



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de viabilidad de implantación de dos dotaciones para los
buques de la clase BAM*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Ángel Jesús Muñoz Bernal

DIRECTORES: Gerardo González-Cela Echevarría

Pedro Jesús Carrasco Pena

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de viabilidad de implantación de dos dotaciones para los
buques de la clase BAM*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

España requiere una presencia naval sostenida para garantizar la seguridad de sus espacios marítimos, conforme a la Estrategia Nacional de Seguridad Marítima 2024. Los Buques de Acción Marítima, BAM, son el principal activo para esta misión, pero su disponibilidad operativa está limitada por el modelo de dotación única, que impone restricciones humanas en escenarios de presencia prolongada. Este trabajo aborda el problema como un sistema de optimización, formulando el empleo de dotaciones como un problema de planificación con restricciones operativas, técnicas y de fatiga. Para ello, se desarrollan dos modelos: un modelo analítico y un modelo de Programación Lineal Entera Mixta, MILP, implementado en Python. El modelo MILP permite optimizar la asignación temporal de dotaciones en un horizonte bianual. Los resultados demuestran que la implantación de un sistema de doble dotación incrementa la disponibilidad operativa aproximadamente un 15%, al tiempo que reduce el esfuerzo individual de las dotaciones un 40%, evidenciando una mejora simultánea en eficiencia y sostenibilidad. Se concluye que una rotación parcial de dotaciones representa la alternativa más realista y equilibrada para la Armada Española en el contexto actual, sin requerir una duplicación completa del recurso humano.

PALABRAS CLAVE

BAM, viabilidad, dotaciones, MILP, operatividad.

AGRADECIMIENTOS

A mis directores, el CF Gerardo González-Cela Echevarría y el CC Pedro Carrasco Pena, por su orientación y dedicación a la hora de resolver todas mis dudas y propuestas a lo largo del desarrollo de este TFG. Su disponibilidad y criterio han sido fundamentales para que este trabajo llegase a buen puerto, en el sentido más literal de la palabra.

A mis padres, por darme todas las oportunidades que han estado en su mano y por enseñarme que esta profesión era una opción. Sin ellos, yo no estaría aquí ni este trabajo existiría.

A mi hermano, que mientras escribo estos agradecimientos andará navegando por algún lugar del Golfo de Guinea, en uno de estos buques de los que trata el TFG. Escogí este tema en parte porque sabía que, aunque estuviese desplegado al otro lado del mundo, de alguna manera me iba a echar una mano.

A Carolina, por casi una década de apoyo. Por estos cinco años en la Escuela en los que me has tenido que soportar muchas veces tan gris como el tiempo gallego. Por animarme a cumplir mis metas desde que te conocí y por el resto de años que quedan.

Y a Teodoro y al resto del CH: mención honorífica por seguir aguantándome en el grupo, aunque me encuentre en paradero desconocido la mayor parte del tiempo. Gracias a todos.

LISTA DE ACRÓNIMOS

BAM: *Buque de Acción Multipropósito.*

FAM: *Fuerza de Acción Marítima.*

ENSM: *Estrategia Nacional de Seguridad Marítima.*

RGM: *Revista General de Marina.*

SICP: *Sistema Integrado de Control de Plataforma.*

BAM-IS: *Buque de Acción Marítima-Inteligencia y Seguridad.*

PIP: *Periodo de Inmovilización Programada*

FD: *Factor de Disponibilidad técnica.*

FE: *Factor de Empleo.*

OPV: *Offshore Patrol Vessel.*

CBO: *Congressional Budget Office.*

CNA: *Center for Naval Analyses.*

MILP: *Mixed Integer Linear Programming.*

REM: *Requisito de Estado Mayor.*

MC: *Mantenimiento Corto.*

FFAA: *Fuerzas Armadas.*

OVM: *Observatorio de la Vida Militar.*

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	1
Índice de Tablas.....	1
1 Introducción y objetivos.....	2
1.1 Motivación	2
1.2 Justificación del estudio	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Metodología	4
2 Estado del arte	5
2.1 Buque de Acción Marítima, BAM.....	5
2.1.1 Definición.....	6
2.1.2 Misiones y perfil operativo	7
2.1.3 Limitaciones humanas y logísticas	7
2.1.4 Evolución y futuro del BAM	8
2.2 Doble dotación	8
2.2.1 Concepto	8
2.2.2 Ventajas esperadas	10
2.2.3 Experiencias internacionales.....	11
2.3 Modelos de Optimización	12
2.3.1 Modelo MILP.....	12
2.3.2 Modelo de Metaheurística.....	14
3 Desarrollo del TFG	16
3.1 Análisis operativo del BAM	16
3.1.1 Horizonte temporal	16
3.1.2 Actividad operativa	17
3.1.3 Mantenimiento	17
3.1.4 Personal.....	17
3.2 El problema de personal en la Armada	17
3.2.1 El desgaste del personal	18
3.2.2 Crisis de captación y fuga de talento	19
3.2.3 Conciliación familiar.....	20
3.3 Modelos de optimización	20
3.3.1 Modelo Básico	21
3.3.2 Modelo MILP.....	23
3.4 Implementación del modelo MILP en Python	32
3.4.1 Consideraciones de la resolución del modelo	32
3.4.2 Ajustes estructurales del modelo MILP	33
4 Resultados y Viabilidad	37
4.1 Resolución de los modelos.....	37
4.1.1 Modelo Básico	37
4.1.2 Modelo MILP.....	40
4.2 Evaluación de la viabilidad	51
4.2.1 Estimación de necesidades de personal	53
5 Conclusiones y líneas futuras.....	55

5.1	Conclusiones	55
5.2	Líneas futuras	56
6	Bibliografía	58
	Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales	60
	Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	61
	Anexo III: Declaración uso responsable de IA.....	62
	Anexo IV: Cronología operativa de la clase BAM	63
	Anexo V: Plantilla Orgánica de la clase BAM.....	65
	Anexo VI: Código de Python	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Zonas marítimas de jurisdicción españolas	2
Figura 1-2 Metodología empleada en el TFG	4
Figura 2-1 Planos longitudinales del BAM	6
Figura 2-2 Zonas de despliegue de los BAM	7
Figura 2-3 Ventajas esperadas de la Doble dotación.....	10
Figura 3-1 Personal de las FFAA en activo a 1 enero 2025	18
Figura 3-2 Gráfico de tendencia de cobertura de personal año 2023	19
Figura 3-3 Ratio por plaza ofertada de tropa y marinería	19
Figura 3-4 Situación de personal en unidades BAM de Canarias	20
Figura 3-5 Esquema del modelado del MILP.....	24
Figura 3-6 Proceso de obtención de resultados	32
Figura 4-1 Porcentaje de disponibilidad empleado en días de mar según el modelo de dotación ...	38
Figura 4-2 Comparación de días de mar según el escenario	39
Figura 4-3 Incremento de días de mar según escenario de doble dotación	40
Figura 4-4 Cronograma operativo del modelo de dotación única	42
Figura 4-5 Evolución de la fatiga del modelo de dotación única	43
Figura 4-6 Comparativa días de mar y disponibilidad entre modelos.....	44
Figura 4-7 Cronograma operativo del modelo de doble dotación	45
Figura 4-8 Análisis de alternancia y disponibilidad ($D=2$)	45
Figura 4-9 Evolución de la fatiga de la dotación 1	46
Figura 4-10 Evolución de la fatiga de la dotación 2.....	46
Figura 4-11 Esfuerzo medio por dotación	47
Figura 4-12 Comparativa de navegación acumulada	48
Figura 4-13 Distribución de la fatiga en ambos escenarios.....	49
Figura 4-14 Análisis de sensibilidad del parámetro Alpha	50
Figura 4-15 Análisis de sensibilidad del parámetro Phi	51
Figura 4-16 Distribución por escala de los efectivos totales de los BAM	53
Figura 4-17 Incremento de personal requerido por escenario	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Dotaciones orgánicas de los BAM.....	8
Tabla 2-2 Resumen de metaheurísticas en optimización	15
Tabla 3-1 Perfil de utilización previsto de acuerdo al REM	17
Tabla 3-2 Hipótesis del modelo MILP	26
Tabla 4-1 Escenarios del modelo básico	38
Tabla 4-2 Resultados del modelo básico	39
Tabla 4-3 Análisis del modelo según α	41
Tabla 4-4 Resultados cuantitativos (D=1).....	41
Tabla 4-5 Resultados cuantitativos (D=2).....	44
Tabla 4-6 Personal total en los BAM analizados	53
Tabla 4-7 Estimación de personal para los modelos de doble dotación.....	53

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

A lo largo de este apartado, se expondrán los principales elementos introductorios del presente Trabajo Fin de Grado (TFG), incluyendo la motivación que sustenta su desarrollo, la justificación del problema abordado, los objetivos previstos en su realización y su metodología y estructura.

1.1 Motivación

España es un país de vocación marítima como refleja su historia, geografía, economía y posición estratégica, que lo convierte (como Estado europeo con costas en el Océano Atlántico y Mar Mediterráneo) en un elemento fundamental de la seguridad y prosperidad europea. Así viene detallado este enfoque en la Estrategia Nacional de Seguridad Marítima de 2024 (ENSM 2024), la cual define el dominio marítimo como un espacio global de importancia estratégica en el que convergen intereses de seguridad, económicos, ambientales y geopolíticos [1].

La ENMS 2024 identifica que la seguridad de España está ligada a la protección de sus espacios marítimos, incluidas las zonas sobre las que ejerce soberanía y jurisdicción. En la Figura 1-1 se pueden ver reflejadas en azul celeste el conjunto de aguas interiores, mar territorial, zona contigua, zona económica exclusiva y su plataforma continental. Además, destaca la contribución decisiva de España a la seguridad internacional en y desde la mar [1]. En este marco, la Armada Española se configura como elemento principal del Estado para garantizar una presencia naval sostenida, capaz y flexible para responder a riesgos y amenazas tanto convencionales como híbridas.



Figura 1-1 Zonas marítimas de jurisdicción españolas (Wikimedia Commons)

Los Buques de Acción Marítima (BAM) han sido concebidos para dar respuesta a este tipo de necesidades. Se trata de plataformas polivalentes, diseñadas para misiones prolongadas de vigilancia y seguridad marítima, con elevados niveles de automatización, habitabilidad optimizada y una concepción orientada a la reducción de costes de ciclo de vida [2], [3]. La Armada y la industria nacional han destacado el papel de los BAM como buques idóneos para sostener la presencia naval en escenarios de baja y media intensidad [2], conforme a los objetivos estratégicos nacionales.

No obstante, la experiencia demuestra que la disponibilidad real de estas unidades no depende únicamente de sus capacidades técnicas, sino también del modelo de empleo de sus dotaciones. El actual esquema de dotación única por buque tiene limitaciones en la sostenibilidad de despliegues prolongados, especialmente cuando se exige la presencia continuada en el tiempo, como la que demanda la ENSM 2024. Esta circunstancia ha sido señalada en artículos publicados en la Revista General de Marina, RGM, donde se destaca que la presencia naval efectiva exige no solo medios adecuados, sino modelos de empleo que tengan en cuenta el factor humano como elemento crítico del sistema naval desde su construcción. [4], [5].

La motivación de este Trabajo Fin de Grado surge, por tanto, de la necesidad de analizar y evaluar la gestión de las dotaciones de los BAM para que se adecúen mejor a las exigencias de la ENSM 2024, explorando modelos alternativos como la rotación de dotaciones que podrían contribuir a mejorar la disponibilidad operativa efectiva de estas unidades.

1.2 Justificación del estudio

La justificación de este estudio se fundamenta en la unión de tres perspectivas (estratégica, operativa y normativa), todas ellas relacionadas con la seguridad marítima de España.

Desde el plano estratégico, la ENSM 2024 establece como uno de sus ejes primarios la mejora de las capacidades marítimas nacionales, entendidas no solo como la adquisición o modernización de plataformas, sino como el conjunto de los recursos disponibles incluyendo los humanos y organizativos [1]. La ENSM reconoce que la complejidad del entorno marítimo actual exige capacidades de sostener una presencia prolongada y adaptable, lo que implica revisar los modelos tradicionales de las fuerzas navales.

En el plano operativo, los BAM representan una herramienta clave para cumplir misiones de vigilancia, control de espacios marítimos, protección de infraestructuras críticas y apoyo a la acción del Estado en la mar [2], [3]. Sin embargo, como se señala en la Revista General de Marina, la eficacia de este tipo de plataformas depende de su capacidad para mantener una presencia prolongada en el tiempo, lo que a su vez está condicionado por la gestión de ciclos de dotación, adiestramiento y descanso de personal [4]. En este sentido, el modelo de dotación única puede convertirse en un factor limitante, aun cuando el buque se encuentra técnicamente disponible.

Desde una perspectiva normativa, Bureau Veritas establece que la disponibilidad de un buque naval debe entenderse como el resultado de una adecuada coordinación entre operación, mantenimiento y gestión del personal, dentro de un marco de sostenimiento planificado [6]. Aunque estas reglas no establecen un modelo concreto de dotación, si proporciona diferentes maneras de explotación de un buque, siempre que se garantice la seguridad, la fiabilidad y la conservación de su clase.

Asimismo, la experiencia internacional demuestra que la implantación de modelos de rotación de dotaciones no está exenta de riesgos si no existe una adecuada coherencia entre diseño del buque, mantenimiento y gestión del personal. El estudio del *Naval Postgraduate School* sobre el programa *LCS* pone en manifiesto que una mala integración de estos elementos puede reducir la disponibilidad operativa en lugar de incrementarla [7]. Esto refuerza la necesidad de abordar el análisis de forma rigurosa y contextualizada, considerando las particulares de los BAM.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este TFG, es evaluar la viabilidad técnica, organizativa y operativa de la implantación de un modelo de rotación de dotaciones (doble rotación tipo *blue/gold crewing*) en los BAM de la Armada Española, como medio para incrementar su disponibilidad operativa efectiva, en coherencia con los objetivos establecidos en la ENSM 2024. Este objetivo se aborda desde una perspectiva de viabilidad, no de implantación, y se limita deliberadamente a un análisis teórico y comparativo, apoyado en documentación técnica, doctrinal y estratégica, así como en la construcción de escenarios razonados y realistas. Como consecuencia, el trabajo trata de identificar condiciones de aplicabilidad, beneficios potenciales, limitaciones y riesgos, proporcionando una base analítica que pueda servir de apoyo a estudios posteriores de mayor profundidad o carácter institucional.

Los objetivos específicos son los que se detallan a continuación:

- Identificar las limitaciones del modelo actual de dotación única en buques de presencia prolongada.
- Analizar modelos internacionales de rotación de dotaciones (*dual crewing*, *blue/gold crewing*).
- Definir escenarios teóricos y realistas de implantación de doble rotación en los BAM.
- Evaluar de forma cualitativa el impacto de los escenarios propuestos.
- Establecer unas conclusiones sobre la viabilidad del modelo propuesto.

1.4 Metodología

El desarrollo del presente TFG se estructura siguiendo una metodología orientada a evaluar la viabilidad de la implantación de un sistema de rotación de dotaciones en los buques de clase BAM.

En primer lugar, se realiza un análisis documental y normativo con el objetivo de establecer el marco teórico del estudio, identificando: el estado del arte relativo a los BAM, los modelos de rotación de dotaciones y los modelos de optimización aplicables. Este análisis permite delimitar el problema y definir los parámetros relevantes a optimizar.

A continuación, se lleva a cabo un análisis operativo del BAM, centrado en su funcionamiento real. En esta fase se estudia el ciclo operativo del buque, estimando los días de mar anuales. Sobre esta estimación, se desarrollan modelos de optimización de la disponibilidad, comenzando por un modelo básico de carácter descriptivo y continuando con un modelo de programación lineal entera mixta. Estos modelos permiten evaluar de forma comparativa el impacto de la doble dotación sobre la disponibilidad del buque. Posteriormente, se realiza una evaluación de la viabilidad del sistema propuesto, teniendo en cuenta el actual problema del personal de la Armada.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se formulan las conclusiones del trabajo y se proponen líneas futuras de investigación, orientadas a métodos de optimización más avanzados. A modo de resumen, se puede observar la metodología seguida en la Figura 1-2.

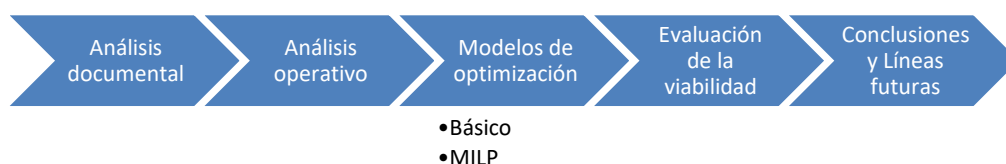


Figura 1-2 Metodología empleada en el TFG (autoría propia)

2 ESTADO DEL ARTE

Este apartado recoge el Estado del Arte que sirve como base para el TFG, delimitando el marco teórico sobre el que se desarrolla. Está estructurado en tres bloques diferenciados. En primer lugar, se estudia el BAM desde el punto de vista de una plataforma naval orientada a misiones de presencia prolongada. A continuación, se desarrolla el modelo de rotación de dotaciones y los estudios ya realizados con el fin de extraer lecciones que se puedan aplicar dentro de la Armada Española. Para finalizar el apartado, se presentan los modelos de optimización sobre los que se fundamenta el modelo desarrollado en este TFG.

2.1 Buque de Acción Marítima, BAM

El programa BAM constituye uno de los principales hitos de modernización de la Fuerza de Acción Marítima (FAM) de la Armada Española en las últimas décadas. El origen de este programa se encuentra en una reflexión por parte del Estado a finales de los años 90 donde se identifica la necesidad de disponer de plataformas navales específicamente diseñadas para las misiones de seguridad marítima sostenida, diferenciándose de los buques de escolta diseñados para ambientes de combate naval y alta intensidad [5], [8].

Hasta ese momento, gran parte de las misiones de vigilancia marítima, control de espacios de soberanía y presencia naval recaían sobre una flota de patrulleros de distinta clase cuyo punto en común era su antigüedad. Muchos de ellos contaban con limitaciones severas en autonomía, habitabilidad y sostenimiento, generando ineficiencias tanto operativas como logísticas [5]. Del mismo modo, el empleo de fragatas o corbetas en este tipo de misiones suponía un uso excesivo de recursos con el empleo de plataformas de alto valor en ambientes de poca y media intensidad.

El BAM es concebido por tanto como una solución óptima desde su fabricación bajo los criterios de:

- Modularidad
- Eficiencia en el ciclo de vida.
- Reducción de dotaciones.
- Automatización.
- Adaptabilidad al espectro de las operaciones [5].

Este planteamiento se alinea con la ENSM 2024, que reconoce el dominio marítimo como un espacio de conflicto y difuso, donde la presencia permanente y la capacidad de respuesta flexible resultan más convenientes que la potencia de fuego convencional [1].

Desde su entrada en servicio, los BAM han confirmado la validez de este enfoque, consolidándose como plataformas de referencia para operaciones de seguridad marítima, especialmente en escenarios alejados de territorio nacional donde la persistencia es fundamental [9].

2.1.1 Definición

El BAM puede definirse como una plataforma naval de segunda línea, diseñada para operar de forma continuada en entornos de media y baja amenaza integrando capacidades militares, de seguridad y de apoyo a la acción del Estado [3], [5].

Desde el punto de vista del diseño naval, el BAM incorpora una serie de decisiones técnicas orientadas a maximizar la eficiencia operativa con dotaciones reducidas. La elevada automatización de la plataforma, gestionada mediante un Sistema Integrado de Control de Plataforma (SICP), permite centralizar la supervisión de maquinaria, energía y sistemas auxiliares, reduciendo la necesidad de personal dedicado exclusivamente a funciones de vigilancia técnica continua [10].

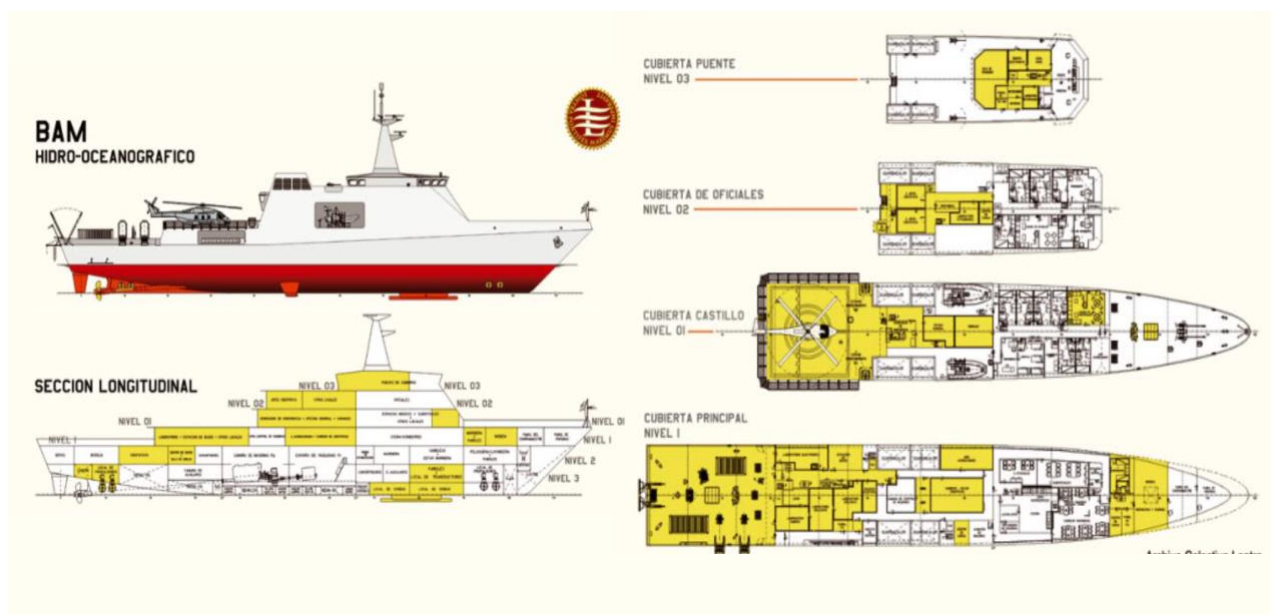


Figura 2-1 Planos longitudinales del BAM (Colectivo Lontra)

La arquitectura del buque prioriza de la misma manera la habitabilidad y la ergonomía, aspectos tradicionalmente secundarios en las plataformas militares, pero que se convierten en aspectos críticos cuando se considera un despliegue prolongado. En la Figura 2-1 se pueden observar los planos del BAM donde se aprecia la distribución de las distintas cubiertas.

Otro rasgo distintivo de los BAM es su concepción modular, que permite adaptar la plataforma a distintos perfiles de misión sin modificaciones estructurales permanentes. El empleo de contenedores embarcados facilita la integración de capacidades adicionales, como puestos de mando, contenedores frigoríficos y de repuestos, sistemas de intervención subacuática o módulos de lucha contra la contaminación, incrementando la flexibilidad operativa y reduciendo la necesidad de plataformas especializadas [10].

Desde una perspectiva logística, el BAM ha sido diseñado con un enfoque de mantenimiento racionalizado, priorizando el mantenimiento preventivo planificado y la accesibilidad a equipos críticos. Este enfoque, recogido en la normativa logística de la clase, busca minimizar los periodos de inmovilización programada (PIP) para evitar la indisponibilidad técnica y facilitar las ventanas de mantenimiento [8].

2.1.2 Misiones y perfil operativo

El perfil operativo del BAM se caracteriza por una alta recurrencia de misiones y una elevada previsión de los escenarios donde se desempeñan dichas operaciones, lo que contrasta con el empleo más variable que tienen otros buques de guerra como las fragatas. Esta circunstancia convierte al BAM en una plataforma idónea para misiones de presencia persistente, donde la continuidad en el tiempo es un objetivo en sí mismo [9].

En base a las directrices del EMAD, las misiones asignadas a los BAM abarcan un amplio espectro, destacando especialmente aquellas relacionadas con:

- El control de espacios marítimos de soberanía e interés nacional.
- La cooperación internacional en seguridad marítima.
- El apoyo directo a políticas de seguridad y defensa del Estado [5], [9].

En el ámbito internacional, los BAM han adquirido un papel relevante en el marco de las Presencias Marítimas Coordinadas de la Unión Europea, particularmente en el Golfo de Guinea, donde la Armada Española mantiene una presencia prácticamente ininterrumpida desde hace varios años [9]. Un resumen de estas operaciones se puede ver reflejado en el Anexo IV: Cronología operativa de la clase BAM. Estas misiones implican no solo vigilancia marítima, sino también actividades de adiestramiento conjunto, visitas operativas (interdicción marítima), ejercicios multinacionales y cooperación con marinas regionales, lo que incrementa la carga operativa y la complejidad de los cometidos asignados.



