna de la Matriz 4-7 por cada celda de la fila de la Matriz 4-5 como se muestra en la Figura 4-8.

	HELICÓPTEROS DESPLEGADOS													
	SEMANAS	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	Σ
	S0													
MES 1	S1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	S2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	S3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	S4	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	4
MES 2	S5	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	4
	S6	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	3
	S7	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2
	S8	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	4
MES 3	S9	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	4
	S10	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	4
	S11	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2
	S12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
MES 4	S13	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	2
	S14	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	S15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	S16	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
MES 5	S17	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	S18	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	S19	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	S20	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
MES 6	S21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	S23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	S24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

Matriz 4-9 Helicópteros desplegados (Fuente: Elaboración propia)

```
=D$86*$V44+D$87*$W44+ D$88*$X44+D$89*$Y44+D$90*$Z44+D$91*$AA44+D$92*$AB44+D$93*$AC44+D$94*$AD44
```

Figura 4-8 Función utilizada para la Matriz 4-9 (Fuente: Elaboración propia)

La tabla que se muestra a continuación [Figura 4-10], indica qué aeronaves se encuentran en la Base Naval de Rota y además, cuáles de ellas están operativas. La función utilizada consiste en multiplicar la Matriz 4-3 por la Matriz 4-9. Para que devuelva un '1' y se pueda contabilizar, es necesario que a uno se le reste cada celda, quedando la función como en la Figura 4-9. Esta tabla es importante para la resolución del problema pues el sumatorio, es decir, el número de helicópteros que deben estar operativos siempre será al menos uno, por lo que toma la actitud de restricción. Como se puede observar, funciona, no hay ninguna semana sin un helicóptero operativo en la base. Este argumento es esencial, pues puede requerirse de una aeronave ante un imprevisto o emergencia.

	HELICÓPTEROS OPERATIVOS EN LA BASE NAVAL DE ROTA													
	SEMANAS	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	Σ
	S0													
MES 1	S1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	9
	S2	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	6
	S3	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	5
	S4	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	4
MES 2	S5	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	5
	S6	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	6
	S7	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4
	S8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
MES 3	S9	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
	S10	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	5
	S11	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	8
	S12	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	7
MES 4	S13	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	6
	S14	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	8
	S15	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	8
	S16	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	8
MES 5	S17	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	5
	S18	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	4
	S19	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	5
	S20	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	8
MES 6	S21	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	10
	S22	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	7
	S23	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	6
	S24	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	7

Matriz 4-10 Helicópteros operativos en la Base Naval de Rota (Fuente: Elaboración propia)

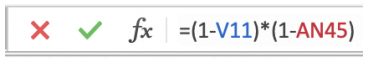


Figura 4-9 Función utilizada para la Matriz 4-10 (Fuente: Elaboración propia)

Por último, se crean dos tablas más para incluir las fases 'A', 'B', 'C' y 'D' de mantenimiento. En la Matriz 4-11, para saber en qué fase de mantenimiento se está, hay que conocer cuál fue la última. En la primera celda se ha aplicado la fórmula de la Figura 4-10, en la que se hace uso de la función condicional SI. Como se puede observar en la tabla de mantenimiento [Matriz 4-3], al forzar a la aeronave a realizar cada semana 30 horas de vuelo, cada siete periodos semanales se realiza un mantenimiento. Por ello, se ha incorporado en la tabla que se muestra a continuación siete celdas a continuación de 'S0' de las que se coge referencia. Cabe decir, que la tabla utiliza los datos sobre las fases introducidas en la única Matriz 4-1 de la hoja 'DATOS'. Se puede observar que el helicóptero H8 al estar en obras GAS FLOAN se ha marcado con un número '5' durante todo el horizonte de planificación. El número '1' de color rojo corresponde a la fase A, el '2' de color amarillo corresponde a la fase B, el '3' de color azul corresponde a la fase C y el '4' de color verde corresponde a la fase D.

FASES DE MANTENIMIENTO DE LOS HELICÓPTEROS POR SEMANAS													
	SEMANAS	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
	S0	2	4	2	1	3	3	2	5	4	2	2	4
		2	4	2	1	3	3	2	5	4	2	2	4
		2	4	2	1	3	3	2	5	4	2	2	4
		2	4	2	1	3	3	2	5	4	2	2	4
		2	4	2	1	3	3	2	5	4	2	2	4
		2	4	2	1	3	3	2	5	4	2	2	4
		2	4	2	1	3	3	2	5	4	2	2	4
MES 1	S1							3	5				
	S2					4	4	3	5				
	S3					4	4	3	5			3	
	S4					4	4		5			3	
MES 2	S5								5	1		3	
	S6				2				5	1			
	S7	3		3	2				5	1	3		
	S8	3	1	3	2				5		3		1
MES 3	S9	3	1	3					5		3		1
	S10		1						5				1
	S11							4	5				
	S12					1	1	4	5				
MES 4	S13					1	1	4	5			4	
	S14					1	1		5			4	
	S15								5	2		4	
	S16				3				5	2			
MES 5	S17	4		4	3				5	2	4		
	S18	4	2	4	3				5		4		2
	S19	4	2	4					5		4		2
	S20		2						5				2
MES 6	S21							1	5				
	S22					2	2	1	5				
	S23					2	2	1	5			1	
	S24					2	2		5			1	

Matriz 4-11 Fases de mantenimiento de los helicópteros por semanas (Fuente: Elaboración propia)



Figura 4-10 Función utilizada para la Matriz 4-11 (Fuente: Elaboración propia)

La Matriz 4-12 se obtiene de la tabla anterior [Matriz 4-11], dando la información de las fases de mantenimiento que realiza cada helicóptero en todo momento. Simplemente se han cambiado los números por las letras de las fases utilizando la función condicional SI.

		FASES DE MANTENIMIENTO											
	SEMANAS	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
	S0												
MES 1	S1							C					
	S2					D	D	C					
	S3					D	D	C				C	
	S4					D	D					C	
MES 2	S5									A		C	
	S6				B					A			
	S7	C		C	B					A	C		
	S8	C	A	C	B						C		A
MES 3	S9	C	A	C							C		A
	S10		A										A
	S11							D					
	S12					A	A	D					
MES 4	S13					A	A	D				D	
	S14					A	A					D	
	S15									B		D	
	S16				C					B			
MES 5	S17	D		D	C					B	D		
	S18	D	B	D	C						D		B
	S19	D	B	D							D		B
	S20		B										B
MES 6	S21							A					
	S22					B	B	A					
	S23					B	B	A				A	
	S24					B	B					A	

Matriz 4-12 Fases de mantenimiento (Fuente: Elaboración propia)

4.1.3 Hojas 'MISIONES' y 'MANTENIMIENTO'

Estas hojas servirán para obtener información de cada misión y extraerla a las matrices explicadas de la hoja 'FUNCIÓN OBJETIVO'. La Matriz 4-13 es una de las nueve matrices que se han creado en la hoja 'MISIONES', una por cada posible misión. Se ha creado [Figura 4-11] multiplicando, las celdas de la matriz de las horas de vuelo de los helicópteros [Matriz 4-2] por la matriz de los mantenimientos [Matriz 4-3]. El sumatorio que se muestra en la última fila, son aquellas celdas a las que se hace referencia en la matriz de misiones [Matriz 4-5].