Figura 2-2 Zonas de despliegue de los BAM (creada con IA generativa)

Desde el punto de vista temporal, los despliegues del BAM suelen extenderse durante varios meses, con un elevado número de días de mar consecutivos. Este patrón refuerza el carácter del BAM como activo estratégico de presencia, pero al mismo tiempo introduce tensiones que se analizan con mayor detalle en el apartado siguiente.

2.1.3 Limitaciones humanas y logísticas

El éxito operativo del BAM no oculta la existencia de limitaciones inherentes a su modelo de empleo, particularmente en lo relativo al factor humano y al sostenimiento logístico en despliegues prolongados.

La dotación reducida de los BAM, mostrada en la Tabla 2-1 y definida por su plantilla orgánica que se puede consultar en el Anexo V: Plantilla Orgánica de la clase BAM, aunque constituye una ventaja

desde el punto de vista de eficiencia y costes, implica una elevada polivalencia del personal y una concentración significativa de responsabilidades en determinados puestos clave [8]. En escenarios de alta exigencia operativa, esta situación puede derivar en sobrecarga de trabajo, reducción de márgenes de descanso efectivo y un aumento del riesgo de errores humanos, especialmente en misiones prolongadas.

	P-41 Meteoro	P-42 Rayo	P-43 Relámpago	P-44 Tornado	P-45 Audaz	P-46 Furor
Oficiales	9	6	7	6	9	9
Suboficiales	12	10	11	11	9	12
Marinería	31	30	34	34	31	31
Total	52	46	52	51	49	52

Tabla 2-1 Dotaciones orgánicas de los BAM (autoría propia, [2])

Del mismo modo, aunque el BAM dispone de una elevada autonomía en combustible, su permanencia continuada en zona se ve condicionada por limitaciones logísticas vinculadas al abastecimiento de víveres y al relevo de personal, lo que obliga a planificar escalas periódicas o relevos completos de la unidad [5]. Este enfoque es eficaz desde el punto de vista técnico, pero menos óptimo en términos de explotación máxima de la plataforma.

2.1.4 Evolución y futuro del BAM

La experiencia acumulada durante más de una década de operación de los BAM ha llevado a la Armada Española a consolidar este tipo de plataforma como un pilar fundamental de su estructura, especialmente en el ámbito de la seguridad marítima y de las operaciones de presencia prolongada. Lejos de tratarse de una solución temporal, la evolución del programa BAM pone de manifiesto una apuesta estratégica sostenida por este tipo de plataforma, adaptándolo progresivamente a nuevos escenarios y necesidades operativas [2], [10].

Esta apuesta se ve reflejada, en primer lugar, en la continuidad del programa BAM más allá de su concepción inicial, tanto en número de unidades como en la diversificación de estas unidades. Tras la entrada en servicio de los seis BAM de la clase Meteoro, la Armada ha impulsado el desarrollo de versiones especializadas que amplían las capacidades de la plataforma base, como el BAM-IS (Buque de Acción Marítima-Inteligencia y Seguridad), presentado oficialmente en FEINDEF 2021 [11].

El BAM-IS representa una evolución del modelo original, orientada a reforzar las capacidades de salvamento y apoyo al rescate de submarinos, así como la unidad principal para las operaciones de buceo de la Armada [11]. Esta variante incorpora mejoras en sensores, sistemas de comunicaciones y capacidad de procesamiento de información, manteniendo la filosofía de una plataforma polivalente que caracteriza al BAM original. Su desarrollo pone en evidencia que la Armada considera al BAM no solo como un patrullero oceánico, sino como una plataforma adaptable a misiones de mayor valor estratégico, en línea con la creciente importancia del conocimiento del entorno marítimo.

2.2 Doble dotación

2.2.1 Concepto

La rotación de dotaciones es un modelo organizativo para el empleo de plataformas navales en el que una misma unidad es operada de forma alterna por dos o más dotaciones distintas, permitiendo que los ciclos de disponibilidad del buque no coincidan estrictamente con los ciclos de embarque, descanso y adiestramiento del personal. Este enfoque persigue desacoplar parcialmente la disponibilidad operativa

de la plataforma de las limitaciones humanas asociadas a una dotación única, incrementando el tiempo efectivo en el que el buque puede permanecer desplegado o en estado de alta disponibilidad [12].

Desde una perspectiva de sistemas, este modelo implica considerar el binomio buque-dotación como un sistema desacoplable, frente al enfoque tradicional donde ambos elementos son un sistema indivisible. Los artículos del *Congressional Budget Office* (CBO) y el *Center for Naval Analyses* (CNA) muestran como esta perspectiva resulta adecuada en plataformas concebidas para un despliegue sostenido en el tiempo, donde el principal factor limitante no suele ser la disponibilidad técnica del buque, sino la capacidad de la dotación para mantener n esfuerzo prolongado sin degradar su rendimiento [12], [13].

Según la CBO, la rotación de dotaciones no debe interpretarse únicamente como una medida orientada a aumentar los días de mar , sino como una herramienta de optimización global del sistema buque-personal-mantenimiento, con implicaciones directas sobre la preparación, sostenibilidad y el coste de ciclo de vida de la plataforma [12].

2.2.1.1 Dual Crewing

El término *dual crewing* se emplea para describir un esquema organizativo en el que dos dotaciones completas y equivalentes se asignan a una misma plataforma naval, alternándose en su operación conforme a un ciclo de vida previamente definido. En este modelo, mientras una dotación se encuentra desplegada, la segunda permanece en fase de descanso, adiestramiento o apoyo en tierra, preparada para asumir el relevo del buque [12].

Desde el punto de vista organizativo, el *dual crewing* requiere:

- La existencia de dos dotaciones con niveles homogéneos de certificación y cualificación.
- Una planificación detallada de los ciclos de personal , que garantice la continuidad operativa.
- Procedimientos formales para la transferencia de responsabilidades, estado material y conocimiento operativo en los relevos entre dotaciones.

Además, el CNA refleja que uno de los principales retos de este modelo reside en evitar la pérdida de conocimiento de la situación asociada a los relevos, lo que exige sistemas de documentación técnica y procesos de entrega estructurados [13]. Por este motivo, el *dual crewing* se considera un modelo exigente desde el punto de vista organizativo, aunque potencialmente muy eficaz cuando se aplica a plataformas con perfil de misión estables y repetitivos.

2.2.1.2 Blue/Gold Crewing

El *blue/gold crewing* constituye una modalidad avanzada de rotación de dotaciones, dentro del concepto más amplio de dotaciones múltiples, en la que dos dotaciones completas se asignan de forma permanente a una misma plataforma, alternándose de manera continua en su operación. A diferencia de otros modelos menos estructurados, el *blue/gold crewing* se caracteriza por una planificación rígida de los ciclos de personal, diseñada para maximizar la eficiencia global del sistema buque-dotación-operaciones [4], [12].

En este modelo, las dotaciones (denominadas convencionalmente como *Blue crew* y *Gold crew*) alternan periodos de embarque y permanencia en tierra de manera establecida con anterioridad. Un aspecto central del *blue/gold crewing* es que no persigue la reducción del tamaño de la dotación, sino la distribución más eficiente del esfuerzo humano a lo largo del tiempo. El TN Seguí advierte precisamente del riesgo de confundir optimización con minimización, subrayando que la reducción excesiva de personal puede comprometer la seguridad, el mantenimiento y la preparación operativa el buque [4].

Desde una perspectiva de análisis de disponibilidad, el modelo permite actuar sobre el denominado Factor de Empleo (FE), entendido como la relación entre los días potenciales de operación de un buque y los días empleados dentro de una misión. En plataformas orientadas a la presencia sostenida, el factor

de empleo puede ser el principal factor limitante de la disponibilidad global del sistema, incluso cuando el Factor de Disponibilidad técnica (FD) es elevado (entendiéndose el FD como el porcentaje de días que se espera que el barco pueda navegar dentro de un ciclo de vida natural) [4]. Al reducir los tiempos improductivos asociados a descansos de la dotación, tránsitos innecesarios o fases prolongadas de adiestramiento en puerto, el *blue/gold crewing* contribuye a incrementar el FE sin modificar el diseño del buque [4], [12].

Sin embargo, tanto el TN Seguí como el CNA destacan que la implantación de este modelo exige una alta estandarización de la clase del buque y procedimientos para transferir el mando durante la rotación de las dotaciones ya que la ausencia de estos elementos puede provocar la degradación de la productividad tras el relevo, anulando los beneficios que se esperan conseguir con la implantación del modelo [4], [13]. Por este motivo el *blue/gold crewing* debe entenderse como un conjunto donde el diseño, mantenimiento, adiestramiento y organización deben estar integrados. En definitiva, el *blue/gold crewing* se configura como un modelo organizativo adecuado para plataformas cuyo concepto de empleo se basa en la presencia prolongada, previsible y repetitiva cuyo principal cuello de botella no reside en la plataforma en sí, sino en la sostenibilidad del esfuerzo humano asociado a una continuada operación.

2.2.2 Ventajas esperadas

La implantación de este tipo de modelos de dotación permite aplicar una serie de ventajas, las cuales se pueden observar en la Figura 2-3 y las cuales se desarrollan a lo largo de este apartado.

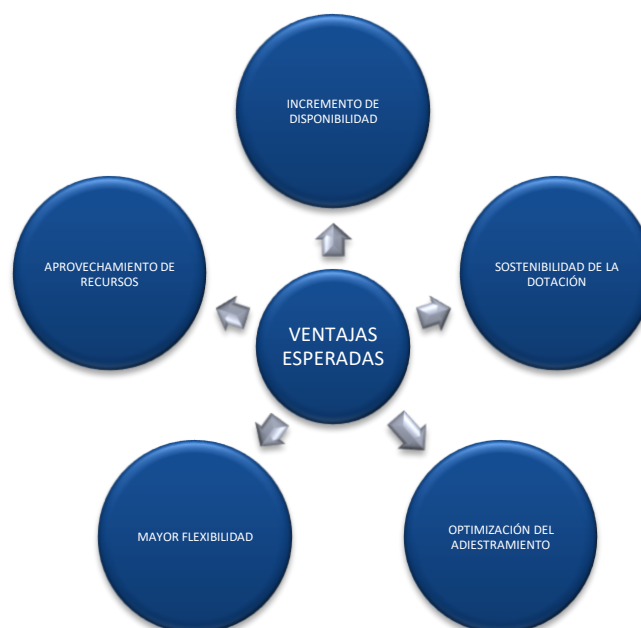


Figura 2-3 Ventajas esperadas de la Doble dotación (autoría propia)

Uno de las principales ventajas asociadas a la rotación de dotaciones es el incremento de la disponibilidad operativa efectiva de la plataforma, entendida como el número de días en los que el buque puede encontrarse desplegado o en condiciones de hacerlo. El CBO señala que, en plataformas orientadas a una presencia prolongada, la disponibilidad suele verse limitada más por los ciclos de descanso y adiestramiento del personal que por la indisponibilidad técnica de la plataforma [12].

Al disponer de más de una dotación asociada a una misma unidad, es posible reducir los periodos de inactividad del buque en puerto debidos al descanso del personal, permitiendo que la plataforma continúe de servicio mientras se produce el relevo de dotaciones. Este enfoque permite aumentar el rendimiento operativo de cada unidad sin necesidad de incrementar el número de buques disponibles, aspecto especialmente relevante en condiciones de restricciones en los presupuestos del Estado [12], [13].

Desde el punto de vista humano, la rotación de dotaciones se plantea como una herramienta para distribuir el esfuerzo operativo alargado en el tiempo, reduciendo la acumulación de fatiga asociada a despliegues prolongados con una única dotación. El TN Seguí Gómez de Olea destaca que, en buques flexibles con dotaciones reducidas, la fatiga acumulada puede convertirse en un factor limitante de la seguridad y de la eficacia operativa, incluso cuando el buque se encuentra técnicamente disponible [4].

El ciclo de vida del buque, dividido entre periodos de embarque y permanencia en tierra permite introducir fases claras de descanso, recuperación y conciliación familiar, lo que contribuye a mantener unos niveles más estables de rendimiento físico y psicológico del personal. Esta mejora en la sostenibilidad de la dotación no debe interpretarse únicamente en términos de bienestar, sino como un factor directamente relacionado con la seguridad en la navegación y la continuidad de las operaciones [4].

Otra ventaja es la posibilidad de optimizar los ciclos de adiestramiento y certificación del personal. Según el artículo del CNA, los modelos de rotación de dotación permiten que las dotaciones no desplegadas dediquen tiempo específico a formación, entrenamiento y preparación previa al despliegue, sin que esto suponga una reducción de la operatividad del buque [13].

Este enfoque facilita una planificación más racional del adiestramiento, evitando que se superpongan fases de formación con periodos de alta demanda operativa. Además, permite mantener un nivel de preparación homogéneo entre dotaciones, siempre que exista una gestión adecuada de los procesos de certificación y transferencia de conocimiento [13].

La existencia de dotaciones alternativas asociadas a una misma plataforma introduce una mayor flexibilidad en la planificación operativa, al reducir la dependencia de una única tripulación para sostener la presencia en la zona de operaciones. El CBO sostiene que esta flexibilidad resulta valiosa en escenarios donde los despliegues pueden prolongarse de forma imprevista o donde se requiere una respuesta rápida ante cambios en la situación [12].

Finalmente, ambos artículos coinciden en que los modelos de rotación de dotaciones pueden contribuir a un mejor aprovechamiento de los recursos materiales ya existentes, al incrementar el número de días operativos por plataforma sin necesidad de adquirir nuevas unidades [12], [13]. Este método resulta relevante en flotas como la Armada Española, donde el número de buques es limitado y las misiones de presencia son recurrentes y previsibles.

2.2.3 Experiencias internacionales

La implantación de modelos de rotación de dotaciones no constituye una propuesta teórica aislada, sino que ha sido experimentada e implantada en distintos grados por diversas marinas, especialmente aquellas con necesidades y capacidades de presencia marítima prolongada. Analizar estas experiencias es relevante para extraer posibles lecciones aplicables en la Armada Española.

2.2.3.1 Estados Unidos: US Navy

La *US Navy* constituye el principal referente histórico en el empleo de rotación de dotaciones, especialmente en plataformas con misiones de elevada persistencia. El caso más consolidado es el de los submarinos balísticos, donde desde hace décadas se emplean dos dotaciones completas asociadas a una misma unidad, lo que permite maximizar el tiempo de patrulla sin exigir periodos excesivos de embarque a una única tripulación [4], [12].

Sin embargo, la *US Navy* también ha explorado la rotación de dotaciones en buques de superficie, con resultados desiguales y a veces desfavorables. Iniciativas como *Sea Swap* o la experimentación en patrulleros y unidades de combate litoral buscaron reducir los tránsitos improductivos y aumentar así los días de mar mediante relevos de tripulación, sin retorno del buque a su base. En algunos casos, se observó que, aun cuando se lograban incrementos puntuales de disponibilidad, se ponía de manifiesto las

dificultades organizativas, especialmente en lo relativo a continuidad del mando, mantenimiento y cohesión en las dotaciones [7], [12], [13].

Estas experiencias demuestran que la rotación de dotaciones en buques de superficie no es un modelo universalmente aplicable, sino que requiere de una adaptación a cada plataforma.

2.2.3.2 Reino Unido: Royal Navy

La *Royal Navy* ha desarrollado en los últimos años un enfoque orientado a la presencia adelantada (*forward deployment*) apoyándose en la rotación de dotaciones para sostener así despliegues prolongados en zonas de interés estratégico, como el caso del *HMS Montrose* desplegada en el Golfo Pérsico durante 1300 días en zona de operaciones, realizando 11 rotaciones de dotación [14].

Este enfoque ha permitido extender la permanencia en zona de determinadas unidades más allá de los ciclos de vida tradicionales, reduciendo tiempos de tránsito y aumentando la presencia naval. De la misma manera, la *Royal Navy* ha aplicado modelos de rotación en algunos de sus *Offshore Patrol Vessels* (OPV), diseñados explícitamente para misiones de vigilancia y presencia prolongada [15].

2.2.3.3 Otras marinas aliadas

Además de los casos estadounidenses y británico, diversas marinas aliadas han explorado modelos de rotación de dotaciones como respuesta a las limitaciones presupuestarias y estructurales de sus flotas y a la necesidad de una presencia naval continua. El artículo del CNA recoge ejemplos en marinas europeas como la alemana, la francesa o la danesa [13].

En estos casos, la rotación de dotaciones se plantea como una herramienta para maximizar el rendimiento operativo de un pequeño número de unidades. De esta manera se evitan las plataformas de mayor especialización, como se han descrito en el punto 2.2.1.1 las necesidades para una implantación efectiva del concepto de *dual crewing*.

2.3 Modelos de Optimización

La optimización constituye una de las áreas fundamentales de la investigación operativa y se basa en la selección de la mejor alternativa posible, de acuerdo con un criterio previamente definido y dentro de un conjunto de soluciones factibles [16]. Analizando su metodología, estos problemas se describen mediante una función objetivo, un conjunto de variables de decisión y una serie de restricciones que representan las limitaciones técnicas, operativas u organizativas del sistema que se está analizando. Esta estructura general se mantiene, con diversas variaciones, en la resolución de problemas de optimización [16].

El origen de los modelos de optimización tiene lugar durante la Segunda Guerra Mundial, cuando surge la necesidad de asignar recursos limitados en escenarios operativos con una gran incertidumbre y complejidad [16]. A lo largo de los años, estas técnicas se han extendido a muchos campos de la ingeniería y gestión, siendo herramientas habituales de apoyo a la toma de decisiones en sistemas con múltiples factores. Sin embargo, la forma concreta de aplicar estos modelos depende en gran medida del problema a solucionar y del nivel de detalle requerido.

En el ámbito naval, la optimización destaca su utilidad en el análisis de problemas relacionados con la planificación de personal y recursos. Se pueden distinguir dos modelos de forma general: los métodos exactos de optimización y los métodos aproximados, también llamados metaheurísticos. La elección de uno u otro método dependerá como ya se ha comentado del tamaño del problema y del grado de precisión en la solución.

2.3.1 Modelo MILP

La Programación Lineal Entera Mixta (*Mixed Integer Linear Programming, MILP*) es una de las técnicas más utilizadas dentro de la programación matemática para la resolución de problemas de optimización que incluyen decisiones discretas [16], [17]. Este método permite combinar variables

continuas con variables enteras, sobre todo variables binarias, manteniendo una formulación lineal tanto de la función objetivo como del conjunto de restricciones.

El uso de variables de tipo binario resulta adecuado para modelar las decisiones de tipo lógico, como por ejemplo la asignación o no de un tipo de recurso, activar una tarea determinada o imponer restricciones [16]. Debido a esto, los modelos MILP se aplican con frecuencia a problemas de asignación de personal, planificación de turnos y reparto de recursos, es decir, ámbitos en los que muchas decisiones no pueden representarse de forma realista con variables continuas. En estos casos, se permiten adoptar restricciones que de otra manera serían difíciles de representar.

Un modelo MILP se estructura a partir de:

- Una función objetivo lineal, orientada a minimizar o maximizar un determinado indicador de interés.
- Un conjunto de restricciones lineales que recogen las limitaciones físicas, operativas o normativas del sistema.
- Un conjunto de variables mixtas, continuas o enteras, responsables del carácter combinatorio del sistema [16], [17].

2.3.1.1 Modelo de ramificación y acotación (*Branch-and-Bound*)

El método de ramificación y acotación es la estrategia más común para resolver los problemas de optimización en los que hay variables enteras. Su objetivo es explorar de una manera ordenada todas las posibles combinaciones sin tener que evaluarlas una por una. Esta exploración tiene forma de árbol, ya que el problema se va dividiendo en problemas cada vez más pequeños. Cada punto de este árbol se llama nodo, y en estos nodos se resuelve una versión simplificada del problema donde se eliminan las restricciones de integralidad (las variables enteras toman valores continuos). El algoritmo establece dos cotas, una superior y otra inferior (*dual bound* y *primal bound*) y trata de aumentar la inferior y disminuir la superior mientras explora el árbol de soluciones [18].

En general, el proceso sigue la siguiente secuencia:

- Inicio del proceso.
- Proceso de ramificación.
- Exploración de nodos.
- Acotación y poda de ramas.
- Finalización.

Primero, se resuelve el problema relajado, lo que permite obtener un valor de referencia para la función objetivo que actúa como cota inicial (*dual bound*). Si el problema relajado no tiene solución, el problema real tampoco la tendrá [18].

Cuando aparece una variable que debería ser entera, pero no lo es, se ramifica el árbol en dos ramas. En una de estas ramas, se obliga a que la variable tome valores inferiores y en la otra a que tome valores superiores, dividiendo el espacio de soluciones en dos regiones excluyentes.

En la fase de exploración de nodos, el algoritmo va resolviendo las versiones relajadas de los problemas pendientes. Si la solución encontrada es entera y mejora la mejor solución conocida hasta ese momento, se actualiza como óptimo (*primal bound*). Si la solución no es entera, pero puede mejorar la solución de referencia, se vuelve a ramificar en ese nodo. Si la solución no mejora la obtenida anteriormente, se descarta la rama [18].

Una de las características principales de este método es la capacidad de podar ramas. Esta es la capacidad de descartar partes del árbol que no pueden producir mejores soluciones, reduciendo de forma considerable el esfuerzo computacional [18]. Esto puede ocurrir de varias maneras: puede ocurrir que

ya se haya alcanzado una solución entera o que el valor obtenido en la relajación no permita mejorar la solución.

El modelo continúa analizando nodos hasta que no quedan subproblemas pendientes. En ese momento revisa la mejor solución factible hasta el momento y la convierte en la solución óptima. Si no consigue ninguna solución factible, se determina que el problema es irresoluble.

2.3.2 *Modelo de Metaheurística*

Las metaheurísticas surgen como una respuesta práctica a los modelos de optimización cuya complejidad hace que no sea viable el uso de métodos exactos, debido al tiempo de cálculo requerido o por el tamaño del espacio de soluciones [19]. Este tipo de situaciones se suelen dar en problemas combinatorios y de ingeniería, donde el número de posibles soluciones crece de manera exponencial y la obtención de una solución óptima no es un requisito imprescindible.

De forma general, las metaheurísticas se pueden describir como procedimientos iterativos que dirigen un proceso de búsqueda apoyándose en la heurística [19]. El algoritmo va explorando el espacio de soluciones con el objetivo de localizar configuraciones de buena calidad. En este proceso, no se evalúan de forma exhaustiva todas las alternativas posibles, lo que permite que se puedan abarcar un gran número de soluciones de manera aproximada.

Uno de los aspectos a destacar en el modelo de la metaheurística es la necesidad de establecer un balance entre dos características opuestas del proceso:

- Intensificación: Explotación del espacio donde ya se han encontrado soluciones.
- Diversificación: Exploración de nuevas regiones del espacio de soluciones [19].

El equilibrio entre ambas características condiciona el rendimiento del algoritmo, ya que un desequilibrio puede conducir a una búsqueda excesivamente dispersa o al estancamiento en soluciones menos óptimas.

Debido a la propia naturaleza de las metaheurísticas, estas no garantizan la obtención de la solución óptima. El comportamiento del algoritmo escogido depende en gran medida del problema abordado y de la manera en la que se haya diseñado dicho algoritmo. El Teorema de No Free Lunch (NFL) enuncia que no existe un algoritmo de optimización que sea superior al resto de algoritmos para todos los problemas posibles, ganar en un cierto dominio implica perder en los demás [19]. Por ello, las metaheurísticas son consideradas como herramientas flexibles para la resolución de problemas determinados y no como modelos universales de optimización.

Algunas de las metaheurísticas que se aplican a modelos de optimización son las que se muestran a continuación y quedan resumidas en la Tabla 2-2.

- Búsqueda Tabú.
- Templado Simulado.
- Algoritmos genéticos.

La Búsqueda Tabú es una técnica que se basa en los métodos de búsqueda local, incorporando mecanismos de memoria. De esta forma, no se detiene cuando no encuentra mejoras en la vecindad de la solución, permitiendo continuar la exploración del espacio de soluciones cuando se alcanza un óptimo local [20].

Para evitar que el algoritmo quede encerrado en un bucle, explorando soluciones ya visitadas, se introduce la lista tabú donde quedan recogidos ciertos movimientos o restricciones que quedan prohibidos durante un número limitado de iteraciones [20]. Esta memoria es dinámica y conforme aparecen nuevos elementos, los más antiguos se van borrando.