		HORAS DE VUELO EN MISIÓN B1											
	SEMANAS	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
	S0												
MES 1	S1	50	30	64	85	209	207	0	0	129	63	185	35
	S2	80	60	94	115	0	0	0	0	159	93	215	65
	S3	110	90	124	145	0	0	0	0	189	123	0	95
	S4	140	120	154	175	0	0	30	0	219	153	0	125
MES 2	S5	170	150	184	205	30	30	60	0	0	183	0	155
	S6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MES 3	S9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MES 4	S13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MES 5	S17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MES 6	S21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ	TOTAL	550	450	620	725	239	237	90	0	696	615	400	475

Matriz 4-13 Horas de vuelo en una misión (Fuente: Elaboración propia)



Figura 4-11 Función para la Matriz 4-13(Fuente: Elaboración propia)

Se ha incorporado encima de cada una de las nueve matrices, una lista en la cual manualmente se escoge el buque de la Armada que realiza la misión, y en la cual va a ir desplegada la aeronave [Figura 4-12]. Se muestra a continuación.

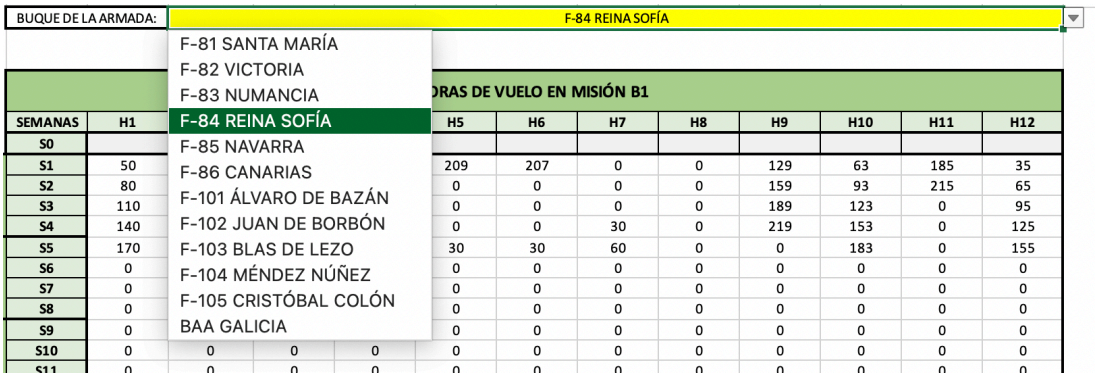


Figura 4-12 Lista de buques de la Armada en el programa (Fuente: Elaboración propia)

Por último, se obtienen las nueve matrices de la hoja 'MANTENIMIENTO', que a diferencia de las anteriores, no solo aportan información, sino que, son esenciales para la resolución del problema, como se comentó en el apartado anterior. Para conseguir la Matriz 4-14, se ha realizado lo mismo que con las de 'MISIONES', pero multiplicando, en este caso, la matriz de helicópteros en mantenimiento [Matriz 4-3] por la matriz de helicópteros requeridos para las misiones [Matriz 4-4].

BUQUE DE LA ARMADA: F-84 REINA SOFÍA

MANTENIMIENTO SI ESTÁ DESPLEGADO EN B1

	SEMANAS	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
	S0												
MES 1	S1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	S2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
	S3	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0
	S4	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0
MES 2	S5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
	S6	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
	S7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MES 3	S9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MES 4	S13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MES 5	S17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MES 6	S21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	TOTAL	0	0	0	1	3	3	3	6	2	0	3	0

Matriz 4-14 Mantenimiento de un helicóptero desplegado en una misión (Fuente: Elaboración propia)

Al seguir todo el procedimiento de construcción del programa, se observa que se ha mantenido el código de colores, para facilitar su compresión.

4.1.4 Solución con Solver

Para resolver el problema, se abre el cuadro diálogo de Solver y se introducen los siguientes parámetros, que se explican y detallan a continuación [Figura 4-13] por pasos:

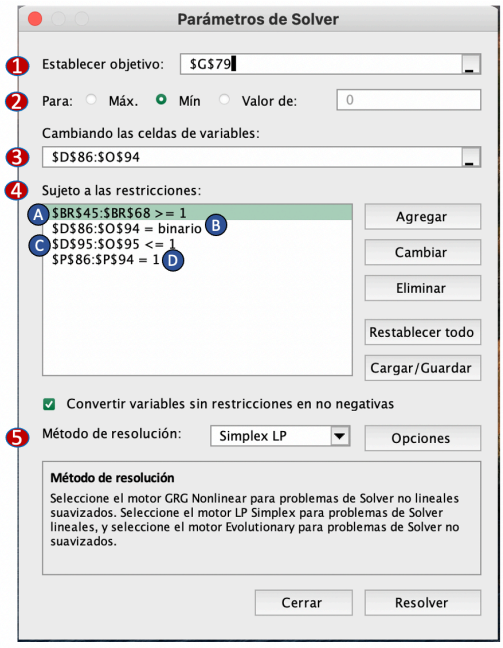


Figura 4-13 Cuadro diálogo de Solver, para la resolución del problema (Fuente: Elaboración propia)

1. Establecer una función objetivo. En este apartado se introduce lo que se quiere optimizar. En el programa será el sumatorio de los valores de la tabla mantenimientos reales [Matriz 4-7]
2. El tipo de optimización que se quiere realizar es minimizar (*Mín*), pues queremos que haya el mínimo número de mantenimientos posibles.
3. Las celdas variables seleccionables son las adyacentes en la matriz de asignación de helicópteros [Matriz 4-6]. Es decir, Solver modificará estas celdas para obtener la optimización.
4. El programa va sujeto a una serie de restricciones como se comentó en la formulación del problema. A continuación se muestra la hoja 'FUNCIÓN OBJETIVO' [Figura 4-14] donde se indican a través de letras en orden alfabético, las restricciones.

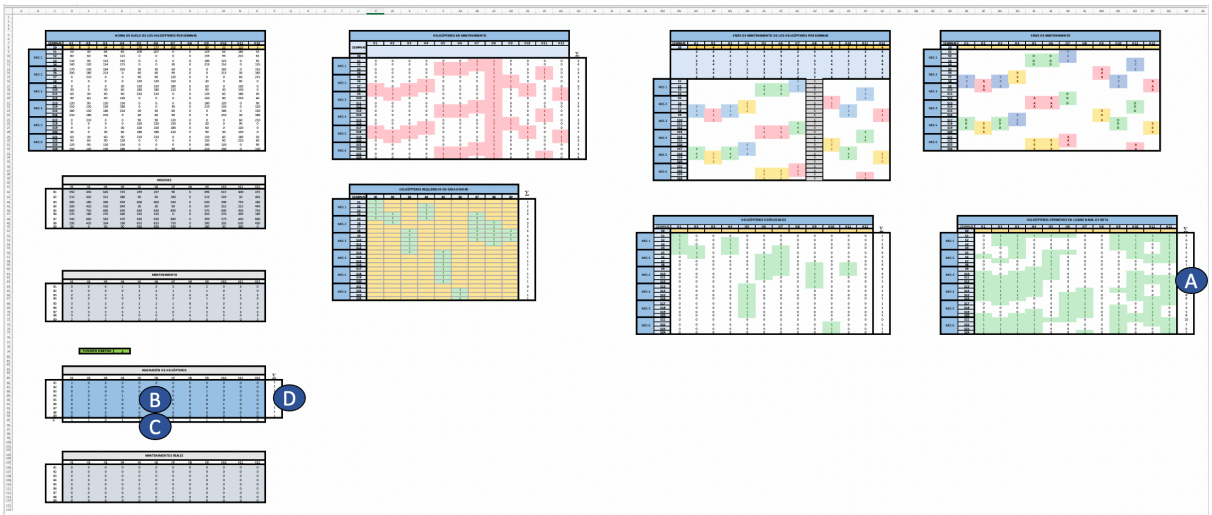


Figura 4-14 Restricciones en la hoja 'FUNCIÓN OBJETIVO' (Fuente: Elaboración propia)