El Templado Simulado se inspira en el proceso de enfriamiento de los metales, donde un material calentado a alta temperatura se enfría lentamente para alcanzar una estructura estable. En esta analogía,

la “energía” del sistema se asocia con el valor de la función objetivo. A diferencia de la Búsqueda Tabú, el templado introduce un componente probabilístico en la toma de decisiones: en cada iteración, el vecino seleccionado es aleatorio. Si el vecino mejora la solución actual se acepta sin condiciones. Si es peor, se puede llegar a aceptar con una probabilidad que depende de la diferencia entre la función objetivo y un parámetro denominado temperatura [20].

Al inicio del proceso, la temperatura es elevada y por tanto la probabilidad de admitir soluciones peores es mayor [20]. Esto permite que se pueda explorar el espacio de soluciones de una manera amplia y evitar los óptimos locales. Conforme avanza, la temperatura descende y la probabilidad disminuye, centrándose en mejorar la mejor región encontrada.

Por último, los Algoritmos Genéticos están inspirados en la evolución natural. En vez de trabajar con una única solución, trabajan con una población completa de soluciones que son candidatas. Cada solución se representa como una estructura codificada parecida a los genes, valorando a cada individuo según su aptitud, que está asociada a la función objetivo [20].

Con cada generación, se seleccionan los individuos que se van a reproducir, teniendo prioridad aquellos con mejor rendimiento, proceso conocido como selección natural. Esta reproducción genera nuevos individuos con las características de sus antecesores. La mutación produce pequeñas modificaciones aleatorias con baja probabilidad, para mantener la diversidad y prevenir que converja prematuramente el algoritmo [20]. Con el paso de las generaciones, los menos aptos son eliminados y reemplazados por aquellos mejores candidatos, mejorando progresivamente la población.

Tipo	Concepto	Mecanismo de escape	Características
Búsqueda Tabú	Búsqueda local con memoria	Lista tabú que prohíbe movimientos recientes	Evita ciclos y escapa de óptimos locales
Templado Simulado	Analogía con el templado de metales	Acepta soluciones peores en función de la temperatura	Exploración aleatoria y controlada
Algoritmos Genéticos	Evolución biológica y selección natural	Cruce y mutación de soluciones	Búsqueda basada en población

Tabla 2-2 Resumen de metaheurísticas en optimización (autoría propia, [20])

3 DESARROLLO DEL TFG

A lo largo de este capítulo se presentan los elementos necesarios para construir el modelo de análisis del TFG. Primero se describe el contexto operativo del BAM, así como el problema de personal en la Armada. A continuación, se plantean los modelos de optimización para estudiar la influencia de la organización de dotaciones en la disponibilidad del buque.

3.1 Análisis operativo del BAM

Este apartado tiene como objetivo definir y cuantificar el marco operativo real del BAM, de manera que se pueda utilizar como sistema de partida para el estudio en los modelos de optimización que se desarrollarán en apartados posteriores. Se pretende de esta manera describir el uso actual de la plataforma y su manera de empleo, identificando los principales condicionantes ya sean temporales, técnicos o humanos que afectan a la disponibilidad del buque.

Para ello se analiza la información recogida en el Concepto de Apoyo Logístico del Programa BAM y se complementa dicha información con el histórico de misiones del Anexo IV: Cronología operativa de la clase BAM.

3.1.1 Horizonte temporal

Como punto de partida para el modelo de optimización se debe acotar el estudio, escogiendo un horizonte temporal que abarca dos años (730 días). La elección de dicho horizonte se debe a la necesidad de representar de forma realista el ciclo operativo actual de un BAM, de manera que englobe un periodo de inmovilización y mantenimiento programado y un despliegue prolongado en el Golfo de Guinea, que no tienen por qué quedar reflejados en un horizonte temporal de un año natural.

El Concepto de Apoyo Logístico establece que los PIPs del BAM se planifican en periodos bianuales con el objetivo de minimizar la indisponibilidad del buque debido a los mantenimientos y optimizar el sostenimiento de la plataforma [21].

Desde un punto de vista operativo, se puede descomponer el ciclo del BAM de manera simplificada en tres periodos bien diferenciados:

- Periodo de Despliegue, PD: Engloba tanto días de navegación como los días en escalas logísticas.
- Periodo de Puerto, PP: Se tienen en cuenta los días de descanso de la dotación y los días dispuestos para el adiestramiento de la tripulación.
- Periodo de Mantenimiento, PM: Se trata del periodo de inmovilización programada del buque.

3.1.2 Actividad operativa

El BAM se diseñó para misiones de presencia prolongada como se ha comentado en apartados anteriores. Su misión actual y prioritaria actualmente es la misión del Golfo de Guinea como aparece recogido en Anexo IV: Cronología operativa de la clase BAM. La cronología muestra que los despliegues habituales presentan una duración variable alrededor de los cuatro meses de duración. Según el Concepto de Apoyo Logístico, las condiciones de operación prevista de acuerdo al Requisito de Estado Mayor (REM) son las que se describen en la Tabla 3-1.

ACTIVIDAD	PAZ	CRISIS/GUERRA
En la mar	35%	80%
Puerto (alistamiento en menos de 72h)	35%	10%
Mantenimiento	30%	10%

Tabla 3-1 Perfil de utilización previsto de acuerdo al REM [21]

3.1.3 Mantenimiento

Uno de los factores de la elevada disponibilidad del BAM es debido al mantenimiento preventivo que se realiza en este, mediante la integración de funciones con el SICP. Según el Concepto de Apoyo Logístico, se contemplan la duración de los diferentes tipos de mantenimiento del BAM [21]:

- después de un despliegue de misión, un periodo inferior a tres semanas.
- Para un PIP, un máximo de ocho semanas.
- En caso de PIP+Varada, se realizará cada cuatro años con un periodo no superior a doce semanas.

3.1.4 Personal

Debido a que la dotación de los BAM no es continua y varía en función del número de la clase, se establecerá como estándar común el número de personal reflejado en la Plantilla Orgánica de la clase BAM que se encuentra en el Anexo V: Plantilla Orgánica de la clase BAM y que viene definida en el Manual de Organización de la clase BAM con un valor de 51 personas [8].

3.2 El problema de personal en la Armada

La disponibilidad y gestión del personal es uno de los factores más importantes para garantizar el funcionamiento de las Fuerzas Armadas, FFAA. En el caso específico de la Armada, este aspecto es todavía más importante debido a las características y el entorno en el que se desarrolla el empleo.

Según el informe del año presentado en 2024 por el Observatorio de la Vida Militar, OVM, la Armada cuenta con alrededor de 21.000 efectivos [22], como se puede observar en la Figura 3-1. En esta cifra también se encuentran incluidos tanto el personal en instalaciones en tierra como el perteneciente al cuerpo de Infantería de Marina.

EFFECTIVOS DE PERSONAL MILITAR EN SERVICIO ACTIVO A 1 ENERO 2025

	Ejército de Tierra	Armada	Ejército del Aire y del Espacio	Cuerpos comunes de las FAS	TOTAL
<i>Oficiales Generales</i>	99	55	48	25	227
<i>Oficiales</i>	6802	2788	2662	2325	14577
<i>Suboficiales</i>	14505	4334	6407	606	25852
TOTAL Oficiales Generales, Oficiales y Suboficiales	21.406	7.177	9.117	2.956	40.656
<i>Tropa y Marinería Permanente</i>	8.070	2.811	2.541		13.422
<i>Tropa y Marinería Compromiso Larga Duración</i>	25.519	5.795	4.151		35.465
<i>Tropa y Marinería Compromiso Inicial</i>	18.095	4.589	4.512		27.196
TOTAL Militares de Tropa y Marinería	51.684	13.195	11.204		76.083
TOTAL	73.090	20.372	20.321	2.956	116.739

Figura 3-1 Personal de las FFAA en activo a 1 enero 2025 [22]

El reparto de personal dentro de la Armada a 1 de enero del 2025 fue de 2.843 oficiales, 4.344 suboficiales y 13.195 miembros de tropa y marinería [22]. Aunque más allá de las cifras globales, el problema de personal radica principal en tres aspectos que se desarrollarán a lo largo del apartado: el desgaste profesional del personal, la pérdida de profesionales hacia el sector civil y las dificultades para compatibilizar la vida familiar con las exigencias de las unidades embarcadas.

3.2.1 El desgaste del personal

Uno de los problemas menos visibles, pero más importantes es el desgaste profesional, conocido coloquialmente como *burnout*. Este problema surge cuando una persona está expuesta mucho tiempo a situaciones de estrés o fatiga laboral intensa. La persona termina acarreado un agotamiento físico y emocional, haciendo que pierda la motivación y se desconecte del trabajo que realiza [23]. En el ámbito militar, el *burnout* resulta muy complejo de detectar, ya que muchos rasgos que lo favorecen (responsabilidad, vocación de servicio, implicarse personalmente) son cualidades que se valoran dentro de las FFAA [23].

A bordo de un buque de guerra, la vida profesional y personal se desarrollan en el mismo espacio durante largos periodos de tiempo. A este tipo de entornos se les conoce como “instituciones totales” donde los trabajadores comparten su vida cotidiana dentro de un sistema organizativo [23]. Esto se traduce a que, durante la navegación, la dotación del buque apenas tiene oportunidades para desconectar del trabajo debido a la convivencia constante con el personal, las guardias y el estrés de la operación o de los ejercicios.

El desgaste del personal se puede ver reflejado en la gráfica de la Figura 3-2 realizada por el AN Bacita Bacita, donde muestra la cobertura de los BAM de las Islas Canarias a lo largo del 2023 [24]. Se puede observar como la cobertura descende progresivamente, aunque el descenso de esta cobertura no se deba completamente al burnout, sino a una suma de los factores que se desarrollan durante este capítulo.

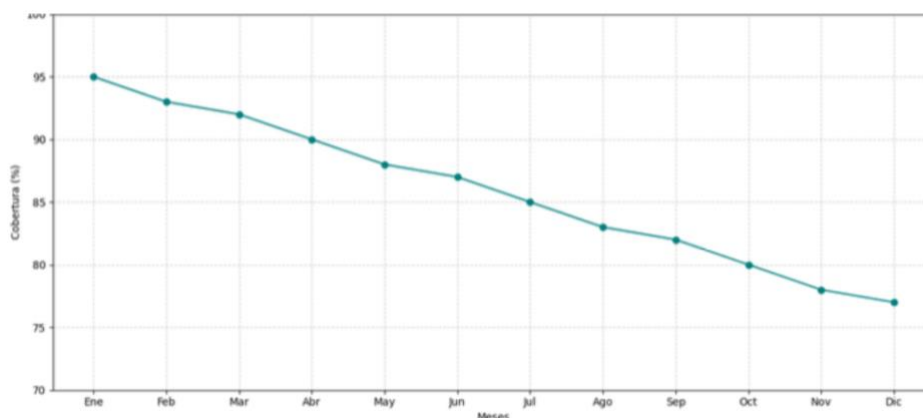


Figura 3-2 Gráfico de tendencia de cobertura de personal año 2023 [24]

3.2.2 Crisis de captación y fuga de talento

La dificultad de la Armada para atraer y retener profesional es otro de los problemas a los que se enfrenta en esta década. En los últimos años se ha observado la tendencia de que los militares con formación opten por abandonar las FFAA a cambio de un puesto en el sector civil, provocando una “fuga de talento” [25].

Según el análisis que realiza el CC García Tobío, sobre la demografía española, en la próxima década podrían generarse más de 200.000 empleos de alta cualificación para jóvenes de 16-34 años, mientras que la población de ese grupo se habrá reducido en torno a 1,5 millones respecto a 2010 [25]. Este desequilibrio entre oferta y demanda hace que los organismos públicos y las empresas privadas tengan una mayor competitividad por la adquisición del personal [25].

Además de la fuga de talento, se suma la reducción en el interés por acceder a la carrera militar. Según estadísticas del OVM, en 2024 las solicitudes de acceso directo a la escala de oficiales descendieron un 8,5% [22]. En la Figura 3-3 se puede observar cómo este descenso también se hace notar en la tropa y marinería, descendiendo la ratio por plaza de 28 a 4,2 en 10 años.



Figura 3-3 Ratio por plaza ofertada de tropa y marinería [22]

Este descenso se puede deber a que las nuevas generaciones priorizan la estabilidad geográfica y la conciliación familiar en su estilo de vida, aspectos donde la Armada no puede competir contra la empresa privada [25]. La disminución de personal también se refleja en la disponibilidad real de las dotaciones de los buques. El análisis realizado por el AN Bacita con los datos proporcionados de las dotaciones de

los BAM de Canarias muestra en la Figura 3-4 la tendencia progresiva a la reducción de efectivos disponibles en todas las unidades analizadas [24].

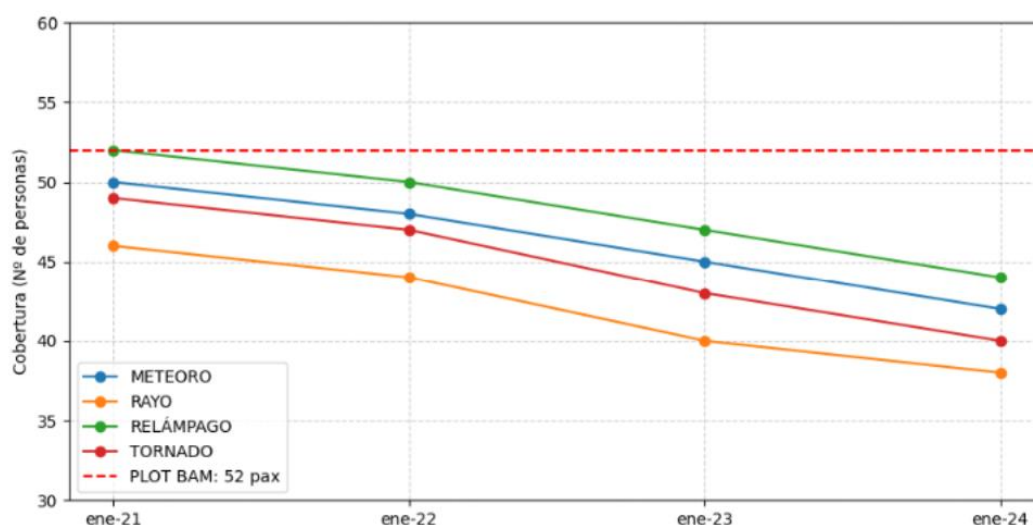


Figura 3-4 Situación de personal en unidades BAM de Canarias [24]

3.2.3 Conciliación familiar

El último de los principales factores que influye en la disponibilidad del personal es la aplicación de medidas de conciliación familiar. Estas medidas, reguladas por varias normas dentro de las FFAA suponen un avance en cuanto a derechos laborales, pero también producen dificultades al mando cuando se aplican en unidades operativas. Cuando falta un miembro de la dotación, el resto del personal debe asumir sus funciones, traduciéndose en un aumento de la carga de trabajo y acumulación de fatiga [26].

Para compensar estas ausencias se recurre a las comisiones de servicio. Con estas comisiones, el personal de otras unidades es enviado temporalmente a un buque antes de una navegación. Sin embargo, este sistema no siempre resulta eficaz, ya que los buques aportadores también pueden sufrir déficit en sus dotaciones [26].

Además, el factor de la movilidad geográfica obligatoria influye cada vez más en la permanencia del personal. En ciudades como Madrid, Rota o Cartagena obtener vivienda a un precio asequible es cada vez más difícil y las residencias militares se encuentran en límites de ocupación elevados [26]. Las ayudas al alquiler ya son insuficientes en muchos casos para compensar el aumento de precio que sufre la vivienda. Por ello, muchos militares optan por trasladarse solos a su destino mientras que las familias permanecen en la ciudad de origen. Esta solución puede ser viable a corto plazo, pero a la larga puede afectar tanto a la calidad de vida del personal como a su motivación para continuar en la Armada.

Por este motivo, abordar el problema del personal requiere de una perspectiva global que combine mejoras organizativas, incentivos profesionales y medidas que ayuden a hacer más sostenible la carrera militar a largo plazo. Con el objetivo de analizar este problema de manera cuantitativa, se desarrollan los modelos de optimización para observar diferentes opciones en la gestión del personal.

3.3 Modelos de optimización

Antes de desarrollar un modelo de optimización basado en el modelo MILP, es necesario desarrollar un modelo básico que sea capaz de aproximarse al problema de manera gradual. Este modelo tiene como objetivo principal entender cómo se comporta el sistema de manera sencilla, para que sirva como una base sólida sobre la que construir modelos más complejos.

3.3.1 Modelo Básico

Este modelo básico se apoya en la manera de funcionamiento del BAM, representando de manera simplificada la operatividad del buque sin entrar en restricciones complejas y formulaciones matemáticas complejas. La simplificación del problema permite clarificar el problema que más adelante se resolverá, identificando las variables más importantes y comprendiendo las relaciones entre estas que influyen en la operatividad del buque.

En este modelo, no se busca una solución óptima, sino comparar diversos escenarios de manera coherente. El modelo básico es un paso intermedio entre el análisis operativo previo realizado en el apartado anterior y el modelo completo de optimización.

Para la realización de este modelo, definiremos en los párrafos siguientes los siguientes conceptos:

- horizonte temporal, T .
- Estados del buque, D .
- Disponibilidad técnica, D_{disp} .
- Factor de empleo humano, φ .

El modelo básico se plantea con un horizonte temporal de 730 días que se mantendrá fijo para todos los escenarios. Este parámetro fijado y definido en el análisis operativo anterior representa el funcionamiento del BAM y se utiliza como marco común del estudio. El horizonte temporal queda definido como parámetro:

$$T = 730 \text{ días}$$

En este modelo y en los posteriores, la unidad indivisible del tiempo será representada en días. Cada día se asocia a un único estado operativo del buque, que ejemplifica la actividad de dicho buque durante ese día. Se realiza esta elección de unidad temporal para poder clasificar el empleo del buque a lo largo del horizonte temporal. A partir del análisis operativo previo, se definen tres estados principales del buque:

- Día de mar, D_{mar} : Aquellos días en los que el buque se encuentra navegando o de misión. Se engloban tanto los días de navegación como los días de puertos logísticos. Este estado será la variable explícita del modelo básico.
- Día de puerto, D_{puerto} : Incluye todos los días que el buque se encuentra atracado, abarcando tanto periodos de descanso como de adiestramiento del personal. Este estado será una variable implícita en el modelo básico.
- Días de mantenimiento, D_{mant} : Engloba los días en los que el buque se encuentra en su fase de PIP y aquellos días en los que se realicen otros tipos de mantenimientos donde la operatividad del buque es nula.

$$D_{mant} = D_{PIP} + D_{post} \quad (1)$$

siendo los días de mantenimiento post misión, D_{post} y los días de PIP, D_{PIP} .

Una vez definido los tres estados del buque, el horizonte temporal, T queda expresado según la ecuación (2).

$$T = D_{mar} + D_{puerto} + D_{mant} \quad (2)$$

A continuación, y en relación con la ecuación anterior, surge el concepto de la disponibilidad técnica, D_{disp} (3), que hace referencia a los periodos en los que el buque se encuentra en condiciones de navegar, es decir, es aquel periodo del horizonte temporal que no incluye los días de mantenimiento en los cuales la operatividad del buque es nula.

$$D_{disp} = T - D_{mant} \quad (3)$$

Sin embargo, que el buque se encuentre disponible técnicamente no implica que se pueda mantener en la mar de manera continuada, es decir, solo una fracción de D_{disp} pueden ser días de mar. Esto se debe a que entra en juego el factor de empleo humano, φ , principal cuello de botella del modelo de optimización. Este parámetro engloba todos los parámetros relativos a la fatiga, descanso, adiestramiento o conciliación familiar de la dotación del buque. De esta manera, el número de días en la mar queda limitado de la siguiente manera (4):

$$D_{mar} \leq \varphi \cdot D_{disp} \quad (4)$$

Este factor de empleo humano dependerá del modelo de dotación que se utilice en el buque. Para comparar los modelos de dotaciones, se consideran dos valores distintos, siendo:

- factor de dotación única, $\alpha \in [0,1]$,
- factor de doble dotación, $\beta \in [0,1]$,

cumpléndose en todo momento que $\alpha < \beta$. Como no existen datos públicos completos para poder establecer un valor discreto de estos factores, se adopta un análisis por escenarios. Estos escenarios son el conservador, el realista y el óptimo y su asignación numérica e influencia en los resultados se desarrollarán en el apartado 4.1.1.

Una vez definidos los conceptos anteriores, se define la única variable de decisión de este modelo: el número de días de mar que realiza el buque durante todo el horizonte temporal, D_{mar} (5). Se elige dicha variable porque sirve como un indicador directo de la operatividad del BAM, al estar ligada a despliegues y misiones.

$$D_{mar} \geq 0 \quad (5)$$

De esta manera, para el modelo básico se puede representar la función objetivo de manera simple como la maximización de los días de mar del buque (6), sin tener en cuenta el bienestar de la dotación del buque.

$$\max (D_{mar}) \quad (6)$$

Una vez definida la función objetivo del modelo básico, continúan las restricciones de dicho modelo que delimitan el espacio de soluciones. Las restricciones se recogen a continuación:

1. Restricción del balance temporal.
2. Restricción de disponibilidad técnica.
3. Restricción del factor humano.
4. Restricción de no negatividad.

La primera restricción considera un horizonte temporal fijo dividido en diferentes periodos, de modo que se garantiza que todos los días queden asignados dentro de un periodo, sin que un día pueda pertenecer a dos estados a la vez como se define en la ecuación (2).

La restricción de la disponibilidad técnica responde a la operatividad nula del buque en su periodo de mantenimiento, estableciendo un límite en la capacidad de empleo del buque. Como consecuencia, el número de días de mar no puede ser superior al número de días en los que el buque se encuentra disponible (7).

$$D_{mar} \leq D_{disp} = T - D_{mant} \quad (7)$$

Como tercera restricción se introduce la limitación del factor humano a través de dos parámetros según el modelo de dotación como refleja la ecuación (4), tomando φ el valor α o β .

Además, se impone la condición $\alpha < \beta$, para reflejar como una organización más eficiente de la dotación influye sobre la capacidad de permanencia en la mar.

Por último, la restricción de no negatividad se establece por coherencia física con la ecuación (5), dado que el número de días de mar no puede ser negativo.

Una vez definido el modelo básico con su función objetivo y diversas restricciones, se puede observar como la limitación más restrictiva viene dada por la disponibilidad del buque y el modelo de dotación. De esta manera podemos analizar tres posibles resultados:

En el caso de tener una dotación única, el máximo de número de días de mar sostenibles viene dado por la ecuación (8).

$$D_{mar}^1 = \alpha \cdot D_{disp} \quad (8)$$

Quedando condicionado por la capacidad de una única dotación para sostener periodos prolongados de tiempo sin comprometer a dicho personal.

Para el caso de doble dotación (9), el factor de empleo humano, β es más favorable al cumplirse la condición $\alpha < \beta$. En este escenario el número de días de mar será:

$$D_{mar}^2 = \beta \cdot D_{disp} \quad (9)$$

La principal diferencia con el caso anterior es que la doble dotación permite distribuir el esfuerzo de la dotación para soportar periodos de tiempo más prolongados y eso resulta en un aumento en los días de mar.

Además de obtener estos dos escenarios, el modelo básico permite cuantificar el incremento de disponibilidad operativa que resulta de cambiar de una única dotación a una doble dotación y se expresa según la ecuación (10).

$$\Delta D_{mar} = D_{mar}^2 - D_{mar}^1 = (\beta - \alpha) \cdot D_{disp} \quad (10)$$

De esta manera, se observa como el aumento de días de mar depende principalmente de la diferencia entre ambos factores. Cuanto mayor capacidad tenga el sistema de doble dotación para aumentar la operatividad del buque, mayor será el margen de incremento.

3.3.2 Modelo MILP

El problema que se aborda en este trabajo requiere planificar el empleo del BAM durante un periodo finito. Las decisiones discretas de este problema están interrelacionadas y sujetas mediante restricciones, tanto técnicas como humanas, como ya se aproximó mediante el modelo básico. Esta combinación de restricciones lógicas, decisiones binarias y dependencia temporal hace que la resolución del problema no se pueda abordar de manera trivial mediante enfoques simples de planificación. Como consecuencia, se utiliza el modelo MILP para poder representar de forma explícita las interdependencias.

3.3.2.1 Modelado

Con el objetivo de definir el problema y antes de explicar tanto variables como restricciones mediante fórmulas matemáticas, se introduce el problema de manera que sea más comprensible a través de los puntos que se observan en la Figura 3-5.

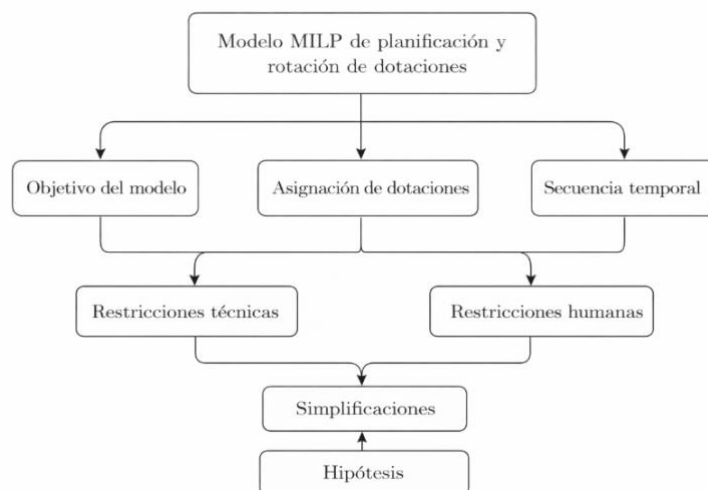


Figura 3-5 Esquema del modelado del MILP (autoría propia)

El objetivo de este modelo es disponer de una herramienta que sirva de apoyo y permita analizar el efecto de distintas configuraciones de dotación sobre la disponibilidad operativa del buque, considerando distintos escenarios como en el modelo básico. De esta manera, la planificación óptima se basa en mejorar la disponibilidad operativa, entendida como la capacidad del buque para cumplir su misión de manera prolongada, manteniendo los periodos de mantenimiento establecidos y sin exigir un esfuerzo excesivo a las dotaciones.

Este modelo se basa en la asignación diaria de la dotación que se encuentra activa en el buque. De esta forma permite identificar en cada momento qué dotación es la responsable del buque, un aspecto importante a la hora de plantear la rotación de las dotaciones de forma que aumente la disponibilidad del buque.

La asignación de la dotación se realiza mediante la misma unidad temporal introducida en los apartados anteriores, el día, de manera que para cada uno de los días está definida la dotación activa en cada momento. Mediante este planteamiento, se permite analizar tanto el empleo del buque como la carga de trabajo asumida por cada dotación. La dotación activa engloba al personal responsable tanto de la operación como de la seguridad y mantenimiento del buque durante un periodo determinado de tiempo. Se asigna una sola dotación activa por día con motivo de simplificar el problema, sin que esto afecte a los aspectos más relevantes de éste como la acumulación de días de navegación y la necesidad de periodos de descanso tras despliegues prolongados. De esta manera, la asignación de la dotación sujeta a condiciones de permanencia mínimas y permite introducir restricciones relacionadas con la sostenibilidad del factor humano y otras restricciones temporales que se desarrollarán posteriormente.

En relación con la planificación del empleo del buque, esta no depende únicamente del número total de días asignados a cada estado operativo a cada dotación sino también del orden en el que se desarrollan dichos acontecimientos a lo largo del tiempo. Por este motivo, el modelo MILP incorpora de forma explícita no solo qué ocurre en cada día, sino también cómo se encadenan estos días a lo largo del horizonte temporal.

Desde un punto de vista operativo, la secuencia de estados del buque es un aspecto clave para garantizar una utilización realista del buque. La alternancia entre los estados de navegación, puerto y mantenimiento viene dada por necesidades técnicas y logísticas que no pueden modelarse adecuadamente si se analizan de manera aislada o simplemente como valores agregados. Con este requisito, el modelo permite diferenciar entre planes de empleo que, aun teniendo los mismos días de mar, tienen una distribución temporal distinta dando como resultado configuraciones más o menos viables y coherentes con el uso operativo real del buque.

Así mismo, la secuenciación temporal de las dotaciones activas también es un elemento fundamental del modelo, ya que no se plantea como una alternancia de un día para otro sino como un proceso con una permanencia mínima de cada dotación. Esta permanencia mínima refleja la forma habitual de operar en un buque, manteniendo una continuidad en el mando y acercando a la realidad el modelo.

Tanto la secuenciación temporal de los estados del buque como la de las dotaciones permiten representar la dinámica del buque y descartar soluciones que, aun siendo óptimas desde un punto de vista numérico, no serían practicables en la realidad.

Este modelo también incluye una serie de restricciones técnicas con el objetivo de asegurar que los resultados obtenidos sean coherentes con las limitaciones reales del buque. Estas restricciones agrupan tanto las necesidades asociadas al mantenimiento como las incompatibilidades existentes entre estados operativos.

En primer lugar, se tiene en cuenta la existencia de los PIPs, necesarios para garantizar la operatividad del buque a medio y largo plazo. Durante estos periodos la operatividad del buque es nula, pues no puede llevar a cabo navegaciones. El mantenimiento no está considerado como una actividad puntual, sino como un proceso con una duración mínima y continua para evitar una fragmentación en intervalos que lo alejaría de la realidad planteada en el análisis técnico.

En segundo lugar, el modelo contempla la imposibilidad de operar en diferentes estados de forma simultánea. A cada día del horizonte temporal le corresponde un único estado operativo (navegación, puerto o mantenimiento). De esta manera se garantiza una coherencia en el plan de empleo del buque a la vez que se simplifica el modelo al igual que en el caso de la asignación de dotaciones.

Por último, como en la asignación de dotaciones, también se introduce una permanencia mínima en los estados de navegación y mantenimiento para que sean efectivos, de manera que no se alternen los estados entre sí. Así se evita que el modelo se aleje de la forma real de operar del buque.

Además de las limitaciones técnicas derivadas del empleo realista del buque, hay que tener en cuenta las restricciones provenientes de un uso sostenible de la dotación. Como se vió en el análisis operativo y se desarrolla en el modelo básico, el factor humano tiene un gran peso en la disponibilidad operativa del BAM. Por ello, cualquier incremento en los días de navegación debe analizarse teniendo en cuenta el impacto que tiene sobre el personal activo.

Este modelo contempla un número máximo de días consecutivos de navegación para cada dotación. El objetivo de esta restricción es evitar las situaciones de sobrecarga, evitando de esta manera que afecte de forma negativa a la dotación y a la seguridad del buque. Este límite favorece también una distribución más equilibrada de los periodos de navegación en el caso de doble dotación.

Como ya se comentó, se incluyen periodos mínimos de descanso tras fases prolongadas de actividad en la mar, representando de manera agregada la necesidad de recuperación física y mental del personal. Con estos periodos, se garantiza que las soluciones obtenidas no solo sean óptimas desde un punto de vista matemático, sino que sean también coherentes con una gestión responsable del personal. De este modo, el análisis no se limita a cuantificar cuántos días puede operar el buque, sino que también tiene en cuenta bajo qué condiciones de esfuerzo y descanso se alcanzan dichos niveles, modelando de manera más realista y útil el problema de cara a la toma de decisiones.

Una vez comentadas las restricciones sobre las que se fundamenta el MILP y con el fin de desarrollar un modelo manejable, se ha optado por excluir determinados factores que, aun estando presentes en la vida real, no son determinantes para el análisis de la planificación temporal y la rotación de dotaciones.

En cuanto al tipo de misión, el modelo no entra en detalle sobre los distintos cometidos que el buque desarrolla durante los periodos de navegación. Como caso particular, se introduce una misión de referencia en el Golfo de Guinea asociada a la presencia y vigilancia marítima extraída del histórico de misiones del Anexo IV: Cronología operativa de la clase BAM. Esta misión se establece como condición

en la planificación, obligando a que cada dotación participe como mínimo una vez en este despliegue a lo largo del horizonte temporal establecido. El resto de misiones o despliegues queda englobado dentro del concepto de días de navegación o días de mar al considerarse que no suponen un cambio significativo en la lógica del modelo. Introducir múltiples misiones con características específicas implicaría un aumento de la complejidad del modelo, tanto en número de variables como de restricciones, sin que ello suponga una mejora notable en el modelo.

De igual manera, la meteorología no se incluye de forma explícita. Aunque las condiciones ambientales influyen en la ejecución de las operaciones, tienen una elevada incertidumbre que hace inviable su integración en un modelo determinista. Asimismo, tampoco se consideran las averías e incidencias técnicas imprevistas dado que este tipo de eventos requeriría un modelo estocástico. Por ello, se asume que el impacto de estas averías queda englobado dentro de los PIPs.

Estas simplificaciones se adoptan con el motivo de centrar el análisis en los elementos relevantes para el objetivo del modelo. No se busca reproducir con todo detalle la operación real de un buque sino evaluar de manera clara cómo la planificación del tiempo y la rotación de dotaciones influyen sobre la disponibilidad operativa. A modo de resumen las hipótesis quedan recogidas en la Tabla 3-2.

Hipótesis	Descripción	Justificación
Horizonte temporal discreto	El periodo de planificación se representa con una sucesión de días consecutivos	El día como unidad temporal permite simplificar y entender mejor el problema
Un único estado operativo diario	En cada día el buque se encuentra solamente en un estado operativo (navegación, puerto o mantenimiento)	Asegura una representación coherente y simplifica el modelo
Una única dotación activa por día	Cada día se asigna una sola dotación responsable del buque, pudiendo estar el buque sin dotación en mantenimiento corto	Evita solapamientos irreales y permite relajar de carga a las dotaciones tras una misión
Estados de navegación agregados	No se distinguen cometidos operativos salvo una misión de referencia	La diferenciación detallada de misiones no modifica de forma relevante la planificación del empleo del buque
Límite de días consecutivos de mar	Se establece un máximo de días de navegación continuada por dotación	Ayuda a preservar la sostenibilidad del esfuerzo humano
Recuperación de descanso en puerto	Tras fases prolongadas de días de mar se requieren días de descanso	Representa la recuperación física, mental de la dotación
Mantenimiento planificado continuo	Los PIPs tienen duración mínima y no se fragmentan	Refleja la realidad técnica del buque y evita soluciones poco realistas
Exclusión de meteorología explícita	No se modelan condiciones meteorológicas	Su incertidumbre dificulta un enfoque determinista
Exclusión de averías imprevistas	No se consideran fallos no programados	Requerirían un modelo estocástico

Tabla 3-2 Hipótesis del modelo MILP (autoría propia)

3.3.2.2 Parámetros

Antes de formular las variables de decisión y las restricciones que estructuran el modelo MILP, se definen los parámetros para establecer el marco donde se va a trabajar. Estos parámetros son valores que

se conocen con anterioridad, fijados en función de criterios operativos. De esta forma, se puede adaptar el modelo a diferentes escenarios sin modificar la estructura del modelo cambiando los valores.

El modelo se plantea sobre un horizonte temporal discreto, medido en días. Cada día se representa mediante el índice t .

$$T \in \mathbb{N}$$

$$t = 1, 2, \dots, T$$

También se define el conjunto de dotaciones disponibles, d , para operar el buque. El valor D será el parámetro responsable para analizar distintos escenarios de organización de personal. Con este parámetro podemos analizar tanto el escenario de una única dotación como el de rotación de dotaciones.

$$D \in \mathbb{N}$$

$$d = 1, 2, \dots, D$$

Para evitar escenarios que se alejen de la realidad, se establecen duraciones mínimas, L , para los mantenimientos del buque definidos anteriormente.

$$L_{MC} \in \mathbb{N}$$

$$L_{PIP} \in \mathbb{N}$$

De la misma manera que con los escenarios, se necesitan parámetros asociados a las dotaciones, un parámetro para el número máximo de días consecutivos de navegación que sirve como cota superior para la fatiga del personal, S_d , y un mínimo de días de descanso en puerto tras regresar de una navegación, R_d . Con estos parámetros se permite regular condicionantes que afectan de manera directa a la disponibilidad del buque.

$$S_d \in \mathbb{N}$$

$$R_d \in \mathbb{N}$$

También se debe definir la duración total de la misión del Golfo de Guinea, L_G .

$$L_G \in \mathbb{N}$$

Por último, se define un coeficiente de ponderación, α , que sirve para penalizar el exceso de esfuerzo humano en la función objetivo que se definirá en el punto 3.3.2.4. Con este parámetro se busca buscar un equilibrio entre la disponibilidad operativa y la sostenibilidad del esfuerzo humano. También se define el parámetro φ , que define qué se considera excesivo. Si α es el castigo por cada día de sobreesfuerzo de la dotación, φ es la regla que define qué se considera sobreesfuerzo.

$$\alpha \geq 0$$

$$\varphi \in (0, 1)$$

3.3.2.3 Variables de decisión

Una vez con los parámetros y con las hipótesis del problema definidas, el modelo MILP se forma a partir de un conjunto de variables de decisión. Estas variables permiten describir de forma explícita el uso del BAM día a día a lo largo del horizonte temporal.

En primer lugar, las variables asociadas al estado operativo del buque. Este primer grupo describe el estado en el que se encuentra el buque en cada uno de los días del horizonte temporal. Como estos estados son mutuamente excluyentes, se han empleado variables binarias.

- Navegación, N : Indica si el buque se encuentra en navegación durante el día t . Toma un valor 1 cuando el día corresponde a un día de mar y 0 en caso contrario.

$$x_t^N \in \{0,1\}$$

- Puerto, P: Toma el valor 1 cuando el buque permanece en puerto durante el día t , y el valor 0 en caso contrario.

$$x_t^P \in \{0,1\}$$

- PIP: Toma el valor 1 cuando el buque se encuentra en una fase de PIP durante el día t , y 0 en caso contrario.

$$x_t^{PIP} \in \{0,1\}$$

- Mantenimiento corto, MC: Representa los días que el buque está en mantenimiento, ya sea post-misión u otros periodos de mantenimiento preventivo de corta duración. Toma el valor 1 en dichos casos.

$$x_t^{MC} \in \{0,1\}$$

Una vez definidos los estados del buque, hay que relacionarlos con la dotación activa en cada momento. Para ello se introducen variables para identificar qué dotación es la responsable del buque, permitiendo analizar la rotación de dotaciones y la carga de trabajo. De esta manera también se consigue evitar rotaciones poco realistas entre dotaciones.

- Dotación activa: Indica qué dotación está a cargo. Toma el valor 1 si la dotación d es la dotación activa durante el día t , y el valor 0 en caso contrario.

$$y_{d,t} \in \{0,1\}$$

- Dotación navegando: Facilita contabilizar los días de mar de cada dotación, permitiendo analizar la cantidad de esfuerzo humano de cada rotación. Toma valor 1 si la dotación d se encuentra navegando en el día t , y valor 0 en caso contrario.

$$z_{d,t} \in \{0,1\}$$

- Inicio de activación: Variable binaria utilizada para indicar el inicio de un periodo de activación para la dotación d , el día t .

$$i_{d,t} \in \{0,1\}$$

- Fin de activación: Variable binaria utilizada para indicar el final de un periodo de activación para la dotación d , el día t .

$$f_{d,t} \in \{0,1\}$$

Dado que el modelo organiza el calendario completo, la misión no se fija previamente, sino que se determina mediante:

- Periodo de misión: la variable toma valor positivo si el buque se encuentra de misión.

$$m_t \in \{0,1\}$$

Para garantizar una permanencia mínima de los distintos estados y la permanencia de la misión, se incluyen unas variables auxiliares que indican el inicio del estado:

- Inicio de la misión: $i_t^G \in \{0,1\}$
- Inicio de mantenimiento corto: $i_t^{MC} \in \{0,1\}$
- Inicio de PIP: $i_t^{PIP} \in \{0,1\}$
- Inicio de navegación: $i_t^N \in \{0,1\}$

Por último, para incorporar al modelo una medida del esfuerzo humano por la fatiga de la navegación, se introduce una variable auxiliar F_d que recoge las situaciones de sobrecarga para cada

dotación. No actúa como una restricción que impide navegar, sino como un mecanismo que penaliza si se navega más de la cuenta.

$$F_d \geq 0 \quad \forall d$$

Para limitar el número máximo de días consecutivos de navegación por dotación, se introduce la variable continua $fatiga_{d,t}$, acotada en su límite superior por S_d .

$$fatiga_{d,t} \geq 0$$

3.3.2.4 Función objetivo

El objetivo principal del modelo es aumentar la disponibilidad del buque maximizando los días de mar que navega durante el horizonte temporal. Sin embargo, también se debe tener en cuenta la sobrecarga que generan estos días de mar en la dotación como se ha comentado con anterioridad.

Los días de navegación se han introducido mediante la variable x_t^N , quedando el total de días de mar expresado con la ecuación (11).

$$\sum_{t=1}^T x_t^N \quad (11)$$

Para medir la sobrecarga de la dotación, primero se calculan los días de mar de cada dotación, M_d , mediante la variable $z_{d,t}$, que toma valor positivo cuando la dotación d está navegando.

$$M_d = \sum_{t=1}^T z_{d,t} \quad \forall d \quad (12)$$

El umbral máximo de días sostenible para cada dotación se calcula como:

$$\varphi \cdot T \quad (13)$$

La variable F_d definida anteriormente se vincula con la ecuación (12) y (13) de manera que, si la dotación no supera un umbral mínimo de días, $F_d = 0$ y si lo supera tomará el valor del exceso (14)

$$F_d \geq M_d - \varphi \cdot T \quad \forall d \quad (14)$$

Teniendo en cuenta estos aspectos, la función objetivo del modelo queda expresada con la ecuación (15).

$$\max Z = \sum_{t=1}^T x_t^N - \alpha \sum_{d=1}^D F_d \quad (15)$$

El primer término favorece los días de navegación mientras que el segundo penaliza según el exceso de esfuerzo humano, ponderando con el parámetro α según se quiera dar más peso a la navegación o al personal.

3.3.2.5 Condiciones iniciales

Con las variables del modelo ya definidas, se deben establecer los valores en el estado inicial del sistema $t = 0$, representando la situación de partida del modelo. De este modo, se evitan posibles errores al inicio del problema.

En el momento inicial, las dotaciones comienzan el horizonte temporal sin una carga previa. Se fija la variable acumulativa de la fatiga de modo que:

$$fatiga_{d,t} = 0 \quad \forall d$$

3.3.2.6 Restricciones

Para que el modelo se acerque a la realidad, es necesario añadir un conjunto de restricciones que reflejen las limitaciones de la operación del buque. Estas restricciones acotan las soluciones posibles para evitar situaciones que en la realidad no serían viables.

Estas restricciones se plantean, al igual que las variables, con un orden. Comenzando con las restricciones básicas para la coherencia del modelo y añadiendo después aquellas restricciones relacionadas con los aspectos técnicos, de mantenimiento y de personal.

Como los estados considerados (navegación, puerto, mantenimiento corto y PIP) son excluyentes entre sí y cubren todas las situaciones posibles, el buque solo se puede encontrar en uno de ellos cada día. Esta condición evita que el buque se encuentre en una configuración indeterminada, con varios estados asignados simultáneamente o sin un estado definido. De esta manera, cada jornada queda asignada a un estado, lo que sirve de base para el resto de restricciones técnicas y de gestión del personal.

La unicidad de estado (16) se impone exigiendo que, para cada día, la suma de las variables binarias de los diferentes estados sea igual a la unidad.

$$x_t^N + x_t^P + x_t^{PIP} + x_t^{MC} = 1 \quad \forall t \quad (16)$$

A diferencia que la unicidad de estado, la asignación de dotaciones no se modela mediante una unicidad diaria. El modelo permite que, en determinadas situaciones, no haya una dotación activada. En la ecuación (17) se exige que haya una dotación activa cuando el buque se encuentra navegando o en PIP. También se impide que haya dotaciones activas en los mantenimientos cortos a través de la ecuación (18).

$$\sum_{d=1}^D y_{d,t} \geq x_t^N + x_t^{PIP} \quad \forall t \quad (17)$$

$$\sum_{d=1}^D y_{d,t} \leq 1 - x_t^{MC} \quad \forall t \quad (18)$$

Además, se debe asegurar una compatibilidad entre el estado de navegación y la dotación relacionando las variables $z_{d,t}, y_{d,t}, x_t^N$. En la ecuación (19), se impone que una dotación no puede navegar si no está activa. En la ecuación (20), se impone que la dotación no puede navegar si el buque no se encuentra en el estado de navegación. Por último, la ecuación (21) sirve para garantizar que si la dotación está activa y el buque navegando, se cuente como día de navegación para esa dotación.

$$z_{d,t} \leq y_{d,t} \quad \forall d, t \quad (19)$$

$$z_{d,t} \leq x_t^N \quad \forall d, t \quad (20)$$

$$z_{d,t} \geq y_{d,t} + x_t^N - 1 \quad \forall d, t \quad (21)$$

Al asignar una dotación, se introduce como un proceso que es continuo a lo largo del tiempo. Esto se realiza con la ecuación (22), usando las variables de inicio de activación $i_{d,t}$ y fin $f_{d,t}$. Una variación en la dotación activa entre dos días consecutivos solo puede ser por el inicio o fin de un periodo de activación.

$$y_{d,t} - y_{d,t-1} = i_{d,t} - f_{d,t} \quad \forall d, t > 1 \quad (22)$$

El modelo establece un periodo obligatorio de descanso tras una activación en la ecuación (23). Si una dotación finaliza su periodo en el día t , no podrá activarse hasta que pasen R_d días.

$$\sum_{k=t}^{t+R_d-1} y_{d,k} \leq R_d \cdot (1 - f_{d,t}) \quad \forall d, t = 1, \dots, T - R_d + 1 \quad (23)$$

La evolución de la fatiga a lo largo del horizonte se modela con las ecuaciones (24) y (25). Cuando la dotación está activa, la fatiga incrementa cada día que pasa navegando. Al desactivarse, el contador se resetea y queda a cero para volver a sumar con el siguiente ciclo.

$$fatiga_{d,t} \geq fatiga_{d,t-1} + z_{d,t} - S_d \cdot (1 - y_{d,t}) \quad \forall d, t \quad (24)$$

$$fatiga_{d,t} \leq S_d \cdot y_{d,t} \quad \forall d, t > 1 \quad (25)$$

Como en el caso de las dotaciones activas, los estados del buque también deben respetar una duración mínima para evitar alejarse de la realidad. Esta duración se define mediante la ecuación (26) para el mantenimiento corto y la ecuación (27) para el PIP.

$$\sum_{k=t}^{t+L_{MC}-1} x_k^{MC} \geq L_{MC} \cdot i_t^{MC} \quad \forall t \quad (26)$$

$$\sum_{k=t}^{t+L_{PIP}-1} x_k^{PIP} \geq L_{PIP} \cdot i_t^{PIP} \quad \forall t \quad (27)$$

Para marcar el inicio de cada mantenimiento se utilizan las ecuaciones (28) y (29).

$$x_t^{MC} - x_{t-1}^{MC} \leq i_t^{MC} \quad (28)$$

$$x_t^{PIP} - x_{t-1}^{PIP} \leq i_t^{PIP} \quad (29)$$

Por último, se modelan las restricciones asociadas a la misión del Golfo de Guinea. Primero, la ecuación (30) garantiza que se realice la misión de Guinea dentro del horizonte temporal. La ecuación (31) marca el inicio de la misión y para poder mantener su duración ininterrumpida se emplea la ecuación (32) con el parámetro L_G .

$$\sum_{t=1}^T i_t^G = 1 \quad (30)$$

$$m_t - m_{t-1} \leq i_t^G \quad (31)$$

$$\sum_{k=t}^{t+L_G-1} m_k \geq L_G \cdot i_t^G \quad \forall t = 1, \dots, T - L_G + 1 \quad (32)$$

Además, se impone que la misión solo se pueda realizar en periodos de navegación con la ecuación (33).

$$m_t \leq x_t^N \quad \forall t \quad (33)$$

Con el modelo matemático ya completado, el siguiente paso es resolverlo de manera práctica. Dado que el problema que se plantea es un modelo MILP con diversas variables y restricciones, no es viable resolverlo manualmente.

3.4 Implementación del modelo MILP en Python

En un primer momento, se planteó resolverlo con Excel-Solver, herramienta de Excel utilizada para resolver problemas de programación lineal [27], pero debido al número de variables del problema se observó que era incapaz de obtener una solución sobre el horizonte temporal completo de 730 días. Para utilizar la herramienta de Solver, era necesario compartimentar el problema en conjuntos de días de 30 días y aplicar un horizonte rodante. De esta manera, se guardaban los estados finales de cada bloque de días y se utilizaban como los valores iniciales del siguiente conjunto. Mediante 24 iteraciones aproximadamente se podría tratar de hallar la solución óptima del problema. Para evitar esta solución poco práctica, se ha optado por utilizar Python como herramienta de trabajo.