Las restricciones son:

A. Esta restricción [Figura 4-15] obliga a que como mínimo debe haber una aeronave en la base y que esté operativa. Esta imposición hace referencia a la restricción número (2) introducida en el apartado 3.1.

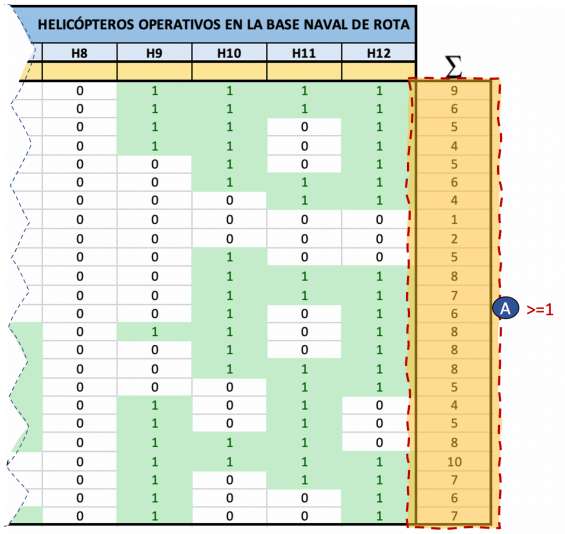


Figura 4-15 Restricción A del problema en la Matriz 4-10 (Fuente: Elaboración propia)

B. La restricción que impone que la matriz de asignación de helicópteros devuelva sólo en binario [Figura 4-16]. La implantación de este límite, coincide con la restricción número (12) introducida en el apartado 3.1.
C. Restricción que obliga a que no haya un helicóptero asignado a más de una misión. Esta exigencia, hace referencia a la restricción número (4) introducida en el apartado 3.1.
D. Esta restricción establece que solo hay opción de un helicóptero por misión, debido a la capacidad de los buques. Esta limitación corresponde a la restricción número (3) introducida en el apartado 3.1.

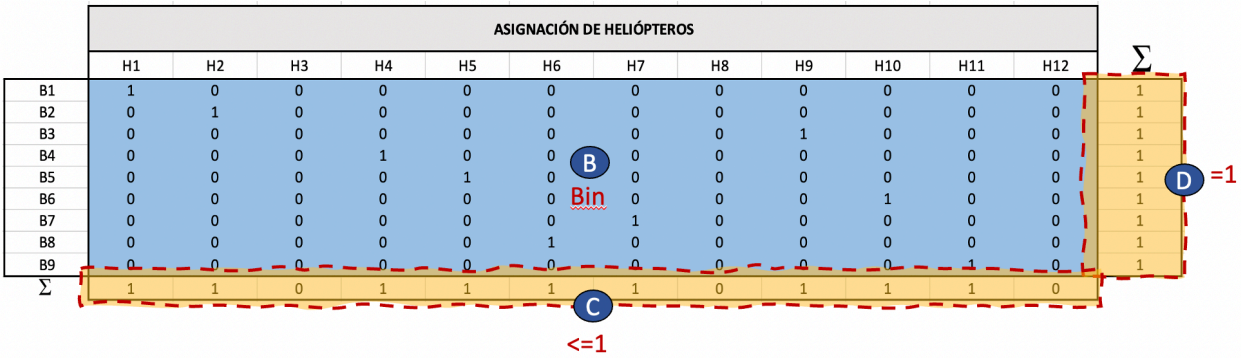


Figura 4-16 Restricciones B, C y D aplicada en la Matriz 4-7 (Fuente: Elaboración propia)

5. Método de resolución. Este último apartado selecciona el método de resolución. Se escoge Simplex LP pues es el más adecuado para resolver problemas lineales y enteros con límites en las variables. Algunos de los problemas que se han presentado en la ejecución del programa era que las restricciones no cumplían con la linealidad. Por lo que se han realizado las matrices sujetas a restricciones sin funciones del tipo condicionales cómo 'SI', 'CONTAR.SI'.

Tras la resolución del problema, se ha podido comprobar que a cada misión se le ha asignado un SH-60B para realizar una misión, teniendo en cuenta la optimización de los mantenimientos de cada uno de ellos. Se ha hecho referencia a todos los datos, variables y restricciones utilizadas en el apartado 3.1, exceptuando aquellos que se corresponden con la asignación de un único mantenimiento de una aeronave por semana y por ubicación.

4.2 Escenario operativo

A continuación se expone un posible escenario al que se podría enfrentar la Décima Escuadrilla. No llega a ser totalmente realista y reflejo de la actualidad, pues no se permite dar difusión libre de la información operativa de las aeronaves. Por este motivo, se ha trabajado con datos deducidos que tienen sentido, teniendo en cuenta las capacidades de mantenimiento de la escuadrilla. Los datos se muestran en Figura 4-17:

AERONAVE	HORAS DE VUELO	SITUACIÓN	FASE ANTERIOR
01-1001	195	OPERATIVO	B
01-1002	168	OPERATIVO	C
01-1003	200	MANTENIMIENTO C	B
01-1004	33	OPERATIVO	D
01-1005	-	OBRAS GAS FLOAN	C
01-1006	112	OPERATIVO	C
01-1007	12	OPERATIVO	D
01-1008	-	OBRAS GAS FLOAN	C
01-1009	75	OPERATIVO	A
01-1010	184	OPERATIVO	A
01-1011	-	OBRAS GAS FLOAN	C
01-1012	-	OBRAS GAS FLOAN	D

Figura 4-17 Datos de un posible escenario (Fuente: Elaboración propia)

Para este escenario se ha tenido en cuenta la previsión de despliegue en misiones, a bordo de los buques de la Armada [Figura 2-24], que se comentó en el apartado 2.4.1. Teniendo solo en el frente las maniobras SNMG-2, en la programación solo será necesario asignar a dos helicópteros para que cumplan los cometidos. Esto es debido a que se va a considerar una misión inicial, que está actualmente en curso, y una segunda misión, que realmente es la misma que la anterior, las maniobras SNMG-2, pero se relevan los barcos y por lo tanto, también las ubicaciones. Todo ello, en el horizonte escogido de los seis períodos mensuales. Al introducir la información en la Matriz 4-1 de la hoja 'DATOS' obtenemos de forma visual el grado de operatividad de la escuadrilla [Figura 4-18] y la disponibilidad de sus unidades [Figura 4-19]:

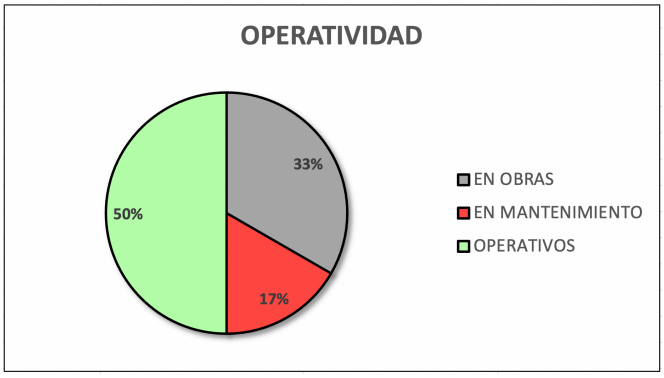


Figura 4-18 Operatividad para escenario propuesto (Fuente: Elaboración propia)

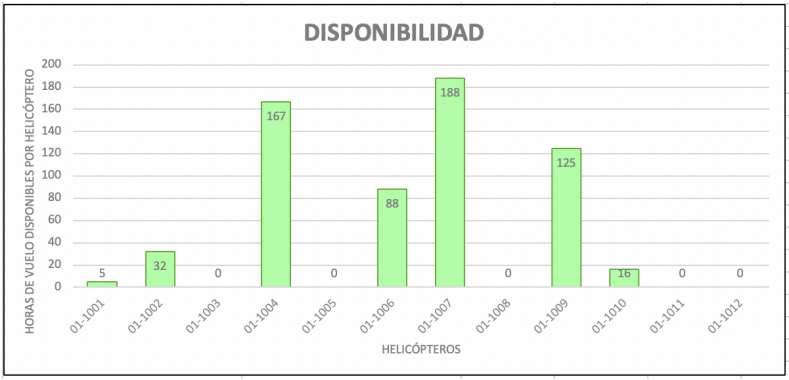


Figura 4-19 Disponibilidad helicópteros para el escenario propuesto (Fuente: Elaboración propia)

Con solo la información recogida en los gráficos y, teniendo en consideración que solo hará falta asignar a dos helicópteros en el horizonte de planificación, se deduce que es muy probable que se asigne la primera misión que tiene lugar, a uno de estos dos helicópteros: '01-1004' y '01-1007'. Para la siguiente misión, que es realmente el relevo de la anterior, y que comienza a principios de abril, se tendrá que tener en cuenta las horas de vuelo y los mantenimientos del periodo semanal en que se inicie. En la Figura 4-19, se pueden percibir aquellos helicópteros en mantenimiento o en obras GAS FLOAN, que disponen de cero horas de vuelo y por lo tanto no se encuentran disponibles durante, al menos, la primera semana.

Una vez se ha rellenado la primera hoja del programa, obtenemos la Matriz 4-15. En ella se puede observar, una vez más, que aquellas aeronaves en obras no acumulan horas de vuelo y permanecen inoperativas durante todo el horizonte de planificación. También se puede contrastar esta consideración en la Matriz 4-16, permaneciendo en constante mantenimiento.

	HORAS DE VUELO DE LOS HELICÓPTEROS POR SEMANAS												
	SEMANAS	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12
	S0	195	168	200	33	I	112	12	I	75	184	I	I
MES 1	S1	0	198	0	63	0	142	42	0	105	214	0	0
	S2	0	0	0	93	0	172	72	0	135	0	0	0
	S3	0	0	0	123	0	202	102	0	165	0	0	0
	S4	30	0	30	153	0	0	132	0	195	0	0	0
MES 2	S5	60	30	60	183	0	0	162	0	0	30	0	0
	S6	90	60	90	213	0	0	192	0	0	60	0	0
	S7	120	90	120	0	0	30	0	0	0	90	0	0
	S8	150	120	150	0	0	60	0	0	30	120	0	0
MES 3	S9	180	150	180	0	0	90	0	0	60	150	0	0
	S10	210	180	210	30	0	120	30	0	90	180	0	0
	S11	0	210	0	60	0	150	60	0	120	210	0	0
	S12	0	0	0	90	0	180	90	0	150	0	0	0
MES 4	S13	0	0	0	120	0	210	120	0	180	0	0	0
	S14	30	0	30	150	0	0	150	0	210	0	0	0
	S15	60	30	60	180	0	0	180	0	0	30	0	0
	S16	90	60	90	210	0	0	210	0	0	60	0	0
MES 5	S17	120	90	120	0	0	30	0	0	0	90	0	0
	S18	150	120	150	0	0	60	0	0	30	120	0	0
	S19	180	150	180	0	0	90	0	0	60	150	0	0
	S20	210	180	210	30	0	120	30	0	90	180	0	0
MES 6	S21	0	210	0	60	0	150	60	0	120	210	0	0
	S22	0	0	0	90	0	180	90	0	150	0	0	0
	S23	0	0	0	120	0	210	120	0	180	0	0	0
	S24	30	0	30	150	0	0	150	0	210	0	0	0

Matriz 4-15 Horas de vuelo para escenario propuesto (Fuente: Elaboración propia)

	HELICÓPTEROS EN MANTENIMIENTO													
	SEMANAS	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	Σ
	S0													
MES 1	S1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	6
	S2	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	8
	S3	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	8
	S4	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	7
MES 2	S5	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	6
	S6	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	6
	S7	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	7
	S8	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	6
MES 3	S9	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	6
	S10	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	4
	S11	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	6
	S12	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	8
MES 4	S13	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	8
	S14	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	7
	S15	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	6
	S16	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	6
MES 5	S17	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	7
	S18	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	6
	S19	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	6
	S20	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	4
MES 6	S21	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	6
	S22	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	8
	S23	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	8
	S24	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	7

Matriz 4-16 Mantenimiento en el escenario propuesto (Fuente: Elaboración propia)

Lo último que queda por completar manualmente es la tabla correspondiente a las misiones. Rellenando la Matriz 4-17, sabemos que al menos va a ser necesario un helicóptero por semana. Es probable que sean más, debido a que podría ocurrir cualquier emergencia o necesidad de desplegar una aeronave [Figura 4-20]. Gracias a este programa existe un control de aeronaves, y su programación, tanto de mantenimientos, como de asignación a los buques, permite poder actuar con rapidez en estos casos. Se vuelve la situación más sencilla conociendo qué unidades podrían ejercer estas tareas por semanas. Este programa, por lo tanto, es capaz de apoyar al mando de la unidad.