Con el objetivo de mantener el horizonte temporal completo y mantener la estructura completa del modelo, se ha optado por implementar el MILP en Python mediante la librería PySCIPOpt, que actúa como interfaz del Solver SCIP. Esta herramienta permite representar el modelo de manera similar a como se formula matemáticamente, garantizando una mayor claridad en su estructura. De esta forma, la implementación del MILP a través de Python queda recogida en la Figura 3-6.



Figura 3-6 Proceso de obtención de resultados (autoría propia)

3.4.1 Consideraciones de la resolución del modelo

El tamaño del problema (horizonte temporal largo y varias dotaciones), genera un modelo con miles de variables y restricciones. Debido a esto, la obtención del resultado óptimo exacto requiere de tiempos de cálculo muy elevados mediante el método elegido.

Con el fin de que el modelo desarrollado tenga resolución en tiempos razonables sin dejar de lado la calidad de los resultados, se ha configurado el Solver incorporando distintas estrategias internas orientadas a mejorar su rendimiento. Estas estrategias no modifican en ningún momento la formulación matemática del problema, sólo se dedican a guiar al algoritmo en la forma en la que explora el espacio de soluciones.

En primer lugar, se han activado las heurísticas internas del Solver. Estos métodos permiten encontrar soluciones factibles en las fases previas de la búsqueda. De esta forma, se acota el espacio de soluciones y se mejoran el mecanismo de *Branch-and-Bound* al descartar las regiones del árbol que no son capaces de mejorar la solución hallada con heurísticas [18].

En segundo lugar, se utiliza una configuración de *presolve* agresiva. En la fase de *presolve*, el Solver analiza el modelo con el objetivo de simplificarlo. En esta fase, el Solver puede eliminar variables redundantes, ajustar cotas para valores enteros y detectar restricciones para hacerlas más compactas. Esta simplificación no modifica el problema, sino que reduce su tamaño para resolverlo más rápidamente [18].

También se han asignados prioridades de ramificación a diversas variables que son consideradas relevantes, como son los inicios de misión y mantenimientos cortos. Estas prioridades tienen la capacidad de hacer que el Solver tome decisiones de forma temprana sobre las variables que condicionan en gran parte el problema. Esto hace que el árbol de búsqueda se reduzca al evitar explorar soluciones no factibles.

Además de aplicar la etapa de *presolve* y las heurísticas, se ha fijado un límite temporal para la resolución del modelo. En este tipo de problemas, donde el número de restricciones y variables es tan elevado, el tiempo necesario para garantizar una solución óptima exacta crece de forma exponencial al intentar de acercarse al *primal bound* (límite técnico) al *dual bound* (límite teórico). Sin embargo, en este tipo de problemas, alcanzar el óptimo absoluto no aporta una mejora sustancial en los días de navegación.

Con el mismo propósito, se establece un gap permitido. El gap es la diferencia entre la solución factible obtenida y la solución teórica obtenida en la etapa de *presolve*. Permitir un gap con anterioridad, facilita encontrar soluciones de buena calidad dentro de un tiempo considerado. En este estudio, no se pretende alcanzar el óptimo absoluto, sino obtener soluciones factibles y consistentes bajo los mismos criterios de búsqueda.

3.4.2 Ajustes estructurales del modelo MILP

Durante el proceso de codificación se han introducido una serie de ajustes de cara a mejorar la ejecución del modelo computacionalmente, reduciendo simetrías y evitando soluciones degeneradas, que, aunque son factible desde el punto de vista matemático, se alejan de la realidad operativa del buque. A continuación, se desarrollan los ajustes realizados para reducir el espacio de soluciones:

- Fijación del PIP al final del horizonte temporal.
- Fijación de la misión de Guinea al inicio del horizonte temporal.
- Reformulación de la dinámica de la fatiga.
- Endurecimiento estructural de los MC.
- Restricción de relevos solamente en puerto.
- Variable de estado de puerto, ahora variable implícita.

3.4.2.1 Fijación del PIP al final del horizonte temporal

En el modelo matemático inicial, el PIP del buque se modela como un periodo continuo de duración L_{PIP} . Este periodo puede situarse en cualquier momento del horizonte temporal siempre que se respeten las restricciones asociadas a este. Sin embargo, durante la implementación en Python se ha elegido situar el PIP al final del horizonte por varios motivos.

El PIP es un mantenimiento obligatorio que debe realizarse dentro del horizonte, por lo que su posición dentro del calendario no modifica el número máximo de días de mar, solo la distribución de estos días. Si se permite al Solver decidir dónde se sitúa el PIP, se generan múltiples resultados equivalentes (mismo número de días de mar, pero diferente distribución). Estas soluciones son prácticamente la misma, desplazadas en el tiempo. De esta manera, se introducen múltiples simetrías que no aportan información adicional y a su vez aumentan exponencialmente el espacio de búsqueda

que el algoritmo debe explorar. En resumen, el árbol de *Branch-and-Bound* crece innecesariamente dificultando al modelo cerrar el gap en un tiempo razonable.

Al fijar el PIP al final del horizonte, se eliminan las simetrías. Esta técnica se conoce como ruptura de simetrías. Se utiliza para reducir la combinatoria del problema sin modificar su lógica u objetivo [28]. El modelo tiene en cuenta el PIP, pero ya no tiene que explorar las múltiples posibilidades para situarlo en el horizonte temporal.

Además, esta decisión también tiene en cuenta la coherencia operativa del problema. En un ciclo bianual, es razonable que el PIP se realice al finalizar el ciclo operativo del buque para que el buque comience el siguiente ciclo con toda su capacidad operativa y la dotación descansada. Por tanto, no solo mejora el rendimiento computacional del modelo, sino que permite que el modelo siga siendo realista.

3.4.2.2 Fijación de la misión de Guinea al inicio del horizonte temporal

De la misma manera que con el PIP, también se han adoptado las mismas medidas para reducir simetrías innecesarias con la misión de Guinea. La misión del buque se modela como un periodo continuo de duración L_G . Con la implementación en Python, se ha optado por fijar el inicio de la misión en el primer día del horizonte. Además, se refuerza la lógica de la misión, impidiendo explícitamente cualquier otro posible comienzo de misión a lo largo del horizonte temporal y obligando al buque a encontrarse en estado de navegación continuamente durante todo el periodo de la misión.

Esta decisión responde al mismo criterio que el utilizado con el PIP. Al dejar una libre elección en la situación de la misión, el modelo debe hacerse responsable de numerosas posibilidades de colocación que no alteran el número total de días de navegación. Lo relevante no es dónde se ubica la misión, sino la distribución del esfuerzo humano a lo largo del horizonte temporal y cómo influye la rotación de dotaciones en el resultado final.

Desde el punto de vista operativo, esta decisión también resulta coherente, ya que permite estructurar la planificación del ciclo operativo en función de la misión de referencia y después sobre los mantenimientos cortos que se añaden posteriormente.

3.4.2.3 Reformulación de la dinámica de la fatiga

Uno de los mayores cambios del modelo es la forma en la que se representa el esfuerzo humano de las dotaciones. En el modelo matemático, la fatiga se representa como una variable acumulativa que aumenta uniformemente con los días de navegación y se resetea cuando la dotación deja de estar activa. Además, el límite máximo de días consecutivos de mar actúa como una restricción directa, impidiendo superar el umbral. Este comportamiento es sencillo desde el punto de vista teórico, pero al llevarlo a la práctica, se observó que generaba comportamientos no deseados que alejaban el modelo de la realidad. El valor de la fatiga cambiaba drásticamente en tan solo un día tras la desactivación.

Por ello, en la implementación se ha optado por reformular la fatiga, de forma que sea dinámica en lugar de reiniciarse de manera brusca. De esta forma, la fatiga:

- Aumenta cuando la dotación navega.
- Disminuye de forma progresiva cuando la dotación no navega.
- Se mantiene siempre de unos límites.

De este modo, la recuperación no es instantánea sino gradual, necesitando la dotación un periodo de descanso que varía en función de la fatiga acumulada por la navegación (34).

$$fatiga_{d,t-1} \geq fatiga_{d,t-1} + z_{d,t} - 5 \cdot (1 - z_{d,t}) \quad (34)$$

También se ha incorporado un umbral de salida de navegación, S_{salida} , para que el buque no pueda iniciar un nuevo periodo de navegación si la fatiga acumulada se encuentra por encima de dicho umbral. Esta implementación se ha realizado tras observar como el buque forzaba al máximo las dotaciones, manteniéndolas al límite de la fatiga máxima para así maximizar los días de navegación. Esta restricción

evita dicho problema y permite acercar el modelo a la realidad. Para modelar dicha restricción (35), se aplica una Big-M. Esto es una técnica que permite modelar condiciones lógicas en el MILP, activando o desactivando restricciones en función de una variable binaria [29].

$$fatiga_{d,t-1} \leq S_{salida} + M \cdot (1 - i_t^N) \quad \forall d, t = 1, \dots, T \quad (35)$$

3.4.2.4 Endurecimiento estructural de los MC

En el modelo original, el mantenimiento corto se modela como un estado operativo con una duración mínima obligatoria. Es decir, una vez iniciado, debía mantenerse durante un número de días consecutivos. Esto garantizaba que el mantenimiento no se fragmentase en periodos cortos de uno o dos días, pero dejaba libertad al modelo sobre cuantos modelos realizar y en qué momento del horizonte hacerlos.

Durante la implementación, se observó que el modelo aprovechaba esta libertad para generar comportamientos inesperados que se alejaban de la realidad operativa. Por ello, se han introducido una serie de restricciones adicionales utilizadas para reforzar la estructura del MC dentro de la planificación.

Se ha fijado el número exacto de MCs dentro del horizonte. En vez de permitir que el modelo decida cuántos bloques activar, se establece una cantidad coherente respecto al ciclo operativo con el fin de evitar que el Solver introduzca mantenimientos adicionales simplemente como mecanismo para ajustar la fatiga o reorganizar la planificación sin una justificación clara.

También se ha impuesto una separación mínima entre mantenimientos. Sin esta restricción, el modelo generaba en ciertas ocasiones bloques de MC muy cercanos entre ellos o incluso aparecían solapados entre ellos. Esto resultaba poco coherente desde el punto de vista técnico y operativo del buque. Garantizar una distancia mínima permite que se distribuyan uniformemente a lo largo del horizonte temporal.

Otra medida aplicada ha sido prohibir los MC durante la misión principal dado que operativamente no tiene ningún sentido interrumpir una misión de despliegue para realizar un mantenimiento. Además, se impide realizar el mantenimiento corto si no existe margen suficiente para completarlo antes del PIP situado al final del horizonte. Esta medida evita soluciones donde uno de los MC queda a medias al solaparse con el PIP.

La necesidad de estas restricciones adicionales proviene porque el modelo teórico al exigir solo una duración mínima, permite configuraciones que matemáticamente son correctas, pero se alejan de la realidad, como:

- Fragmentación indirecta mediante bloques muy próximos.
- Concentraciones de mantenimientos en determinados puntos.
- Uso del mantenimiento como periodo de descanso para la dotación en vez de puerto.

3.4.2.5 Restricción de relevos solamente en puerto

Otra de las implementaciones surge cuando se identifica un aspecto que no estaba definido en la formulación matemática inicial: la posibilidad de realizar los relevos de dotación mientras el buque se encontraba navegando.

En el modelo matemático, el cambio de dotación se regula con la variable de activación $i_{d,t}$ y la permanencia mínima de la dotación, pero no se impone explícitamente que el relevo deba producirse en puerto. Aunque en la vida real, se pueda realizar el cambio de dotación mientras el buque se encuentra desplegado en zona de operaciones con el método conocido como *Sea Swap* [12], no se contempla en este modelo. En la práctica, la rotación completa de una dotación requiere de una escala en puerto o de un mantenimiento corto en su defecto, con el fin de permitir una transición del personal controlada.

Además, la libertad de los relevos durante la navegación añade más combinatoria al modelo, lo que se traduce en mayores ramas del árbol y por tanto en más tiempos de cálculo para tratar de cerrar el gap. Si el relevo puede ocurrir cualquier día, el número posible de posibilidades de activación aumenta considerablemente y el Solver debe explorarlas.

Por esto, en la implementación se impone los relevos en puerto para reforzar el realismo operativo que se plantea y reducir el espacio de soluciones, simplificando la dinámica de las activaciones a lo largo del horizonte temporal.

4 RESULTADOS Y VIABILIDAD

Este capítulo presenta la aplicación práctica de los modelos desarrollados y permite evaluar cómo influyen las distintas configuraciones de dotación en la disponibilidad del buque, así como la viabilidad de implantación de estas configuraciones en la realidad.

4.1 Resolución de los modelos

Una vez implementados los modelos, se analizan los resultados obtenidos. En primer lugar, se estudian los resultados del modelo básico para estimar el potencial del buque. Después, se analizan los resultados del modelo MILP, que representa de forma más detallada la realidad del buque.

4.1.1 Modelo Básico

Una vez formulado el modelo básico, definiendo los estados del buque y estableciendo las principales restricciones en el apartado anterior, es posible realizar una primera aproximación al número máximo de días en la mar que el BAM puede alcanzar. Este modelo permite visualizar de manera sencilla cómo influye el modelo de dotación sobre la operatividad del buque desde una perspectiva global, sin tener en cuenta relevos de dotaciones ni restricciones más complejas de la dotación.

Como se desarrolló en el capítulo previo, el número máximo de días de mar queda determinado directamente por el factor de empleo humano asociado a cada modelo de dotación (α o β). Para un horizonte temporal establecido, el modelo permite expresar los días de mar como una fracción de los días de disponibilidad técnica del buque.

De este modo, para el caso de una única dotación se obtiene:

$$D_{mar}^1 = \alpha \cdot D_{disp}$$

mientras que para el de doble dotación:

$$D_{mar}^2 = \beta \cdot D_{disp}$$

cumpléndose en todo momento que $\alpha < \beta$ y quedando el incremento de la disponibilidad reflejado como:

$$\Delta D_{mar} = (\beta - \alpha) \cdot D_{disp}$$

Sin embargo, el valor exacto de los parámetros α, β no se puede determinar de una manera exacta a partir de información pública. Esto se debe a que los parámetros recogen de manera agregada las limitaciones humanas de cada modelo de dotación. Para el valor del parámetro α se utilizará los días en la mar de la Tabla 3-1 del REM. Para el parámetro β , se adopta un enfoque basado en escenarios que permite analizar el comportamiento del modelo desde diferentes perspectivas.

Se consideran tres escenarios:

- Escenario conservador: En este escenario las limitaciones humanas son las más restrictivas y la mejora de la doble dotación será moderada.
- Escenario realista: En este caso, se extrapolan los datos de los patrulleros costeros de la clase *Cyclone* de la US Navy del documento de la CBO [12].
- Escenario óptimo: Este escenario es el más favorable, donde se permite aprovechar al máximo el potencial de la doble dotación y se extrapolan los datos del *U.S.S. Swift*

Los valores de cada escenario se recogen en la Tabla 4-1 y se refleja su porcentaje respecto a la disponibilidad técnica en la Figura 4-1, cumpliéndose en todo momento la condición de los parámetros:

Escenario	α (dotación única)	β (doble rotación)
Conservador	0,35	0,45
Realista	0,35	0,62
Óptimo	0,35	0,80

Tabla 4-1 Escenarios del modelo básico (autoría propia, [12])

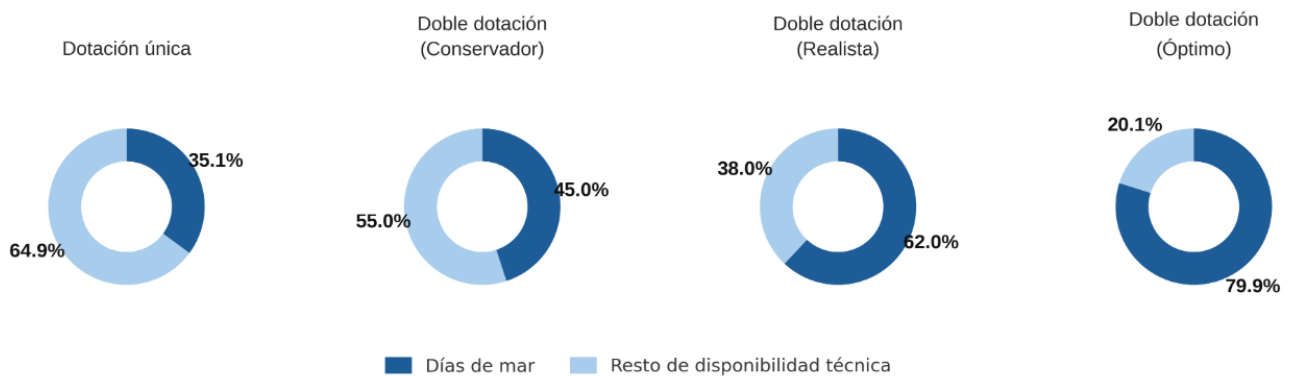


Figura 4-1 Porcentaje de disponibilidad empleado en días de mar según el modelo de dotación

Una vez definidos los parámetros de los modelos de dotaciones mediante los escenarios, se evalúa la disponibilidad técnica del buque, siendo el horizonte temporal, $T = 730$ días.

Durante este tiempo, el buque no se encuentra disponible durante los días asociados al mantenimiento. Estos días se agrupan con el parámetro D_{mant} y se considera el valor máximo que puede obtener según el REM en el Concepto de Apoyo Logístico [19].

$$D_{mant,máx} = D_{PIP,máx} + D_{post,máx} = 8 + 3 = 11 \text{ semanas} = 77 \text{ días}$$

A partir de estos dos valores, se obtiene el valor de la disponibilidad técnica del buque, D_{disp} sustituyéndolos en la fórmula.

$$D_{disp} = T - D_{mant} = 730 - 77 = 653 \text{ días}$$

Por tanto, en un ciclo de operación de dos años, el BAM dispone de 653 días para navegar. Con este valor obtenemos el límite superior del sistema pues en ningún caso los días de mar pueden ser superiores a los días en los que el buque se encuentra disponible.

Teniendo en cuenta los tres escenarios previamente expuestos en la Tabla 4-1, se analizan ambos modelos de dotación.

En primer lugar, para el caso de dotación única, el número máximo de días en la mar se obtiene mediante la fórmula de D_{mar}^1 y sustituyendo el valor de $\alpha = 0,35$:

$$D_{mar}^1 = \alpha \cdot D_{disp} = 0,35 \cdot 653 = 229 \text{ días}$$

Para el modelo de doble dotación, el número máximo de días en la mar dependerá del escenario elegido. Aplicando los valores de β correspondientes a cada escenario:

En el escenario conservador, $D_{mar,c}^2$ ($\beta = 0,45$):

$$D_{mar,c}^2 = \beta \cdot D_{disp} = 0,45 \cdot 653 = 294 \text{ días}$$

Para el escenario realista, $D_{mar,r}^2$ ($\beta = 0,62$):

$$D_{mar,r}^2 = \beta \cdot D_{disp} = 0,62 \cdot 653 = 405 \text{ días}$$

Por último, el escenario óptimo, $D_{mar,o}^2$ ($\beta = 0,80$):

$$D_{mar,o}^2 = \beta \cdot D_{disp} = 0,80 \cdot 653 = 522 \text{ días}$$

En la Figura 4-2 se observa como el número máximo de días de mar es mayor para el modelo de doble dotación, alcanzando en el escenario óptimo un valor cercano al doble de los obtenidos con una dotación única.

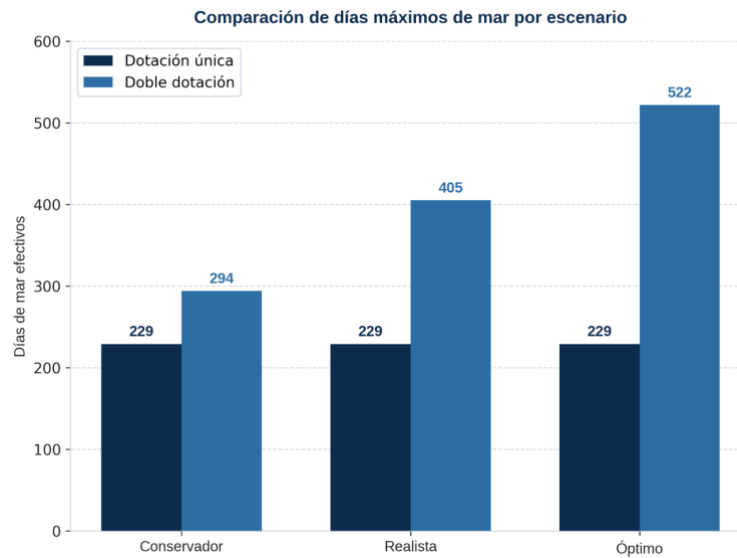


Figura 4-2 Comparación de días de mar según el escenario

Con los días de mar asociados a cada modelo, se calcula el incremento de disponibilidad del buque, ΔD_{mar} , mediante la ecuación (36) y expresándose los resultados en la Tabla 4-2, que sirve también a modo de resumen de los resultados obtenidos con el modelo básico:

$$\Delta D_{mar} = (\beta - \alpha) \cdot D_{disp} \quad (36)$$

Escenario	Dotación única, D_{mar}^1 (días)	Doble dotación, D_{mar}^2 (días)	Incremento, ΔD_{mar} (días)
Conservador	229	294	+65
Realista	229	405	+176
Óptimo	229	522	+293

Tabla 4-2 Resultados del modelo básico

La Figura 4-3 muestra el incremento potencial en los días de mar a partir del modelo de doble dotación, incrementándose según el escenario se hace más favorable.

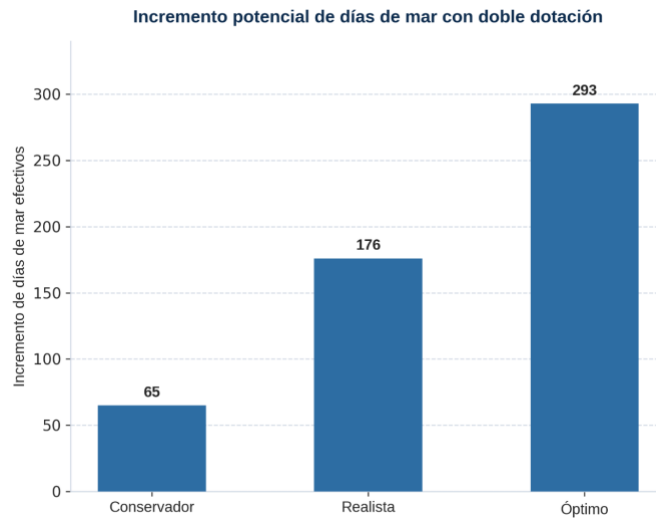


Figura 4-3 Incremento de días de mar según escenario de doble dotación

Los resultados obtenidos en el modelo básico permiten estimar de forma aproximada el potencial de cada modelo de dotación, mostrando que la doble dotación puede aumentar de forma significativa los días de mar del buque. Sin embargo, este modelo es una simplificación del problema real, ya que no tiene en cuenta aspectos como la planificación temporal de los estados del buque. Por ello, los valores obtenidos deben interpretarse como una referencia, siendo en el siguiente apartado donde se entra en el detalle del problema, asimilándolo a la realidad

4.1.2 Modelo MILP

Antes de implementar el modelo MILP con Python para los casos de ambas dotaciones, primero se definen los valores de los parámetros de manera que se establezca el marco en el que se van a desarrollar ambos escenarios.

El horizonte temporal, T , al igual que en el modelo básico, está compuesto por un ciclo bianual del buque, es decir, 730 días.

$$T = 730 \text{ días}$$

El parámetro de las dotaciones, D , se encontrará definido para cada uno de los escenarios. En caso de la dotación única, $D = 1$ y para el escenario de la doble dotación, $D = 2$.

Para la duración mínima de los mantenimientos, se tomará como referencia los valores del Concepto de Apoyo Logístico [21].

$$L_{MC} = 3 \text{ semanas} = 21 \text{ días}$$

$$L_{PIP} = 8 \text{ semanas} = 56 \text{ días}$$

Del mismo modo, se establece la duración máxima de la misión del Golfo de Guinea, L_G , acorde a los datos históricos obtenidos del Anexo IV: Cronología operativa de la clase BAM y para garantizar la coherencia del modelo, la duración máxima de los días de mar consecutivos, S_d , deberá ser superior.

$$L_G = 4 \text{ meses} = 120 \text{ días}$$

$$S_d = 150 \text{ días}$$

El parámetro φ define el porcentaje del horizonte temporal que se considera sostenible para cada dotación en días de navegación.

$$\varphi = 0,62$$

Fijar este valor implica que cada dotación podría navegar de forma sostenible el 62% del horizonte temporal. El umbral sostenible en días de mar será de 452 días para un horizonte de 730 días. Un porcentaje cercano al 60% refleja el equilibrio entre los periodos de actividad y los periodos de recuperación de la dotación en un entorno realista. El buque no puede permanecer desplegado continuamente pero tampoco puede limitarse y ser conservador.

Desde un punto de vista práctico, el valor del coeficiente α determina cuanto está dispuesto el modelo a reducir la disponibilidad en favor del mantenimiento de la dotación. Si α es pequeño, el modelo tiende a priorizar la navegación, aunque se supere el umbral de esfuerzo considerado sostenible. Si α es mayor, el modelo aumentará la importancia del descanso de la dotación. El parámetro α indica cuantos cuantos días de exceso equivalen perder un día de navegación. Para calcular el valor que debe tener α , en la Tabla 4-3 se describe el comportamiento del modelo en función de este parámetro.

Valor de α	Comportamiento del modelo	Disponibilidad operativa	Sostenibilidad del personal
$\leq 0,5$	Maximización de la navegación	Muy alta	Baja
≈ 1	Equilibrado	Alta	Media
$\geq 1,5$	Protección del personal	Baja-media	Alta

Tabla 4-3 Análisis del modelo según α

Cuando α tiende a cero, el modelo tiende a reducir los días de puerto y encadenar misiones siempre que las restricciones lo permitan. Este comportamiento no es sostenible en el tiempo y solo sería adecuado en caso de guerra. Cuando α tiende a un valor superior a la unidad, un día de exceso vale más que un día de navegación, por lo que el modelo evitará a toda costa que el número de días de mar consecutivos supere el umbral de S_d , introduciendo periodos adicionales de puerto y reduciendo el número de misiones.

Por ello, el modelo opta por un valor de $\alpha = 1$, manteniendo el equilibrio como la prioridad del buque: navegar, pero sin dejar de lado la sostenibilidad de la dotación. En el apartado 4.1.2.3 se realizará un análisis del modelo de dotación única variando el valor de alfa y phi mediante Python.

4.1.2.1 Escenario de dotación única

El escenario de una única dotación representa la situación más exigente desde el punto de vista organizativo, donde toda la carga recae sobre la misma dotación. Este escenario permite identificar dónde se encuentra el límite estructural de la disponibilidad del buque en las condiciones actuales.

Los resultados obtenidos para este escenario se recogen en la Tabla 4-4. El número total de días de navegación es la medida directa de la disponibilidad del buque. Este valor refleja el rendimiento máximo que se puede alcanzar bajo las restricciones que se han impuesto en el modelo. El tiempo de resolución y el gap final permiten evaluar la calidad computacional de la solución obtenida. Un gap reducido implica que la solución encontrada se encuentra próxima al óptimo.

Indicador	Valor
Días de navegación	506
Tiempo de resolución	178s
Gap final	0%

Tabla 4-4 Resultados cuantitativos (D=1)

Los resultados de la Tabla 4-4 muestran que el modelo alcanza un total de 506 días de mar durante el ciclo operativo bianual. Si se analiza el rendimiento computacional de este modelo, se observa que converge en una solución en 178 segundos por lo que el tamaño del problema es manejable por el Solver utilizado. Por último, el gap alcanzado tras los 178 segundos es del 0%. Esto significa que el Solver ha conseguido hallar el óptimo global, demostrando que no existe ninguna solución factible que mejore la función objetivo y por tanto el número de días de navegación es el máximo alcanzable con este modelo.

No solo basta con observar los resultados obtenidos con el modelo, también se debe observar cómo se distribuyen en el tiempo los distintos estados operativos del buque. Mientras que la Tabla 4-4 permite conocer los días de navegación y el rendimiento computacional del modelo, un cronograma operativo permite mostrar cómo se organiza realmente la actividad del buque a lo largo del horizonte temporal.

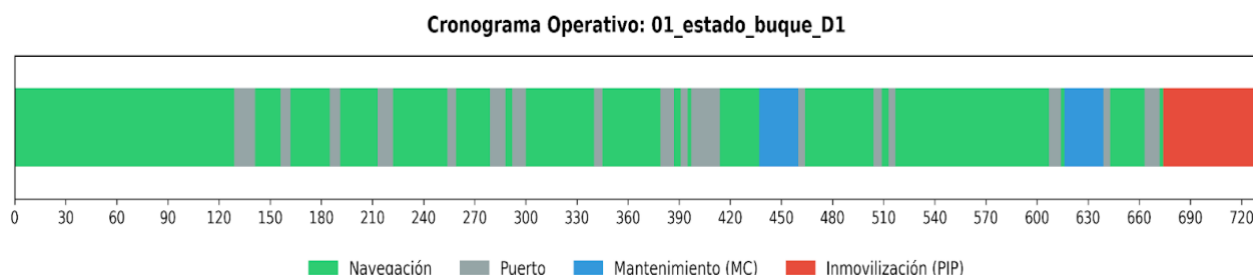


Figura 4-4 Cronograma operativo del modelo de dotación única

En la Figura 4-4 se representa el cronograma que corresponde al escenario de dotación única ($D=1$), el cual abarca todo el horizonte temporal considerado en el modelo. De esta manera se puede ver la evolución del buque a lo largo de los 730 días y la planificación generada por el modelo para el buque. En el cronograma se encuentran representados los diferentes estados operativos del buque mediante distintos colores.

En el cronograma se puede observar que el modelo tiende a concentrar la navegación en bloques relativamente grandes, respetando al comienzo del horizonte un periodo de navegación continuada que hace referencia a la misión de Guinea. Además, el modelo intenta “rascar” todos los días de navegación posibles dentro de los límites establecidos. Este es un indicio de que el modelo funciona correctamente ya que la función objetivo del modelo busca maximizar el número total de días de mar.

Tras el análisis del cronograma, se visualiza que el modelo genera una alternancia razonable entre periodos de navegación, puerto y mantenimientos, dando lugar a un patrón realista y coherente con el funcionamiento del buque.

Para que el análisis del escenario de dotación única quede completo, se debe observar también cómo evoluciona el nivel de fatiga de la dotación durante los dos años. Mientras que el cronograma muestra los periodos de navegación del buque, la Figura 4-5 permite analizar el efecto de estos periodos de actividad sobre la dotación.



Figura 4-5 Evolución de la fatiga del modelo de dotación única

La línea continua muestra el nivel de fatiga acumulada en cada momento del ciclo mientras que la línea discontinua roja muestra el umbral máximo de días de mar determinado por el parámetro S_d . La fatiga aumenta progresivamente durante los periodos de navegación. Esto se debe a que los días de mar hacen que la fatiga aumente linealmente con un punto de fatiga por día de mar. Cuando el buque regresa a puerto o entra en un periodo de mantenimiento corto, la fatiga disminuye con un factor de cinco puntos de fatiga por día de estancia, reflejando el efecto de recuperación del personal durante los intervalos de descanso.

La grafica de la Figura 4-5 muestra una alternancia entre las fases de acumulación y reducción de fatiga, lo que confirma que el modelo introduce periodos de puerto con la frecuencia suficiente como para evitar que el esfuerzo de la dotación se eleve de forma descontrolada. En varios puntos del horizonte puede observarse cómo la fatiga se aproxima al límite establecido antes de reducirse tras el periodo de descanso, lo que indica que el modelo gestiona bien el nivel de esfuerzo de la dotación.

En el final del horizonte, se aprecia cómo la fatiga vuelve a aproximarse al límite del máximo permitido. Esto ocurre porque el modelo trata de aprovechar al máximo los últimos días antes de la finalización del horizonte temporal, ya que en ese punto ya no es necesario reservar capacidad futura para nuevos periodos de mar consecutivos. Debe mencionarse que el modelo solo trata como descanso los periodos de mantenimientos cortos y los periodos de puerto. Es por ello que al final del horizonte temporal, cuando surge el PIP, la fatiga de la dotación no disminuye como en los periodos anteriores si no que aumenta de manera progresiva.

Como resumen, este escenario permite ver hasta qué punto puede maximizarse la disponibilidad del buque cuando toda la actividad es realizada por una sola dotación. El modelo consigue mantener una planificación realista durante los dos años del horizonte, respetando las restricciones impuestas por los mantenimientos y la carga de trabajo de las dotaciones.

Sin embargo, el estudio también muestra que el sistema funciona muy cerca de los límites ya que los periodos de navegación intentan aprovechar todos los márgenes que permite el modelo. Esto refleja una situación exigente desde el punto de vista operativo donde la disponibilidad del buque depende en cierta medida de la capacidad de la dotación para sostener esta actividad operativa a lo largo del tiempo.

4.1.2.2 Escenario de doble dotación

Una vez terminado el escenario de dotación única, se estudia el modelo de rotación de dotaciones donde $D = 2$. Como ya se ha comentado con anterioridad, la introducción de una segunda dotación permite que la carga de trabajo se reparta entre ambas dotaciones, al rotarse para descansar. Esto ofrece una mayor flexibilidad en la planificación, pues permite que el barco no tenga que estar en puerto si no es estrictamente necesario. Para analizar cómo se ha comportado el algoritmo analizando el escenario de dos dotaciones, se mantienen los mismos parámetros que se han utilizado en la Tabla 4-4. Los resultados de este escenario se recogen en la Tabla 4-5.

Indicador	Valor
Días de navegación	608
Tiempo de resolución	3600s
Gap final	3.29%

Tabla 4-5 Resultados cuantitativos (D=2)

En este escenario, el modelo alcanza los 608 días de navegación, lo que supone un incremento notable respecto al escenario de dotación única. Este aumento de días refleja la mayor capacidad del buque para mantener periodos prolongados de actividad. El tiempo de resolución del modelo en este caso ha alcanzado los 3600 segundos, siendo este valor el límite establecido en el modelo. El aumento del tiempo de resolución respecto al escenario anterior se debe a que, al introducir una segunda dotación, el número de variables y combinaciones de estas dentro del modelo aumenta, así como las restricciones que solo se deben de tener en cuenta en caso de que haya dos dotaciones.

Al introducir una segunda dotación, el modelo debe tomar más decisiones a la vez, como qué dotación está operando el buque en cada momento, cuándo entra cada dotación en descanso en función de la fatiga de ambas dotaciones y en qué momento se producen los relevos de dotaciones. Estas decisiones aumentan el número de variables binarias dentro del modelo, ya que además de existir para cada día del modelo, existen para cada dotación del buque.

El gap alcanzado en esos 3600 segundos es del 3,29%, lo que significa que la solución que se obtiene está muy cerca del óptimo global del problema ($< 5\%$). Con este porcentaje, el Solver garantiza que no existe una solución mejor que mejore el resultado más del 3,29%. Por ello se considera que el resultado obtenido es suficientemente cercano al óptimo como para considerarse representativo del comportamiento del modelo, ya que reducir más el gap implicaría tiempos de cálculo exponencialmente mayores sin producir una mejora relevante en la función objetivo.

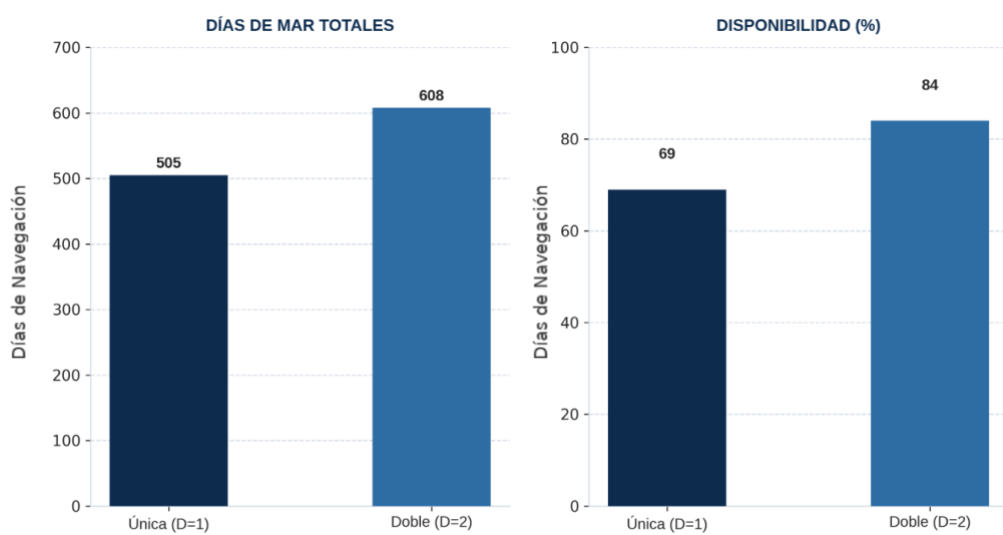


Figura 4-6 Comparativa días de mar y disponibilidad entre modelos

Para comparar ambos escenarios en la Figura 4-6 Comparativa días de mar y disponibilidad entre modelos, se utilizan los dos principales indicadores: días de mar y disponibilidad del buque.

Si se observan los días de mar, el modelo de una única dotación alcanza un total de 506 días dentro del horizonte bianual mientras que la doble dotación es capaz de aumentar ese número hasta los 608 días de navegación. Esto supone un aumento de 102 días de mar adicionales, que es un aumento aproximadamente del 15% de la disponibilidad del buque.

La segunda gráfica de la Figura 4-6 muestra la disponibilidad operativa del buque, expresada como el porcentaje de días de mar respecto al total de días del horizonte temporal. En el escenario de una única dotación, el buque alcanza una disponibilidad del 69,3% mientras que, en el escenario de doble dotación, la disponibilidad aumenta hasta el 83,3%.

Esto significa que con una única dotación el buque está disponible aproximadamente siete de cada diez días mientras que con dos dotaciones es capaz de operar casi nueve de cada diez días. La introducción de una segunda dotación permite que el buque pase una mayor parte del tiempo desplegado sin la necesidad de modificar otros factores del modelo como el número de mantenimientos o las restricciones técnicas.

Siguiendo el mismo criterio que el utilizado en el escenario de una única dotación, además de analizar los resultados numéricos, es necesario ver cómo se distribuyen los estados operativos. En la Figura 4-7 se representa el cronograma correspondiente a este nuevo escenario.

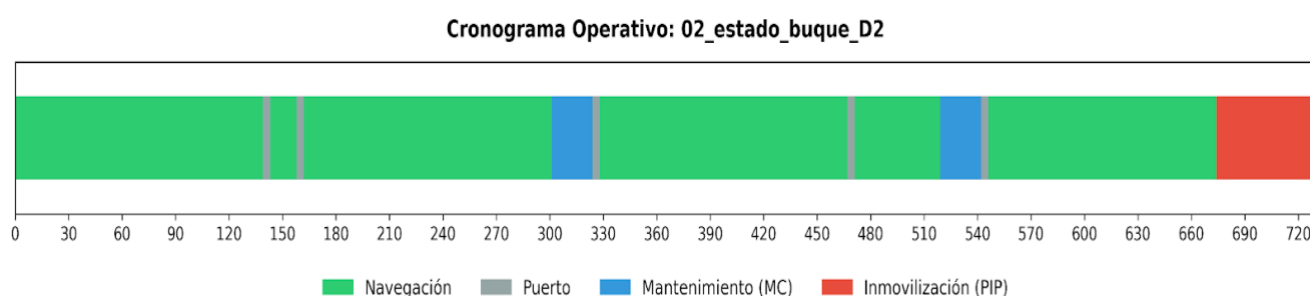


Figura 4-7 Cronograma operativo del modelo de doble dotación

Si se compara este cronograma con el obtenido en el escenario anterior, se aprecia que la navegación aparece más concentrada y con menos interrupciones. Esto se debe a que las dos dotaciones permiten que se reparta el esfuerzo humano como se ha comentado con anterioridad, lo que permite mantener el buque en la mar durante más tiempo sin depender de los periodos de descanso en puerto para reducir la fatiga. Esta navegación más continua es la que permite el aumento de días de mar observado en los resultados cuantitativos.

Los mantenimientos cortos mantienen una distribución similar a la observada en el escenario de dotación única, ya que están asociados principalmente a las necesidades técnicas del buque y no al número de dotaciones disponibles. Por último, el PIP vuelve a situarse al final del horizonte, cumpliendo con la restricción establecida en el modelo.

Para comprender mejor como se organiza el trabajo de ambas dotaciones, se debe analizar cómo se produce la rotación de estas dotaciones a lo largo del horizonte temporal. La Figura 4-8 representa el análisis de la disponibilidad y los relevos del escenario de doble dotación.

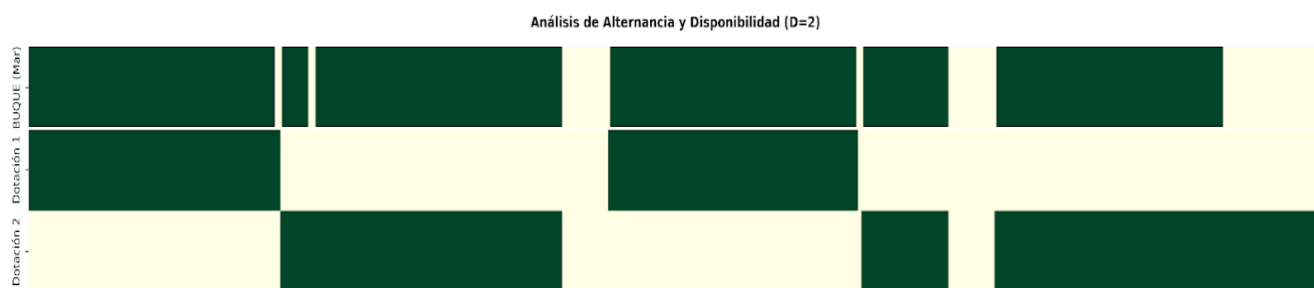


Figura 4-8 Análisis de alternancia y disponibilidad (D=2)

En la Figura 4-8 se muestran tres niveles diferentes. En el primer nivel, aparece el estado del buque cuando se encuentra en navegación. En las otras dos filas inferiores se representa la actividad de cada una de las dos dotaciones. Los tramos en color oscuro indican los periodos en los que la dotación se encuentra embarcada y operando el buque, mientras que los tramos claros corresponden a los periodos en los que esa dotación se encuentra en descanso o desactivada.

También permite ver de forma clara la rotación de ambas dotaciones. Cuando una de las dotaciones se encuentra operando el buque, la otra permanece en descanso, lo que permite que la carga de trabajo se reparta entre ambas. De esta manera se evita que una única dotación acumule todo el esfuerzo asociado a los periodos prolongados de navegación.

Cada periodo de navegación del buque coincide siempre con la presencia de una dotación activa, lo que indica que el modelo asigna correctamente una tripulación para operar el buque en cada momento. Otro de los aspectos que se puede observar es que la alternancia entre las dotaciones no sigue un patrón regular, sino que se adapta a las necesidades del buque. Por último, se puede apreciar que el reparto del tiempo operativo entre ambas dotaciones es relativamente equilibrado, por lo que la ninguna de las dos dotaciones soporta una carga de trabajo mucho mayor que la otra. Este equilibrio es importante desde un punto de vista organizativo, ya que permite mantener un reparto razonable de esfuerzo a lo largo del ciclo operativo.

Además de la disponibilidad del buque, es necesario analizar como en el escenario anterior la fatiga acumulada de las dos dotaciones. De esta manera es posible comprobar si la rotación entre las dotaciones realmente consigue repartir la carga de trabajo de manera equilibrada y evitar que una de ellas acumule niveles excesivos de fatiga. En la Figura 4-9 y en la Figura 4-10 se representa la evolución de la fatiga de cada una de las dotaciones durante el horizonte temporal de 730 días.



Figura 4-9 Evolución de la fatiga de la dotación 1



Figura 4-10 Evolución de la fatiga de la dotación 2

En ambas gráficas se muestra el nivel de fatiga acumulada a lo largo del tiempo, así como el límite máximo establecido por el parámetro S_d . Como sucedía en el escenario de dotación única, la fatiga aumenta progresivamente durante los periodos de navegación. Cuando la dotación es relevada o entra en periodo de descanso, la fatiga disminuye con la misma proporción que antes (5 puntos de fatiga por día).

Comparando ambas gráficas, se puede ver cómo los ciclos de acumulación de fatiga se encuentran desfasados entre sí. Esto se produce porque cuando una de las dotaciones se encuentra navegando, la otra permanece desactivada y descansado. Mientras que una dotación se encuentra acumulando fatiga durante el despliegue, la otra tiene tiempo para reducir su fatiga antes de volver a activarse. Este comportamiento muestra el comportamiento esperado por el modelo de doble dotación, donde en vez de concentrar toda la actividad con solo una dotación, se reparte equitativamente entre ambas, aumentando los intervalos de descanso de ambas dotaciones.

Entrando en detalle en ambas figuras, se aprecia que las dos dotaciones siguen un comportamiento parecido en cuanto a cómo acumulan la fatiga. En la Figura 4-9, la fatiga de la dotación 1 aumenta de manera progresivo mientras realiza los periodos de navegación hasta que cae rápidamente tras ser relevada. Estas caídas coinciden con los momentos de la Figura 4-10, en los que la dotación 2 comienza a acumular fatiga justo en los máximos de fatiga de la dotación 1. Por tanto, el patrón de fatiga de la segunda dotación se encuentra desfasado ligeramente. Estos desfases son los que permiten al buque navegar más tiempo.

De esta manera, tras analizar la evolución de la fatiga, se observa en la Figura 4-11 la carga total de trabajo para cada uno modelos de dotación.

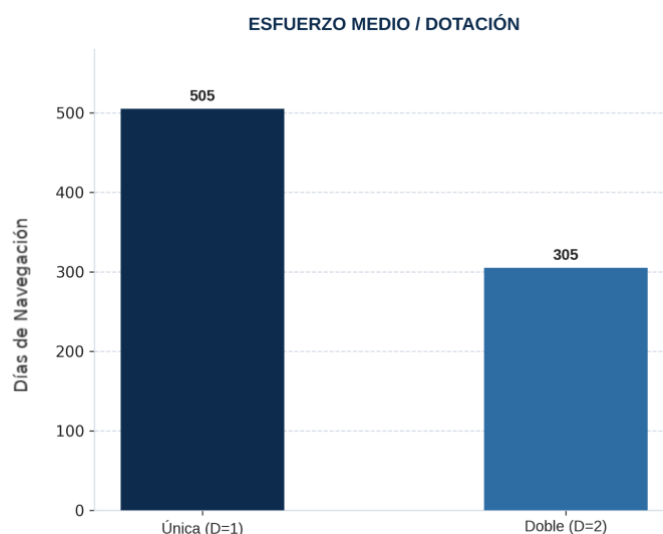


Figura 4-11 Esfuerzo medio por dotación

En este gráfico se compara el número de días de mar que debe asumir cada dotación en ambos modelos. En el primer modelo, toda la actividad del buque recae sobre una sola dotación, por lo que el esfuerzo medio coincide con el total de días de navegación del escenario, es decir, los 506 días de mar. Sin embargo, cuando se produce el cambio al modelo de doble dotación, el esfuerzo total de la navegación se reparte entre ambas dotaciones. Aunque el número total de días de mar aumenta hasta los 608 días, cada dotación soporta individualmente alrededor de 304 días de navegación. Esto supone una reducción de la carga de trabajo de alrededor del 40% respecto al escenario anterior, poniendo en evidencia uno de los efectos más importantes de la rotación de dotaciones. Cada dotación participa en menos periodos de navegación y dispone de intervalos de descanso y adiestramiento más grandes entre despliegues.

Esto implica que la introducción de una segunda dotación no solo aumenta la disponibilidad del buque, sino que también reduce el esfuerzo individual que soporta cada dotación. Es decir, el buque es capaz de navegar más días a lo largo del ciclo bianual sin que ese aumento de actividad se traduzca en una mayor carga de trabajo para cada dotación.

Otra de las gráficas que aporta información de utilidad es la que se muestra en la Figura 4-12, la cual refleja cómo se acumulan los días de navegación a lo largo del horizonte temporal.