		HELICÓPTEROS REQUERIDOS EN CADA UNIDAD									Σ
	SEMANAS	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	
MES 1	S1	1									1
	S2	1									1
	S3	1									1
	S4	1									1
MES 2	S5	1									1
	S6		1								1
	S7		1								1
	S8		1								1
MES 3	S9		1								1
	S10		1								1
	S11		1								1
	S12		1								1
MES 4	S13		1								1
	S14		1								1
	S15		1								1
	S16		1								1
MES 5	S17		1								1
	S18										0
	S19										0
	S20										0
MES 6	S21										0
	S22										0
	S23										0
	S24										0

Matriz 4-17 Helicópteros requeridos para escenario propuesto (Fuente: Elaboración propia)



Figura 4-20 Centro de Buceo de la Armada (Fuente: Décima Escuadrilla)

Con todos los datos disponibles sobre el programa, se ejecuta. La decisión tomada por Solver nos indica que se ha asignado al helicóptero 01-1004 (H4) para la primera misión, yendo embarcado en la fragata F-105 Cristóbal Colón. Para la segunda misión se designa al helicóptero 01-1006 (H6) que embarcaría en la fragata F-104 Méndez Núñez. Visualmente, se puede contrastar esta decisión en el programa, exactamente en la Matriz 4-18. En ella, los '1' equivalen a que esos helicópteros van a ser desplegados para realizar la misión. En el programa, la función objetivo minimiza el número de semanas en las que los helicópteros que están desplegados entrarían en mantenimiento. Por lo tanto esta aplicación ha asignados a las dos misiones, aquellas aeronaves que estando embarcadas, tengan que dejar de estar operativas para realizar las fases de mantenimiento lo mínimo posible. Se asigna un H# a una B# teniendo en cuenta que este número de veces en misión sea el mínimo. Como se puede observar, aunque en el caso propuesto solo hay dos buques disponibles, no se repiten unidades por misión. Es más, estas unidades permanecen embarcadas en las operaciones hasta que finalizan su periodo operativo. Este programa consigue la permanencia de la Décima Escuadrilla en las maniobras SNMG-2.

	HELICÓPTEROS DESPLEGADOS													
	SEMANAS	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	Σ
	S0													
MES 1	S1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	S2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	S3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	S4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
MES 2	S5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	S6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	S7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	S8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
MES 3	S9	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	S10	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	S11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	S12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
MES 4	S13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	S14	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	S15	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	S16	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
MES 5	S17	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	S18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MES 6	S21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	S24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Matriz 4-18 Helicópteros desplegados para caso propuesto (Fuente: Elaboración propia)

Pese a que uno de los principales objetivos de la Décima Escuadrilla es cubrir todas las misiones que sean encomendadas, se da importancia a que por lo menos una aeronave esté operativa y libre de mantenimientos en la Base Naval de Rota. Para este escenario, las aeronaves que cumplen estas dos condiciones se pueden ver en la Matriz 4-19 a lo largo de los 24 periodos semanales.

	HELICÓPTEROS OPERATIVOS EN LA BASE NAVAL DE ROTA													
	SEMANAS	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	Σ
	S0													
MES 1	S1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	5
	S2	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	3
	S3	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	3
	S4	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	4
MES 2	S5	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	5
	S6	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	6
	S7	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4
	S8	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	5
MES 3	S9	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	5
	S10	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	7
	S11	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	5
	S12	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	3
MES 4	S13	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	3
	S14	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	5
	S15	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	6
	S16	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	6
MES 5	S17	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4
	S18	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	6
	S19	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	6
	S20	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	8
MES 6	S21	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	6
	S22	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	4
	S23	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	4
	S24	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	5

Matriz 4-19 Helicópteros operativos en Rota según escenario propuesto (Fuente: Elaboración propia)

Aunque no se haya expuesto un escenario que planifique la escuadrilla de forma totalmente realista, se ha comprobado que el programa funciona. Es más, con solo introducir tres tipos de datos

fáciles de obtener, se ha logrado colocar con antelación a dos unidades en dos misiones. Todo ello, sin perjudicar los mantenimientos preventivos que sin excepción deben realizar frecuentemente, de acuerdo con las horas de vuelo realizadas.

Teniendo el control de los mantenimientos, el personal, sobre todo los pilotos y su dotación, pueden centrarse más en preparar una misión [Figura 4-21]. Esta programación recoge una gran cantidad de datos de manera que reduce la carga de trabajo, que puede ocasionar la designación de helicópteros para ocupar una misión. Además, lo hace de forma fiable y eficaz, aportando confianza y comodidad a los pilotos a la hora de realizar un vuelo. Disponer de herramientas, como este programa, aumenta la operatividad de la Armada.



Figura 4-21 Vuelo del SH-60B en formación con la Australian Navy en las aguas del Golfo de Adén (2019) (Fuente: Décima Escuadrilla)

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusión

Tras la realización de un programa que planifica el mantenimiento preventivo de la Décima Escuadrilla de la Armada Española, según las horas de vuelo y el estado operativo, se puede concluir que la automatización es esencial. En primer lugar, aporta que una unidad sea fiable, ya que se realizan mantenimientos específicos cada número exacto de horas de vuelo, comprobando, por personal altamente cualificado, que todo funciona de forma correcta. A corto plazo, se reducen los riesgos cuando una aeronave está asignada a una misión, pero a largo plazo, se maximiza la vida útil de esta unidad. Evitar situaciones peligrosas es el principal propósito, pero con esta programación, se consigue que los doce helicópteros puedan desempeñar sus funciones operativas, de forma organizada y eficaz, cumpliendo todos los objetivos a demanda de España.

La programación de la escuadrilla se ha llevado a cabo con el programa Excel, una herramienta que ha sido sencilla de utilizar y que representa el problema estudiado, de forma muy visual. Con este software ha sido posible hacer que todos los factores que engloban al mantenimiento y operatividad de una aeronave se tengan en consideración desde las características concretas de cada aeronave, hasta las posibles ubicaciones en las que puede ser desplegado. Sin embargo, lo más importante a lo largo del proyecto, ha sido hacer partícipe a la variable tiempo, en sus dos modalidades: horas de vuelo y semanas de planificación. Esta cantidad de información no hubiera sido sencilla de manejar, sin el uso de las matemáticas y un ordenador. Todos los datos obtenidos a través del estudio, se han transformado en variables y restricciones, que combinándolas, dieron con la optimización de la escuadrilla. Las matemáticas de hoy, son la tecnología del mañana. Todos los cálculos del proyecto, han conseguido alcanzar una serie de ventajas, como la mejora del rendimiento de nuestras unidades, el facilitar el trabajo del personal de mantenimiento y económicamente, reducir costes. Siempre es más económico prevenir, que reparar.

El objetivo inicial del proyecto era resolver el problema de optimizar la distribución temporal del mantenimiento de los helicópteros de la Décima Escuadrilla. Una vez se ha obtenido toda la información relacionada con esta unidad de la Armada y su correspondiente mantenimiento, había que delimitar el problema según las peculiaridades y requisitos que afectan al planteamiento. Asentando los conceptos de Investigación Operativa y de Programación Lineal al problema, se realizó un problema que pudo implementarse en Excel, configurando una aplicación que permitiera la automatización del problema ante cualquier escenario. Por lo tanto, como se puede apreciar en el apartado de resultados, se han alcanzado todos los objetivos. Es más, se aporta información respecto a las misiones y las horas de vuelo que se acumulan. Se consigue repartir y asignar las doce unidades

de manera que se disminuya al mínimo los mantenimientos y, permita participar en las misiones que se les ha encomendado.