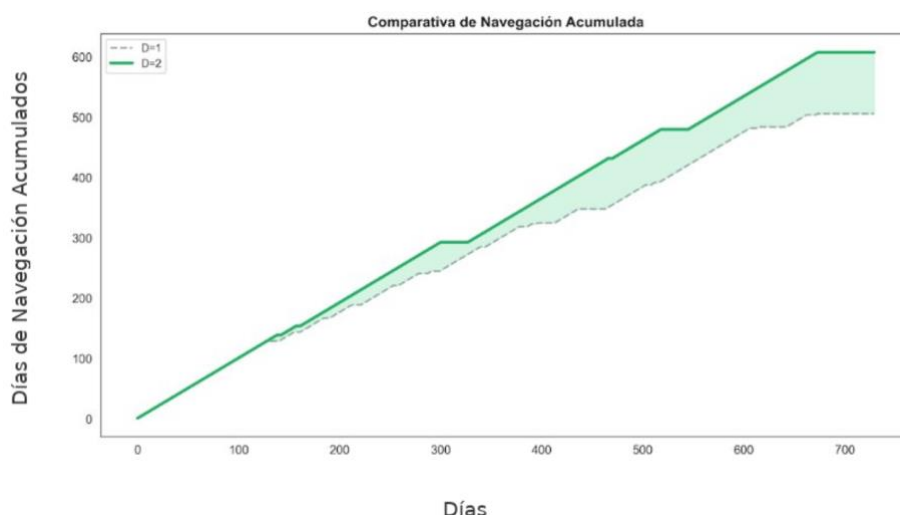


Figura 4-12 Comparativa de navegación acumulada

Interpretando la gráfica, la línea discontinua corresponde al escenario de dotación única ($D=1$) y la línea continua en verde corresponde al escenario de doble dotación ($D=2$). El eje horizontal muestra el horizonte temporal y el eje vertical tiene en cuenta el total de días de navegación acumulados.

Al inicio del horizonte temporal ambos modelos siguen prácticamente la misma evolución. Esto ocurre porque el ciclo comienza con el despliegue de la misión de Guinea, por lo que en esa primera fase la fatiga todavía no condiciona demasiado la planificación. Sin embargo, a medida que avanza el tiempo, comienzan a apreciarse diferencias entre los dos escenarios. Tras las primeras navegaciones, la curva correspondiente al modelo de doble dotación comienza a separarse poco a poco de la del modelo de dotación única. Esto muestra como al poder alternar dotaciones permite que el buque pueda mantener la navegación durante más tiempo sin tener que detenerse con frecuencia.

En el caso de la dotación única, conforme avanza el horizonte, surge la necesidad de dar descanso a la dotación introduciendo pausas de manera periódica. Cada uno de esos parones hace que la acumulación de días de mar se estanque y avance más despacio. Por otro lado, con dos dotaciones los parones corresponden principalmente a los periodos en los que el buque se encuentra en un mantenimiento corto, y la actividad del buque se mantiene de forma constante.

La distancia entre las curvas no aparece de golpe, sino que va creciendo poco a poco con el paso de los días. La ventaja de la doble dotación no se debe a un momento puntual, sino que se va acumulando y ganando terreno conforme más avanza el ciclo operativo. Al final del periodo, la diferencia entre ambos modelos alcanza los 102 días de navegación, coincidiendo con los resultados obtenidos anteriormente en la Figura 4-6.

Para finalizar con el estudio del escenario de doble dotación, la Figura 4-13 representa la distribución de los niveles de fatiga para los dos escenarios analizados.

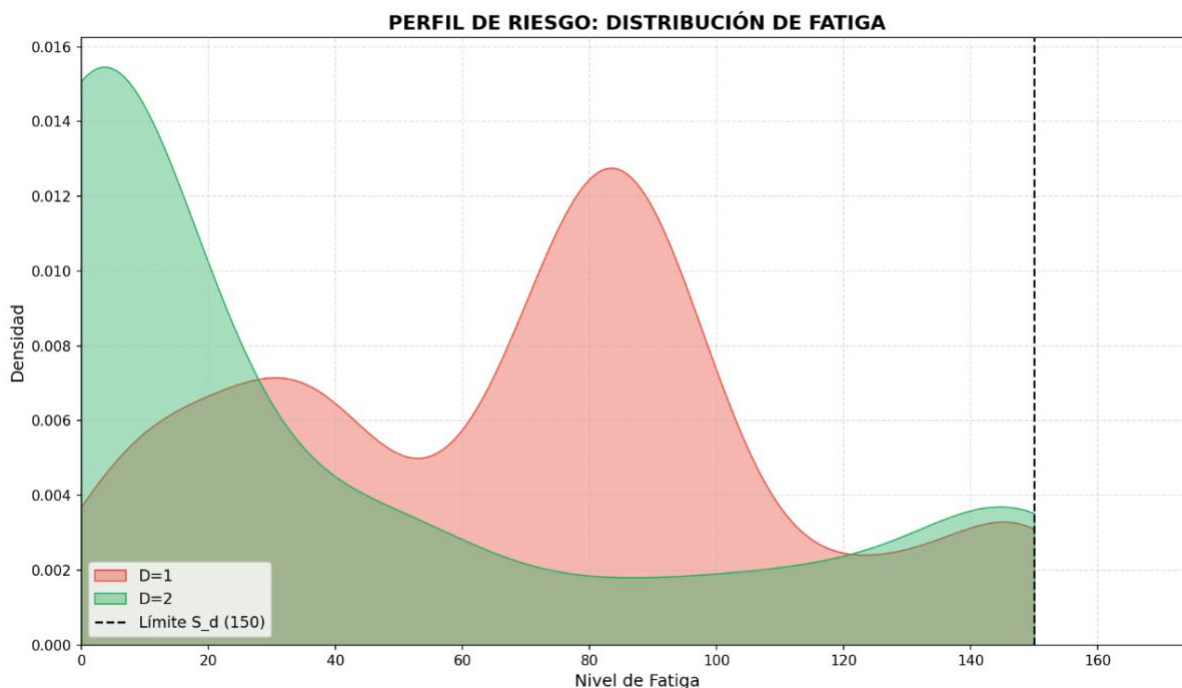


Figura 4-13 Distribución de la fatiga en ambos escenarios

La Figura 4-13 se ha generado a partir de una estimación de la densidad de probabilidad, utilizando los valores de fatiga registrados en cada día del horizonte temporal. De esta manera permite ver la distribución de los niveles de fatiga y comparar mejor cómo se reparten dichos valores en cada escenario. El eje “x” muestra el nivel de fatiga alcanzado mientras que el eje “y” indica la frecuencia relativa con la que aparecen esos valores. La curva roja está referida al escenario de una sola dotación mientras que la verde está asociada al escenario de doble dotación.

En el caso de la dotación única, muchos de los valores de fatiga se concentran en niveles intermedios-altos como muestra el pico máximo en torno a los 80-90 puntos de fatiga. En este escenario, la dotación pasa bastante tiempo operando con niveles de esfuerzo elevados, siendo coherente con el gráfico mostrado en la Figura 4-5. Por otro lado, en el escenario de la doble dotación, la distribución cambia. La fatiga se muestra con una mayor concentración en los valores bajos de fatiga, lo que significa que las dos dotaciones pasan más tiempo en periodos de descanso. El pico en esta situación se encuentra ahora en torno a los 10 puntos de fatiga.

El incremento de fatiga que se puede observar entorno a los 140 puntos de fatiga es el resultado de la misión de Guinea, donde las dotaciones deben permanecer desplegadas durante un periodo de tiempo considerable, lo que conlleva un aumento de la fatiga al borde del máximo permitido.

Desde un punto de vista operativo, esta grafica refuerza la idea de que el sistema con doble dotación permite mantener con mayor frecuencia estados con fatiga reducida, lo que hace más sostenible la actividad a largo plazo.

Una vez analizado el comportamiento del modelo en ambos escenarios, el siguiente paso es estudiar la influencia de algunos de los parámetros del modelo en los resultados obtenidos. Para ello en el siguiente apartado se realiza un análisis de sensibilidad que evalúa los resultados de dicho análisis.

4.1.2.3 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se va a centrar sobre los siguientes parámetros:

- Alpha.
- Phi.

Para analizar cómo influye el parámetro α en el comportamiento del modelo, se realiza el análisis variando su valor y observando el número total de días de navegación obtenidos en cada uno de los escenarios. La Figura 4-14 muestra este cambio en los días de mar cuando se modifica la penalización por fatiga.

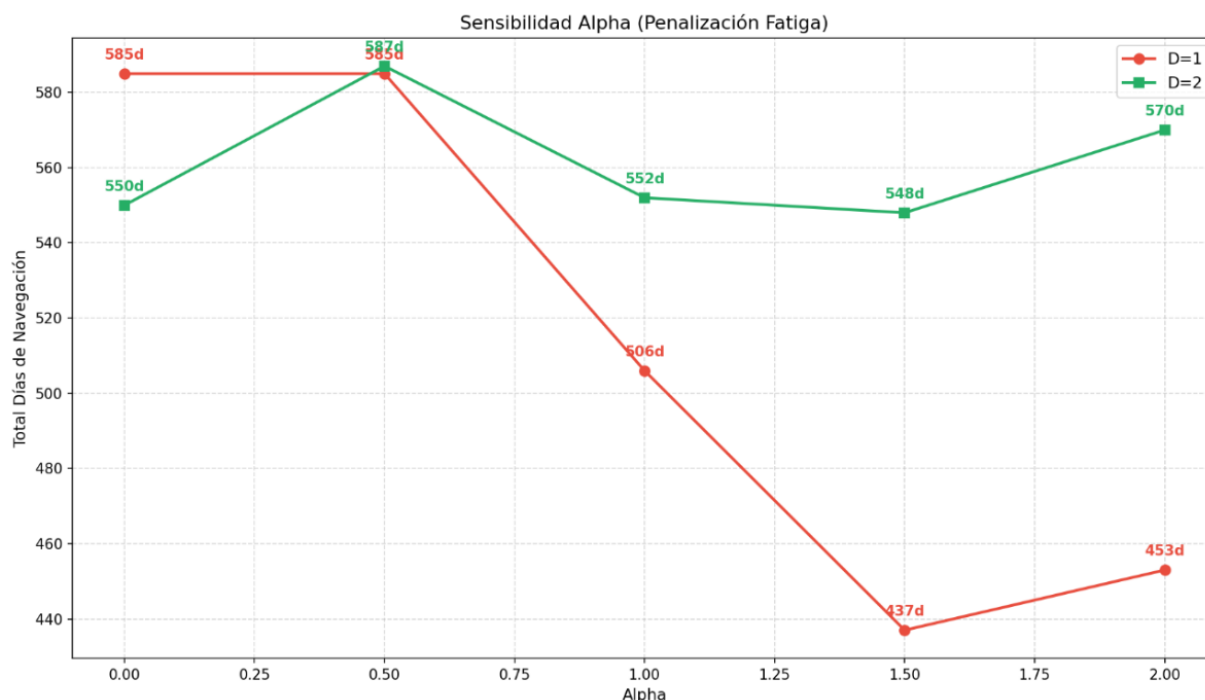


Figura 4-14 Análisis de sensibilidad del parámetro Alpha

En la gráfica se comparan los resultados obtenidos por iteración del modelo en los escenarios de única dotación y doble dotación, mostrando en el eje horizontal el valor de α utilizado en cada iteración y en el eje vertical los días de navegación alcanzados. Cabe destacar que cada iteración se realizó con un tiempo límite de 3600 segundos y un gap del 20% para favorecer la resolución rápida del modelo. Como consecuencia, los valores obtenidos en este apartado deben interpretarse desde una perspectiva comparativa, de manera que se pueda observar la tendencia del modelo.

Si se analiza el escenario de dotación única, se aprecia una tendencia clara. Cuando el parámetro α toma valores bajos, el modelo prioriza la navegación y el buque alcanza un número de días de mar elevado. Con valores de α entre 0 y 0,5 se obtiene un número de días de mar cercano a 585. A medida que el valor de α aumenta, el modelo comienza a penalizar en mayor medida los excesos de fatiga, lo que obliga a aumentar los periodos de descansos y como consecuencia, el número de días de mar disminuye progresivamente hasta valores cercanos a 437 días. Este comportamiento del escenario muestra que una sola dotación es muy sensible al valor de α , ya que la planificación depende del equilibrio entre navegación y descanso. Con una penalización elevada, el modelo es conservador y reduce en un 25% la operatividad del buque.

Por otro lado, el escenario de doble dotación presenta un comportamiento mucho más estable. Aunque también se observan variaciones en el número de días de mar alcanzados, estas son menores que en el escenario anterior. Los resultados se mantienen en un rango estrecho entre los 548 y los 587 días de mar. La rotación de dotaciones permite absorber parte del efecto de la penalización de la fatiga. Al alternarse las tripulaciones, el modelo es más flexible para gestionar la fatiga y el impacto del parámetro α solo supone un descenso del 7% en la disponibilidad del buque.

Una vez analizado el parámetro α , se estudia la influencia del parámetro φ que define el porcentaje máximo del horizonte temporal que una dotación dedica a navegar de forma sostenible. En la Figura 4-15 se muestran los resultados de dicho análisis, observando la variación de días de mar.

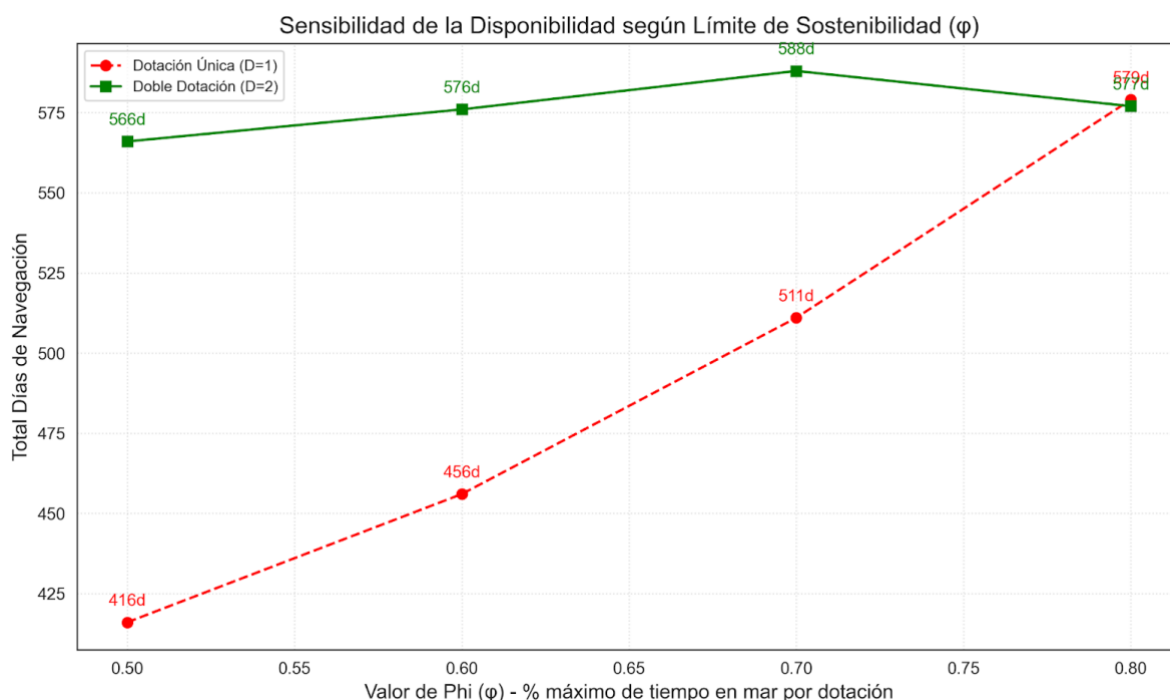


Figura 4-15 Análisis de sensibilidad del parámetro Φ

Como en el análisis anterior, se muestran ambos escenarios y la disposición de los ejes mantiene las mismas unidades de medida, cambiando el valor del parámetro α por el de φ .

Comenzando con el análisis del primer escenario, la tendencia vuelve a ser clara. A medida que aumenta el valor de φ , también lo hace el número total de días de mar. Al bajar el valor de φ , el modelo queda limitado y obliga a introducir más periodos de descanso, reduciendo la disponibilidad del buque a 416 días de navegación. Sin embargo, con un límite de sostenibilidad alto ($\varphi = 0,8$), la disponibilidad que se consigue es prácticamente la misma que con el escenario de doble dotación. Esto demuestra como en el caso anterior que el escenario de única dotación también es muy sensible a este parámetro, pudiendo variar un 28% la disponibilidad del buque.

En el escenario de doble dotación, el comportamiento vuelve a ser diferente del primer escenario y parecido al resultante de modificar el parámetro α . Las variaciones en los días de mar son mucho más reducidas y se mantienen entre los 566 días y los 588 para los distintos valores de φ analizados, variando tan solo un 4% la disponibilidad. Esto ocurre porque, como en el análisis anterior, la rotación de dotaciones es capaz de atenuar el impacto del parámetro al distribuir el esfuerzo entre ambas dotaciones.

A modo de cierre, los análisis de sensibilidad sobre los parámetros φ y α , asociados a la gestión del esfuerzo del personal, muestran como el modelo de única dotación es más sensible a las variaciones que el modelo de doble dotación. Estos resultados muestran como la introducción de una segunda dotación no solo aumenta los días de mar del buque, sino que también hace que el sistema sea más robusto frente a los cambios introducidos en las condiciones operativas del modelo.

4.2 Evaluación de la viabilidad

Una vez analizados los resultados del modelo de ambos escenarios, hay que valorar hasta qué punto las soluciones obtenidas pueden considerarse viables desde un punto de vista operativo y de gestión del personal. El objetivo de este análisis no es únicamente identificar la configuración que proporcione más días de mar, sino ver si es trasladable de forma realista a la gestión de personal de la Armada.

Los resultados obtenidos muestran que una parte importante de las limitaciones del buque no están relacionadas directamente con factores técnicos o logísticos. Estas limitaciones derivan de la capacidad de la dotación para sostener el ritmo durante periodos prolongados. En el modelo de una única dotación, el sistema funciona cerca de sus límites, por lo que se ve obligado a introducir pausas periódicas para recuperar al personal. Al introducir la segunda dotación, se reparte el esfuerzo entre dos dotaciones y el sistema dispone de mayor flexibilidad para organizar los periodos de navegación y descanso.

Sin embargo, la implantación del sistema de doble dotación implica ciertos retos. En primer lugar, requiere disponer del suficiente personal para formar dos dotaciones completas, lo que supone una mayor demanda de recurso humano. Además, se debe establecer un procedimiento claro de rotación y coordinación entre las dotaciones para garantizar la continuidad del buque.

En el caso de los BAM, la PLOR está compuesta por 51 personas como se observa en el Anexo V: Plantilla Orgánica de la clase BAM, por lo que establecer una doble dotación completa supondría duplicar el número hasta las 102 personas por buque. En el caso de las unidades desplegadas en Canarias y Cartagena, donde actualmente operan seis BAM, implantar este modelo requeriría de alrededor de 306 efectivos adicionales, cifra difícil de alcanzar en el contexto actual de escasez de personal.

Por este motivo, una alternativa consiste en aplicar un sistema de rotación parcial de dotaciones, en lugar de duplicar completamente la tripulación de cada buque. Este enfoque permite repartir el esfuerzo entre varias dotaciones sin necesidad de aumentar el número de dotaciones en la misma proporción que el número de buques. Cabe destacar que este planteamiento ya se realiza en la *US Navy* [4] [12].

Un ejemplo de este planteamiento sería establecer una proporción de 3/2, con seis dotaciones para los cuatro BAM desplegados en Canarias y tres dotaciones para los dos BAM de Cartagena. En este caso, cada grupo comparte un conjunto común de dotaciones que se irían rotando entre las diferentes unidades según las necesidades operativas, permitiendo aumentar la flexibilidad de la planificación y facilitar la sustitución de dotaciones en caso de despliegues prolongados.

La principal ventaja de este modelo es que reduce de forma significativa el incremento de personal necesario respecto a la doble dotación completa, requiriendo de la mitad de personal. El inconveniente de este modelo surge al desligar a la dotación de un único buque, lo que podría implicar problemas de adaptación. Aunque en el caso de los BAM, gracias al SICP y al ser buques con configuraciones y sistemas muy similares entre sí, este problema sería relativamente limitado.

Otra consecuencia relevante del modelo de doble dotación es el impacto que puede tener sobre la atracción y retención de personal en este tipo de unidades. Tal y como se ha observado en el análisis anterior, la doble dotación reduce el esfuerzo individual que debe asumir cada dotación. Esta disminución del estrés y la fatiga no solo mejora la sostenibilidad del buque, sino que puede repercutir positivamente en la percepción que el personal tiene sobre este tipo de destinos, actualmente llamados popularmente “matahombres” entre la tropa y la marinería.

En la situación actual, muchos destinos de elevada disponibilidad son percibidos como muy exigentes debido al elevado número de días de mar y a dificultad para conciliar la vida profesional con la personal. Si el modelo de doble dotación permite introducir periodos de descanso más regulares y una alternancia más equilibrada entre despliegues y periodos de tierra, estas unidades serán más atractivas para el personal.

Por lo tanto, más que mejorar solamente la disponibilidad del buque, la introducción de modelos de rotación de dotaciones puede verse también como una herramienta de gestión del personal. Una mejor previsión de los ciclos operativos puede ayudar a aumentar la satisfacción del personal, lo que a medio y largo plazo se traduciría en facilitar tanto la permanencia del personal experimentado como la incorporación de nuevos efectivos.

4.2.1 Estimación de necesidades de personal

Para evaluar la viabilidad real, se estima el número de efectivos necesarios para implantar este modelo en los BAM. Para ello, se utilizan las dotaciones de la Tabla 2-1. Aunque hay pequeñas diferencias entre los buques, las dotaciones se mantienen entre los 50 miembros por dotación. El número total de efectivos necesarios para operar los seis BAM aparecen en la Tabla 4-6.

Escala	Total de efectivos
Oficiales	46
Suboficiales	65
Tropa y marinería	191
Total	302

Tabla 4-6 Personal total en los BAM analizados

La muestra la distribución porcentual de los 302 efectivos entre las tres escalas, destacando que el mayor número de efectivos se encuentra en el personal de tropa y marinería.

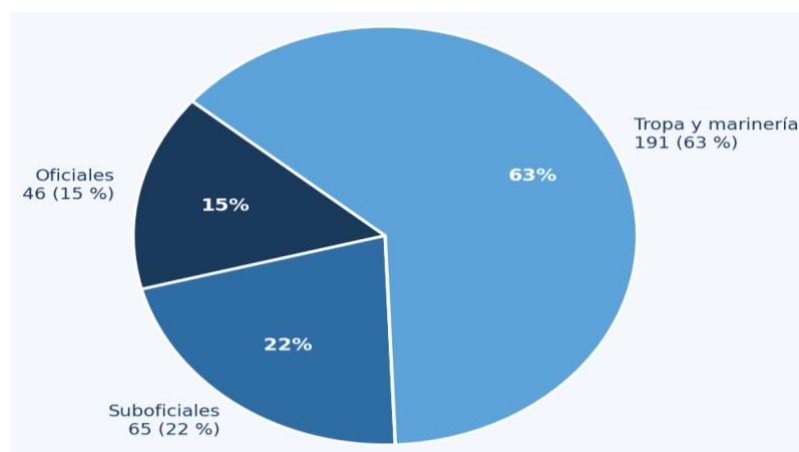


Figura 4-16 Distribución por escala de los efectivos totales de los BAM (creada con IA generativa)

A partir del escenario base de una única dotación, se pueden estimar las necesidades de personal en el caso de aplicar la doble dotación. Las necesidades de personal para los casos de la doble dotación completa y la doble dotación parcial se pueden observar en la Tabla 4-7.

Escala	Personal Actual	Doble dotación completa	Doble dotación parcial
Oficiales	46	92	69
Suboficiales	65	130	97
Tropa y marinería	191	382	286
Total	302	604	452

Tabla 4-7 Estimación de personal para los modelos de doble dotación

En la Figura 4-17 se puede visualizar de forma comparada el total de efectivos requerido en cada escenario, así como los efectivos adicionales necesarios respecto al modelo actual de única dotación.