5.2 Líneas futuras

La toma de decisiones permite que un problema o situación que se presente sea valorado y considerado, para poder elegir la solución más viable, de entre todas las posibles alternativas. No deja de ser un proceso que constantemente se va actualizando, pues nunca se deja de tomar decisiones. Tras realizar este trabajo, queda demostrado que tenemos herramientas para que, decisiones muy complejas, puedan resultar sencillas. Disponiendo de los mecanismos adecuados, se pueden automatizar una gran cantidad de procesos, como lo ha sido en este caso, descartando de manera rápida y eficaz, aquellas soluciones que no alcanzaban la optimización.

Al finalizar el trabajo se ve un amplio abanico de posibilidades para continuar con el presente proyecto, incorporando una serie de mejoras. A lo largo de esta memoria se ha mencionado la cantidad de mantenimientos que debe recibir un helicóptero de la Décima Escuadrilla. Todos ellos, deberían implantarse en el programa consiguiendo una situación más realista del estado del helicóptero. Otra forma en la que se podría ampliar este programa, sería incluyendo otras escuadrillas de la Flotilla de Aeronaves. Dependiendo de la tipología de las misiones o ejercicios, y de la operatividad de cada aeronave, se asignaría una unidad u otra a una operación de la Armada Española.

La operatividad de la Armada Española siempre será más eficiente cuando todos los recursos, de los que se dispone, funcionan de forma adecuada. Sería sugerente desarrollar el presente proyecto para el resto de escuadrillas de la FLOAN. La intervención en el marco operativo de cada escuadrilla es sustancial, ya que aparecen nuevas misiones [Figura 5-1], que solo un tipo de escuadrilla puede acometer por sus peculiaridades.



Figura 5-1 Vida marina en Somalia con SH-60B (Fuente: Décima Escuadrilla)

Una programación interesante sería la asignación de pilotos a las aeronaves de la Décima Escuadrilla. La gestión del personal en la Armada Española es fundamental y compleja a la vez. Se debe lidiar con problemas de asignación, cuando normalmente hay un número muy limitado de pilotos, con la gestión de los turnos de trabajo y con la determinación de necesidades futuras. Se persigue minimizar aspectos económicos o relacionados con los tiempos de ocupación de los individuos, a la vez que se deben satisfacer una serie de restricciones. Como en su momento dijo el Jefe de Estado Mayor del Ejército del Aire (JEMA) en un documento institucional: "*El elemento esencial de nuestra organización es su capital humano: los hombres y mujeres que forman sus filas*". Siendo un elemento intrínseco de las Fuerzas Armadas, cada individuo está constituido por una gran cantidad de limitaciones que impone la legislación laboral, el aspecto económico y la carga de trabajo del personal. De nuevo aparece la problemática común, la escasez de recursos humanos, que debe cumplir con los objetivos que son encomendados. Sin duda, el resto de procesos operativos dependen directamente de esta asignación de pilotos. [39]

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] J. L. Urcelay, «La transformación digital y el sostenimiento 4.0 en la Armada Española,» infodefensa.com, [En línea]. Available: https://www.infodefensa.com/es/2019/04/04/opinion-transformacion-digital-sostenimiento-armada.php. [Último acceso: 15 Febrero 2021].

[2] J. Rajgopal, «Principles and Applications of Operations Research».

[3] J. A. L. R. Pilar Tormos, «Investigación Operativa para ingenieros,» Universitat Politècnica de València, 2003.

[4] G. J. Frederick S. Hillier, Investigación de operaciones, Mexico D.F: Mc Graw Hill, 2015.

[5] H. A. Taha, Investigación de Operaciones, México: Pearson, 2012.

[6] D. L. Santana, «TFG: Evaluación y optimización de los servicios de un taller de mantenimiento mediante el software de simulación ARENA».

[7] Ministerio de Defensa, «El Cuartel General de la Armada,» [En línea]. Available: https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/conocenosorganizacion/prefLang-es/02cuartelgeneral. [Último acceso: Enero 2021].

[8] «Las matemáticas al servicio de la Armada,» *Revista Española de DEfensa,* Enero 2014.

[9] R. C. Rodríguez, «TFG: Diseño de un sistema de gestión de personal a bordo de un buque».

[10] P. B. Rodríguez, «TFG: Aplicación de las Leyes de Lanchester en conflictos de baja intensidad».

[11] I. a. l. O. d. O. Militares, «Catalogo General de Publicaciones Oficiales del Ministerio de Defensa,» Marzo 2018. [En línea]. Available: http://publicacionesoficiales.boe.es/.

[12] O. Research, «ResearchGate,» 2019. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/333748649_Chapter_-01_Operations_Research. [Último acceso: Enero 2019].

[13] Universidad Complutense de Madrid, «Tema 2: Modelos lineales de optimización con variables enteras».

[14] I. t. O. Research, «Computer Science. University of Toronto,» 2014. [En línea]. Available: https://www.cs.toronto.edu/~stacho/public/IEOR4004-notes1.pdf. [Último acceso: Enero 2021].

[15] V. Y. Piqueras, «Introducción a la optimización heurística en ingeniería,» Santiago de Chile, 2013.

[16] K. V. Sandoval, «Introducción al Método Simplex: Forma Tabular paso a paso,» México, 2015.

[17] «Manual de Microsoft Office / Excel,» [En línea]. Available: https://www.uv.mx/personal/llopez/files/2013/03/Manual-Microsoft-Office-Excel-2010.pdf.

[18] «Analytics informs,» [En línea]. Available: https://pubsonline.informs.org/do/10.1287/LYTX.2020.01.20n/full/.

[19] C. R. T. Gil, «Resolución de problemas de programación matemática mediante Solver de Excel».

[20] «Armada Española,» [En línea]. Available: https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/buquesaeronaves/prefLang-es/02flotilla-aeronaves-helicopteros--0410-escuadrilla-aeronaves-sh-60-b-lamps-iii.

[21] L. A. Española, «IEEE,» 2012. [En línea]. Available: http://www.ieee.es/Galerias/fichero/OtrasPublicaciones/Nacional/La_Armada_Espanola.pdf. [Último acceso: Febrero 2021].

[22] C. R. T. Gil, «Sistema LAMPS».

[23] T. w. m. a. m. helicopter, «MH-60 Helicopter,» [En línea]. Available: https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/sikorsky-mh-60-seahawk-helicopters.html. [Último acceso: Febrero 2021].

[24] ARMADA. Jefatura del Apoyo Logístico. Dirección de mantenimiento., «Pliego de Prescrippciones Técnicas del contrato de Sostenimiento Integral de Sistemas de movimiento de aeronaves a bordo de buques de la Armada.,» 2014.

[25] «BlogNaval,» 2020. [En línea]. Available: https://blognaval.es/el-futuro-de-la-floan/.

[26] A. A. G. Alejandro Cuerda Lorenzo, «Revista General de la Marina,» [En línea]. Available: https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2010/10/cap06.pdf. [Último acceso: Febrero 2021].

[27] National Wildfire Coordinating Group, «NWCG Standards for Helicopter Operations,» May 2019.

[28] Department of the Navy, «Naval Aviation Vision,» EEUU, 2016.

[29] J. M. Carcedo, «Planificación de la organización del mantenimiento de aeronaves».

[30] ARMADA. Jefatura de Apoyo Logístico. Dirección de Mantenimiento. , «Pliego de Prescripciones Técnicas del acuerdo marco para el desarrollo de actividades de apoyo al sostenimiento de todas las aeronaves de la ARMADA,» 2014.

[31] Armada. Jefatura de Apoyo Logístico. Dirección de Sostenimeinto., «Instrucción permanente de sostenimiento núm. 01/2019, de 22 de enero, del Almirante Jefe de Apoyo Logístico de la Armada, sobre el sostenimeinto de las aeronaves en la Armada.,» 2019.

[32] Décima Escuadrilla de Aeronaves de la Armada Española, «PQS MO ASST. MAINTENANCE OFFICER ASSISTANT. MANTENIMIENTO A BORDO DE UNAEMBS.».

[33] A. M. N. R.A. Hahn, «Scheduling United States Coast Guard helicopter deployment and maintenance at Clearwater Air Station, Florida,» ELSEVIER, 2006.

[34] «Foro Yoryi. Modelismo y maquetas.,» 2012. [En línea]. Available: https://maquetas.mforos.com/1165098/10797767-sikorsky-sh-60f-oceanhawk-1-72-hobby-boss-presencial-terminado/. [Último acceso: Febrero 2021].

[35] Décima Escuadrilla de Aeronaves de la Armada Española, «A1-H60CA-MRC-400,» 2019.

[36] P. E. d. R. d. A. militares, «Publicaciones Defensa,» 2016. [En línea]. Available: https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/p/e/peram_21_2.pdf. [Último acceso: Febrero 2021].

[37] «Armada.info,» [En línea]. Available: https://sites.google.com/site/armadaespanolainfo/buques-anfibios/clase-galicia. [Último acceso: 24 Febrero 2021].

[38] B. W. Pippin, «Thesis: Allocating flight hours to Army helicopters,» 1998.

[39] Ministerio de Defensa, «Ejercito del Aire,» [En línea]. Available: https://ejercitodelaire.defensa.gob.es/EA/ejercitodelaire/es/JEMA/. [Último acceso: Febrero 2021].

[40] A. J. d. A. L. d. l. Armada, «Instrucción Permanente de Sostenimiento num. 01/2019».

[41] «Historias y biografias,» [En línea]. Available: https://historiaybiografias.com/el_radar/.

ANEXO I: MISSION ESSENTIAL SUBSYSTEM MATRIX (MESM)

MESM es la matriz esencial para realizar una serie de misiones específicas, lograr la preparación requerida de la condición del material, los estándares de mantenimiento y los requisitos de seguridad. Es decir, es una matriz que indica a la unidad qué misiones puede realizar un helicóptero en función de los equipos disponibles y, dado el caso, si no puede salir a volar. Un ejemplo sería, en el hipotético caso de que se dispusiera de un helicóptero con un solo altímetro. La MESM indica que, con un solo altímetro, sólo sería posible volar por el día en tierra y mar, y de noche, en tierra y en condiciones visuales. Si tuviéramos los dos altímetros inoperativos, la MESM indica que la aeronave queda fuera de vuelo. [31]

La MESM se encarga de enumerar una serie de subsistemas que son necesarios para misiones específicas, junto con su correspondiente impacto de la degradación e inoperatividad. La capacidad de realizar misiones específicas es posible cuando todos los subsistemas, capacidades, funciones y modos son operables. Esta lista comprueba antes de cada vuelo, en caso de que la aeronave tenga algún sistema o equipo inoperativo. A continuación, se expone la matriz del SH-60 [Figura A1-0-1] de forma resumida: [32]

SH-60B MISSION ESSENTIAL SUBSYSTEM MATRIX (MESM)
COMNAVAIRFORINST 4790.2 A CH-2

CUADRANTE RESUMIDO.

	NON MISSION CAPABLE (FUERA DE VUELO)	PARTIAL MISSION CAPABLE (LIMITADO)								OBS
		OPS DESDE BUQUE	IMC	NOCTURNO SOBRE EL AGUA	SAR	ARMAS	ASW	ASUW	AMBIENTE HOSTIL	
INSPECCIONES CONDICIONALES	X									
INSPECCIONES DE TURBINA	X									
INSPECCIONES DE FASE	X									
INSPECCIONES ESPECIALES	X									
CUMPLIMIENTO DE DIRECTIVAS TÉCNICAS	X									
FUSELAJE	X									
LUCES ANTI COLISIÓN (1 DE 2)	X									
APU	X									
AUDIO CONVERTER PROCESSOR	X									
BLADE FOLD	X									1
CENTRAL DISPLAY UNIT	X									
COMM SYSTEM CONTROL GROUP INDICATOR	X									
SISTEMA ELÉCTRICO	X									
TURBINAS (INCLUYEN ANTI-ICE)	X									
SIST DETECTOR/EXTINTOR FUEGO (INCLUYE CARTUCHOS)	X									
CONTROLES DE VUELO	X									
SISTEMA DE COMBUSTIBLE	X									
SISTEMA HIDRAULICO	X									
INSTRUMENTOS DE VUELO	X									2

Figura A1-0-1 MESM del helicóptero SH-60 (Fuente: Décima Escuadrilla) [32]

En la matriz [Figura A1-0-2], se puede ver en la columna de la izquierda, una serie de sistemas que pueden ser requisitos irrefutables para una misión específica. Entre los tipos de misiones, encontramos la más destacada, Instrumental Meteorological Conditions (IMC), por depender de las condiciones meteorológicas. Esta situación aparece cuando hay presencia de niebla o gran cantidad de lluvia y los pilotos no pueden volar en condiciones visuales. [32]

SH-60B MISSION ESSENTIAL SUBSYSTEM MATRIX (MESM)

COMNAVAIRFORINST 4790.2 A CH-2

CUADRANTE RESUMIDO.

	NON MISSION CAPABLE (FUERA DE VUELO)	PARTIAL MISSION CAPABLE (LIMITADO)								OBS
		OPS DESDE BUQUE	IMC	NOCTURNO SOBRE EL AGUA	SAR	ARMAS	ASW	ASUW	AMBIENTE HOSTIL	
ICS (PILOTO/ATO)	X									
TREN DE ATERRIZAJE	X									
MODE SELECT PANEL (1 DE 2)	X									
PILOT DISPLAY UNIT (2 DE 2)	X									
SISTEMA NEUMÁTICO	X									3
EXTINTOR PORTÁTIL (1)	X									
SISTEMA DEL ROTOR	X									
ESTABILIZADOR (INDICADOR Y TONO AURAL)	X									
SISTEMA DE TRANSMISIÓN	X									
RADIO UHF/VHF (1)	X									
			X							
AFCS (SAS-2 TROM AUTOPILOT)			X							
AIR SPEED INDICATOR (2 DE 2)			X							
ATTITUDE INDICATOR (2 DE 2)			X							
ALTÍMETRO BAROMÉTRICO (2 DE 2)			X							
RELOJ ATO /PILOTO (1)			X							
LUCES INTRUMENTOS CABINA			X							
IFF MODO 3/C			X							4
MAGNETIC AZIMUT DETECTOR THU-37(1 DE 2)			X							

Figura A1-0-2 Segunda parte de la MESM (Fuente: Décima Escuadrilla) [32]

ANEXO II: GALIA AERONAVES

La aplicación GALIA AERONAVES es la actual herramienta que utiliza la Armada Española para solicitar, registrar y certificar acciones de mantenimiento que se efectúan sobre las aeronaves y sus correspondientes componentes y sistemas. Está diseñada para integrar en una misma aplicación a todo el personal implicado en los diferentes procesos de los mantenimientos. Las utilidades de este programa incluyen, sin limitarse a ellas, las siguientes: [31]

- Gestión de partes de mantenimiento.
- Gestión de obras.
- Gestión de material.
- Control de componentes de vida limitada.
- Gestión de DISOP (Disponibilidad Operativa).
- Aprobación de Modificaciones y Reparaciones.
- Aprobación de Modificaciones y Reparaciones.
- Aprobación de Boletines de Servicio del fabricante.
- Aprobación de Directivas de Aeronavegabilidad.
- Seguimiento de la implementación de las Modificaciones y Reparaciones, así como los Boletines de Servicio y Directivas de Aeronavegabilidad.
- Actualización y asignación de publicaciones técnicas.
- Control de la Configuración de las Aeronaves y Equipos.
- Programas de Mantenimiento.
- Seguimiento del Mantenimiento realizado.
- Certificación del Mantenimiento realizado.
- Certificación de Aeronavegabilidad de las Aeronaves.

Una información muy importante para el control y programación de los mantenimientos a través de GALIA, son los Partes de Mantenimiento Mecanizados (PMM). El flujo de trabajo de GALIA en cuanto a los PMM es el que se muestra en la Figura A2-01-1. [31]

Un usuario, ya sea un taller, dotación de vuelo o control de mantenimiento, abre un PMM reflejando una discrepancia o un mantenimiento requerido. El PMM siempre es validado por el escalón superior y asignado al taller correspondiente.

El personal cualificado del taller ejecuta el trabajo. Una vez, finalizado este, se rellena el PMM indicando en el mismo:

- ☑ Identificación del objeto del mantenimiento (numeral si corresponde o nombre).
- ☑ Identificación de la tarea del programa de mantenimiento.

- ☑ Manual, párrafo o epígrafe que se ha seguido para realizar el trabajo.
- ☑ Material utilizado, indicando el seriado de los repuestos reparables
- ☑ Herramientas 'calibrables' utilizadas, indicando la fecha de calibración.
- ☑ Personal que ha realizado el trabajo.
- ☑ Personal que, en caso de ser requerido, ha realizado el control de calidad.

Tras completar estos datos, el PMM se envía al escalón superior correspondiente para comprobar que está debidamente cumplimentado. Por último, el PMM se remite a 'certificación'. Actualmente, la certificación la realizan ingenieros aeronáuticos. Los certificados de Aptitud se firman y quedan registrados en la Aplicación GALIA AERONAVES, a disposición de los usuarios y de los ingenieros habilitados para la emisión o renovación de los certificados de aeronavegabilidad de las aeronaves. [40]

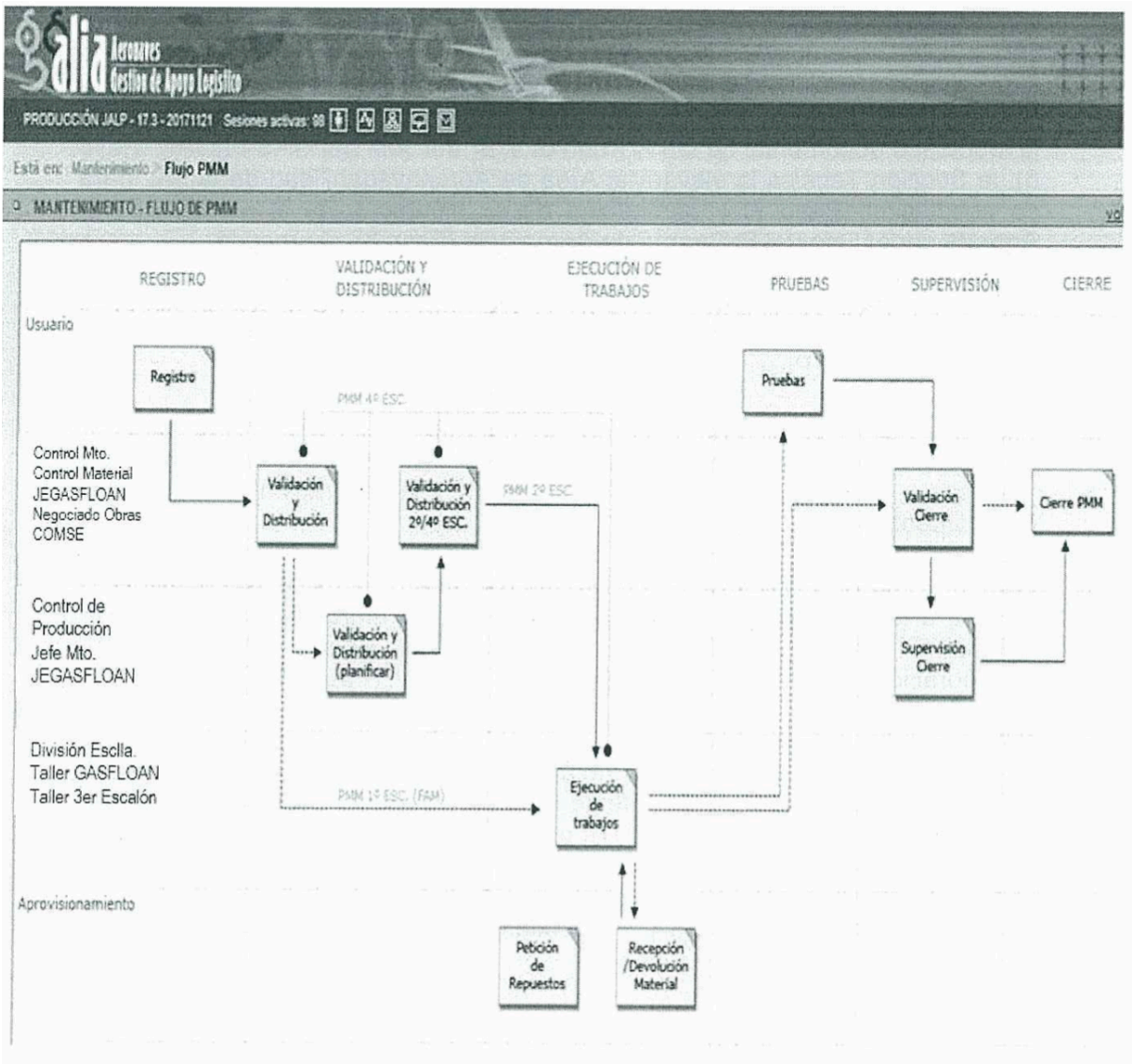


Figura A2-01-1 Flujo de la documentación técnica en GALIA que siguen los PMM (Fuente: Décima Escuadrilla)