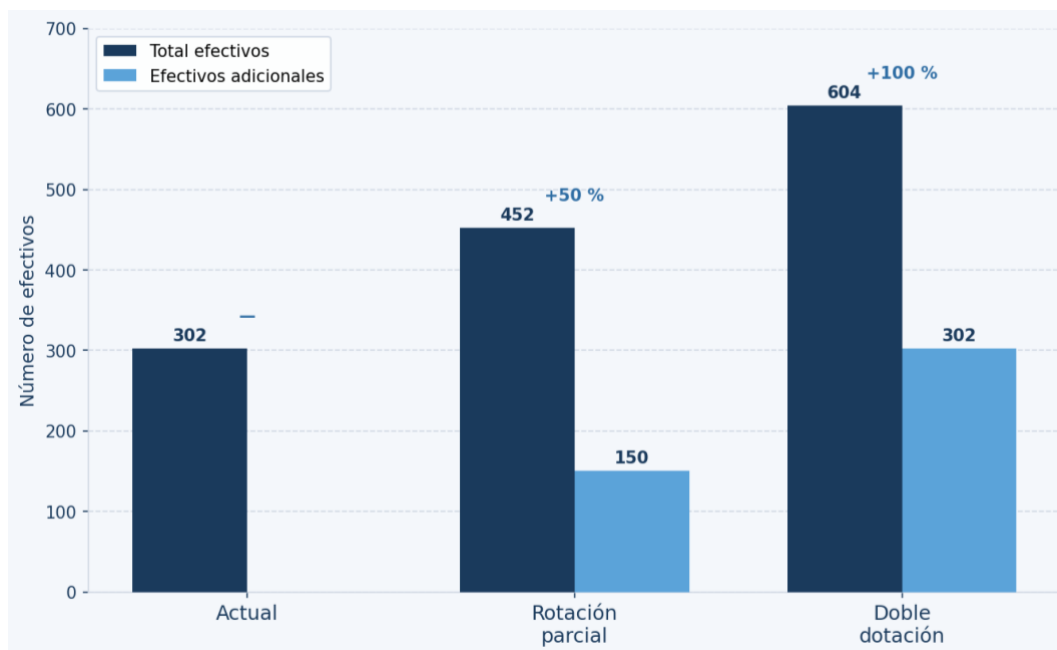


Figura 4-17 Incremento de personal requerido por escenario (creada con IA generativa)

En definitiva, el análisis realizado a lo largo del TFG muestra que la implantación de un sistema de rotación de dotaciones puede ser una alternativa viable para mejorar la sostenibilidad de la dotación y la disponibilidad operativa de los buques de clase BAM. Aunque la doble dotación completa presenta dificultades evidentes desde el punto de vista de recursos humanos, el modelo de rotación parcial ofrece una alternativa equilibrada entre disponibilidad y necesidades de personal.

En un contexto en el que el recurso humano constituye uno de los principales factores limitantes de la actividad operativa, explorar este tipo de enfoques puede contribuir a mejorar la calidad de la Armada sin la necesidad de ampliar el número de unidades dedicadas a los entornos de baja y media intensidad en los que se especializan los BAM.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Tras el desarrollo del análisis realizado en este TFG, se puede concluir que la implantación de un modelo de rotación de dotaciones contribuye de manera significativa a mejorar la disponibilidad operativa de los BAM situados en Canarias y Cartagena de la Armada Española. Los resultados obtenidos muestran que el sistema favorece el cumplimiento de los objetivos de presencia marítima continuada establecidos en la ENSM 2024.

Analizando los resultados cuantitativamente, el modelo muestra como en un horizonte temporal de dos años similar al ciclo operativo de un buque, la introducción de la doble dotación completa permitiría aumentar el número de días de navegación del buque de 506 a 608 en el caso más favorable. Esto supone aproximadamente un aumento del 15% en la disponibilidad del buque, equivalente a 102 días de mar adicionales a lo largo del horizonte. Este resultado prueba que el principal factor limitante para maximizar la disponibilidad del buque no reside tanto en la plataforma, sino en la capacidad de la dotación para sostener el esfuerzo operativo durante largos periodos de tiempo.

Además del aumento de disponibilidad, el modelo muestra que la doble dotación permite distribuir la carga de trabajo entre ambas dotaciones. Como consecuencia, el esfuerzo individual de cada una se reduce de forma considerable, pasando de asumir en torno a 506 días de mar a aproximadamente 304 días. Esta redistribución del esfuerzo se traduce en un perfil de fatiga más sostenible a lo largo del tiempo, en el que las dotaciones permanecen más tiempo en niveles bajos de fatiga y disponen de mayores oportunidades de recuperación y adiestramiento entre despliegues. El modelo confirma de esta forma que una gestión más eficiente de la rotación del personal puede mejorar el rendimiento global del sistema buque-dotación sin necesidad de aumentar el número de unidades disponibles.

Tanto el modelo básico como el modelo MILP permiten identificar varias ventajas que coinciden con las señaladas por el CBO y el CNA. Entre ellas destacan:

- Maximización del tiempo operativo.
- Mejor sostenibilidad de la dotación.
- Mayor flexibilidad operativa.

Primero, la rotación de dotaciones permite maximizar el tiempo operativo del buque, ya que desacopla los ciclos de descanso y adiestramiento del personal de los periodos de navegación. Esto permite que se reduzcan los tiempos improductivos en puerto asociados al descanso del personal.

En segundo lugar, el sistema contribuye a una mayor sostenibilidad del personal ya que la alternancia entre fases de embarque y descanso ayuda a reducir el desgaste profesional o *burnout*, fenómeno que se relaciona con la profesión militar, documentado en artículos de la RGM.

De la misma manera, la existencia de dos dotaciones aporta mayor flexibilidad, permitiendo prolongar despliegues o responder con mayor rapidez ante cambios en la situación sin comprometer la situación del personal a través de las comisiones.

Sin embargo, el estudio realizado pone de manifiesto ciertas limitaciones que deben considerarse a la hora de valorar la viabilidad real del modelo. La primera de ellas está relacionada con las necesidades de personal. La implantación de una doble dotación completa implicaría duplicar el número de efectivos asignados a los BAM, pasando aproximadamente de 302 a 604 efectivos para las seis unidades. Este incremento resulta difícil asumir en el contexto actual, caracterizado por las dificultades de captación y retención del personal en las FFAA.

Por otra parte, la implantación de este modelo requiere garantizar una adecuada coherencia entre las dotaciones. Para que el sistema funcione correctamente es necesario que las dotaciones mantengan niveles de adiestramiento homogéneos y que existan procedimientos claros para la transferencia de responsabilidades durante los relevos. En estos procedimientos de transferencia se debe incluir tanto la gestión de la información operativa como el control del estado material del buque, ya que, sin estos datos, podrían producirse pérdidas de eficiencia con cada relevo de dotación.

Otra consideración en la integración del modelo es que debe coordinarse con los ciclos de mantenimiento, de manera que se integren de forma coherente con los relevos dentro del ciclo operativo. La implantación del sistema introduciría cambios organizativos relevantes de cara a la normativa de las dotaciones, la planificación en el adiestramiento, la conciliación familiar y las expectativas profesionales del personal.

En su conjunto, los resultados del estudio permiten afirmar que el modelo de doble dotación presenta una elevada viabilidad desde el punto de vista técnico y operativo. Sin embargo, su implantación se encuentra condicionada principalmente por factores humanos y organizativos. Por ello, las soluciones intermedias pueden resultar más realistas en el contexto actual de la Armada. Entre estas soluciones, destaca la posibilidad de aplicar modelos de rotación parcial de dotaciones, como un modelo de proporción 3/2 para los BAM desplegados en Canarias y Cartagena. Este enfoque permitiría conseguir gran parte de los beneficios asociados a la rotación de dotaciones sin necesidad de duplicar completamente los recursos humanos, y ya presenta precedente en otras marinas como la *US Navy*.

5.2 Líneas futuras

Este TFG ha servido como un primer estudio para la implantación de la rotación de dotaciones en los BAM, a través de un modelo MILP para maximizar los días de navegación. A partir de este trabajo, se proponen varias líneas de investigación para el empleo de la rotación de dotaciones dentro de la Armada Española.

- **Estudio de modelos de rotación parcial de dotaciones**

Responde a analizar configuraciones intermedias entre el modelo actual de dotación única y el de doble dotación, con esquemas de rotación compartida entre varios buques, como configuraciones de tres dotaciones para cada dos unidades. Este tipo de planteamientos permitiría adaptar de una forma más realista el concepto de la rotación de dotaciones a la Armada Española, al tratar por zonas geográficas y extendiéndose a las unidades de cada zona. De esta manera, permite estudiar si es posible obtener parte de los beneficios de la doble dotación sin la necesidad de duplicar el personal

- **Integración del modelo con análisis económicos y organizativos**

El modelo desarrollado en este trabajo se centra principalmente en la optimización de la disponibilidad del buque. Sin embargo, es interesante ampliar el análisis, teniendo en cuenta aspectos

económicos y organizativos. Evaluar el coste asociado al incremento de personal, la logística necesaria para gestionar la rotación de dotaciones o el impacto sobre los planes de adiestramiento permitiría comparar estos factores con el aumento de disponibilidad.

- **Ampliación del modelo mediante técnicas de optimización avanzadas**

Por último, otra línea futura sería ampliar el modelo de optimización incorporando elementos de incertidumbre propios del entorno naval. Estos elementos pueden ser averías imprevistas, cambios en las condiciones meteorológicas o variaciones del perfil de la misión. Se podría desarrollar la implantación de estas medidas mediante modelos estocásticos o técnicas de simulación. De la misma forma, utilizar metaheurísticas o modelos multiobjetivo permitiría resolver problemas de planificación más complejos y aproximarse más a las condiciones reales de los buques.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Bolaños García, «Estrategia Nacional de Seguridad Marítima 2024,» Boletín Oficial del Estado (BOE), Madrid, 27-Mayo-2024.
- [2] Ministerio de Defensa, «Presentación Buques de Superficie,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessuperficie/prefLang-es/>. [Último acceso: 17 Dic. 2025].
- [3] Navantia, «Buque de Acción Marítima (BAM),» [En línea]. Available: <https://www.navantia.es/es/producto/buque-accion-maritima-bam/>. [Último acceso: 16 Dic. 2026].
- [4] L. Seguí Gomez de Olea, «El futuro de las dotaciones en los buques de la Armada: statu quo, optimización o dotaciones múltiples,» *Revista General de Marina*, pp. 989-996, Diciembre 2020.
- [5] M. López Garay, «La versatilidad de los buques de acción marítima,» *Revista General de Marina*, p. 59–69, Julio 2020.
- [6] Bureau Veritas, «Rules for Naval Ships-NR 483,» Octubre-2020.
- [7] J. S. Talbert Jr., «How Acquisition Decisions Impacted Fleet Readiness in the LCS Platform,» Monterey, CA, 2024.
- [8] Armada Española, «Manual de Organización de BAM Clase “Meteoro”. Tomo I».
- [9] Estado Mayor de la Defensa, «Presencias marítimas coordinadas,» [En línea]. Available: https://emad.defensa.gob.es/operaciones/operaciones-en-el-exterior/61-Presencias_maritimas_coordinadas/. [Último acceso: 18 Diciembre 2025].
- [10] Ingeniería Naval, «BAM, Buque de Acción Marítima,» Junio 2011. [En línea]. Available: <https://sectormaritimo.es/wp-content/uploads/2016/02/buques/bam.pdf>. [Último acceso: 18 Diciembre 2025].
- [11] Armada Española, «BAM-IS FEINDEF 2021,» 2021. [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/conocenos especiales/prefLang-es/05feindef-00-2021-FEINDEF--03-BAM-IS>. [Último acceso: 18 Diciembre 2025].
- [12] Congressional Budget Office, «Crew Rotation in the Navy: The Long-Term Effect on Forward Presence,» Washington, DC, Octubre-2007.
- [13] S. Wills, «Rotational Crew Concept Catches On Among Close U.S. Allies,» Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.cna.org/our-media/indepth/2019/08/rotational-crew-concept-catches-on-among-close-us-allies>. [Último acceso: 4 Enero 2026].

- [14] L. Willett, «UK Forward Deployed Frigate Program Enhances Availability And Operational Effect,» 28 Diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.navalnews.com/naval-news/2022/12/uk-forward-deployed-frigate-program-enhances-availability-and-operational-effect/>. [Último acceso: 8 Enero 2026].
- [15] Navy Lookout, «Royal Navy Warships Sail for Permanent Basing in the Indo-Pacific Region,» 6 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.navylookout.com/royal-navy-warships-sail-for-permanent-basing-in-the-indo-pacific-region/>. [Último acceso: 8 Enero 2026].
- [16] B. Victoriano y A. Ramos, Programación Matemática: Modelos de Optimización, Madrid, Madrid: Facultad CC. Matemáticas, Universidad Complutense, 2019.
- [17] Universidad de Alicante, «Simulación y Optimización de los Procesos Químicos. Tema 11: Introducción a la Programación Matemática con Variables Discretas,» s.f. [En línea]. Available: <https://rua.ua.es/server/api/core/bitstreams/19d6cafd-0fdd-41b8-aa2d-bb39287dcb4f/content>. [Último acceso: 17 Enero 2027].
- [18] Á. Martínez, «Programación entera,» 2015. [En línea]. Available: https://www.dma.uvigo.es/~aurea/Programaci%C3%9Bn_entera_2015.pdf. [Último acceso: 15 Febrero 2026].
- [19] F. Herrera, «Introducción a los Algoritmos Metaheurísticos,» Universidad de Granada, 2009. [En línea]. Available: <https://sci2s.ugr.es/sites/default/files/files/Teaching/OtherPostGraduateCourses/Metaheuristics/Int-Metaheuristics-CAEPIA-2009.pdf>. [Último acceso: 17 Enero 2026].
- [20] F. S. Hillier y G. J. Lieberman, Introducción a la Investigación de Operaciones, 9ª edición ed., México D.F.: McGraw-Hill / Interamericana, 2010.
- [21] Dirección General de Armamento y Material (DGAM) Ministerio de Defensa, «Programa BAM Extensión 1ª Serie. Concepto de Apoyo Logístico. Rev. 0,» Madrid, 2019.
- [22] Observatorio de la Vida Militar, «Memoria-Informe del OVM 2024,» Cortes Generales, Madrid, 2024.
- [23] A. González Ruiz, «Burnout o síndrome del desgaste profesional en la Armada,» Junio 2020.
- [24] O. N. B. Bacita, «Optimización y simulación para la determinación óptima de dotación de refuerzo en Buques de la Armada Española,» Marín, España, 2025.
- [25] F. García Tobío, «La «fuga de talento» en la Armada,» Armada Española, Madrid, Julio 2021.
- [26] C. Aboal Cruceira, «La conciliación en buques de la Flota: perspectiva operativa,» *Revista General de Marina*, pp. 797-809, Noviembre 2022.
- [27] Microsoft, «Definir y resolver un problema con Solver,» [En línea]. Available: <https://support.microsoft.com/es-es/office/definir-y-resolver-un-problema-con-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>. [Último acceso: 14 Febrero 2026].
- [28] P. Goos, «Symmetry breaking in mixed integer linear programming formulations for blocking two-level orthogonal experimental designs,» *Computers & Operations Research*, vol. 97, pp. 96-110, 2018.
- [29] T. Rehman, «Using the Big M Method in Optimization Problems,» [En línea]. Available: <https://medium.com/@talharehman.mtrkt/using-the-big-m-method-in-optimization-problems-ae38b5f98c58>. [Último acceso: 1 Marzo 2026].

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

A lo largo de este TFG se han tratado los aspectos sociales, económicos y de salud y seguridad. A continuación, se indican las secciones donde quedan recogidos.

Respecto a los aspectos sociales y de seguridad y salud del personal, el apartado 3.2 desarrolla el problema humano que surge del modelo actual de la Armada. Se analiza el fenómeno del *burnout* o desgaste profesional [23], identificando cómo la vida a bordo de un buque de guerra genera un entorno de gran exigencia con consecuencias en la disponibilidad del personal. El apartado 3.2.3 trata las dificultades de conciliación familiar asociadas a los destinos embarcados [26], donde la movilidad geográfica obligatoria y los largos periodos de ausencia afectan a la calidad de vida del personal y a su decisión de permanecer en la Armada.

El apartado 3.2.2 describe la tendencia de abandono de las FFAA por parte del personal cualificado [25], en un contexto demográfico que agravará la competencia con el sector civil en la próxima década. Los datos del OVM [22] recogidos en ese apartado muestran un descenso sostenido tanto en la cobertura de las dotaciones como en el número de solicitudes de acceso a la carrera militar.

El modelo MILP desarrollado en el apartado 3.3.2 incorpora restricciones explícitas de fatiga, descanso mínimo y límite de días consecutivos de navegación. De esta manera se garantiza que estos requisitos acoten el espacio de soluciones del modelo.

Respecto a los aspectos económicos, el apartado 4.2.1 cuantifica las necesidades de personal adicional que implicaría cada modelo de rotación, comparando la doble dotación completa con la rotación parcial. Aumentar la disponibilidad del buque sin adquirir nuevas unidades supone un aprovechamiento más eficiente de la inversión ya realizada en la flota con los BAM.

Respecto a los aspectos ambientales, no se detallan explícitamente a lo largo del presente TFG, aunque vienen implícitamente reconocidos a través de las conclusiones. Una mejora en la gestión del personal es capaz de prevenir la fabricación de más unidades de clase BAM. Esta gestión permite aprovechar de una manera más efectiva los recursos ya existentes.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La reflexión ética se encuentra desarrollada a lo largo del apartado 3.2. Reducir el factor humano dentro del MILP como una variable o parámetro de fatiga es una simplificación necesaria para modelar el problema, pero implica una responsabilidad: los resultados no pueden interpretarse como una hoja de ruta para maximizar el rendimiento de la dotación a cualquier coste. El modelo incorpora restricciones de descanso mínimo y umbrales de fatiga precisamente porque ignorarlos produciría soluciones matemáticamente válidas, pero éticamente inadmisibles.

En este sentido, el TN Seguí advierte del riesgo de confundir optimización con minimización de personal [4], recalcando que reducir excesivamente la dotación puede comprometer la seguridad, el mantenimiento y la preparación del buque.

El descenso sostenido de cobertura en las dotaciones de los BAM de Canarias recogido en el apartado 3.2.1 [24], la reducción de solicitudes de acceso a la carrera militar documentada en el apartado 3.2.2 [22] y las dificultades de conciliación descritas en el apartado 3.2.3 [26] no son fenómenos aislados ni inevitables: son consecuencias de un modelo organizativo que exige mucho y devuelve poco en términos de previsibilidad y calidad de vida.

La propuesta de rotación de dotaciones no se justifica únicamente en términos de disponibilidad del buque. Como se incluye en el apartado 4.2, si la institución exige a su personal una presencia prolongada en la mar conforme a los objetivos de la ENSM 2024 [1], esta tiene la obligación de diseñar estructuras organizativas que hagan esa exigencia compatible con periodos regulares de descanso y recuperación. Los resultados del modelo muestran que ambos objetivos, mayor disponibilidad y menor desgaste individual, no son contradictorios sino complementarios.

ANEXO III: DECLARACIÓN USO RESPONSABLE DE IA

Durante el desarrollo del presente TFG se han utilizado herramientas de inteligencia artificial como apoyo, siempre bajo el criterio y supervisión del autor. En concreto, se han empleado herramientas como ChatGPT, Claude, Gemini o NotebookLM para tareas auxiliares como la mejora de la redacción y corrección ortográfica, la revisión de código en Python y la ayuda en la comprensión e implementación del modelo matemático en el código.

En este sentido, la inteligencia artificial se ha utilizado como herramienta de apoyo, sin sustituir el trabajo técnico realizado, garantizando en todo momento la autoría y rigor del trabajo.

ANEXO IV: CRONOLOGÍA OPERATIVA DE LA CLASE BAM

2025

- 15 de diciembre. El BAM P-42 'Rayo' finaliza su despliegue en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.
- 1 de septiembre. El BAM P-42 'Rayo' despliega en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.
- 19 de junio. El BAM P-43 'Relámpago' finaliza su despliegue en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.
- 3 de febrero. El BAM P-43 'Relámpago' despliega en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.

2024

- 16 de diciembre. El BAM P-41 'Meteoro' finaliza su despliegue en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.
- 2 de septiembre. El BAM P-41 'Meteoro' despliega en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.
- 24 de junio. El BAM P-46 'Furor' finaliza su despliegue en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.
- 15 de febrero. El BAM P-46 'Furor' despliega en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.

2023

- 15 de diciembre. El BAM P-44 'Tornado' finaliza su despliegue en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.
- 5 de septiembre. El BAM P-44 'Tornado' despliega en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.
- 6 de junio. El BAM P-45 'Audaz' finaliza su despliegue en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.
- 15 de enero. El BAM P-45 'Audaz' despliega en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.

2022

- 12 de diciembre. El BAM P-43 'Relámpago' finaliza su despliegue en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.
- 29 de agosto. El BAM P-43 'Relámpago' despliega en la costa occidental de África y Golfo de Guinea.
- 7 de marzo. El BAM P-44 'Tornado' zarpa de Las Palmas de Gran Canaria para incorporarse al ejercicio multinacional 'Obangame Express 22'.

2021

- 21 de abril. El BAM 'Furor' recibe la visita del ministro de Defensa de Gabón, en el puerto de Libreville.
- 14 de abril. El BAM 'Furor' entrega equipos informáticos a un colegio de Camerún, donados por la ONG 'Amigos del tercer mundo'.
- 2 de abril. El BAM 'Furor' participa en un ejercicio con unidades navales de Francia, Italia y Portugal, en aguas del Golfo de Guinea.

- 26 de marzo. El BAM 'Furor' participa en el ejercicio internacional 'OBANGAME EXPRESS-21'.
- 13 de marzo. El BAM 'Furor' evacúa a un pescador español herido, en aguas del Golfo de Guinea.
- 5 de marzo. El BAM 'Furor' zarpa de Cartagena con rumbo al Golfo de Guinea.

2020

- 15 de diciembre. El BAM 'Tornado' finaliza su despliegue.
- 5 de noviembre. El BAM 'Tornado' realiza actividades de Seguridad Cooperativa con la Marina senegalesa.
- 16 de octubre. El BAM 'Tornado' zarpa desde su base en Gran Canaria para realizar actividades de vigilancia marítima por un periodo de 2 meses.

ANEXO V: PLANTILLA ORGÁNICA DE LA CLASE BAM

1	CC	CG	EOF	COMANDANTE	
2	TN	CG	EOF	SEGUNDO COMANDANTE	
3	TN	CG	EOF	JEFE DEL SERVICIO OPERACIONES	
4	TN	CG	EOF	JEFE DEL SERVICIO EP	
5	AN	CG	EOF	SERVICIO OPERACIONES	
6	TTE	CINA	EOF	JEFE SERVICIO ECONOMICO-ADMINISTRATIVO	
7	BG	CG	ESB	MNS	SERVICIO CONTROL DEL BUQUE
8	BG-SGT1	CG	ESB	MQS-EPS	SERVICIO EP
9	BG-SGT1	CG	ESB	ELS-EPS	SERVICIO EP
10	BG-SGT1	CG	ESB	COS-TIS-CSS	SERVICIO CONTROL DEL BUQUE
11	SGT1-SGTO	CG	ESB	MNS	SERVICIO CONTROL DEL BUQUE
12	SGT1-SGTO	CG	ESB	MQS-EPS	SERVICIO EP
13	SGT1-SGTO	CG	ESB	ELS-EPS	SERVICIO EP
14	SGT1-SGTO	CG	ESB	STS-OSS	SERVICIO OPERACIONES
15	SGT1-SGTO	CG	ESB	ERS-OSS	SERVICIO OPERACIONES
16	SGT1-SGTO	CG	ESB	AMS-ARS	SERVICIO OPERACIONES
17	SGT1-SGTO	CG	ESB	ALS-APS	SERVICIO APROVISIONAMIENTO
18	CB1	CG	EMR	STM-OSM	SERVICIO OPERACIONES
19	CB1	CG	EMR	ERM-OSM	SERVICIO OPERACIONES
20	CB1	CG	EMR	DTM-OSM	SERVICIO OPERACIONES
21	CB1	CG	EMR	COM-OSM	SERVICIO CONTROL DEL BUQUE
22	CB1	CG	EMR	HAM-APM	SERVICIO APROVISIONAMIENTO
23	CB1	CG	EMR	MNM	SERVICIO CONTROL DEL BUQUE
24	CB1	CG	EMR	MNM	SERVICIO CONTROL DEL BUQUE
25	CB1	CG	EMR	ELM-EPM	SERVICIO EP
26	CB1	CG	EMR	MQM-EPM	SERVICIO EP
27	CB1	CG	EMR	ADM-OSM	SERVICIO APROVISIONAMIENTO
28	CBO	CG	EMR	AMM-OSM	SERVICIO OPERACIONES
29	CBO	CG	EMR	STM-OSM	SERVICIO OPERACIONES
30	CBO	CG	EMR	MNM	SERVICIO CONTROL DEL BUQUE
31	CBO	CG	EMR	COM-OSM	SERVICIO CONTROL DEL BUQUE
32	CBO	CG	EMR	ELM-EPM	SERVICIO EP
33	CBO	CG	EMR	MQM-EPM	SERVICIO EP
34	CBO-MRO	CG	EMR	STM-OSM	SERVICIO OPERACIONES
35	CBO	CG	EMR	ADM-OSM	SERVICIO APROVISIONAMIENTO
36	CBO	CG	EMR	HAM-APM	SERVICIO APROVISIONAMIENTO
37	CBO-MRO	CG	EMR	HAM-APM	SERVICIO APROVISIONAMIENTO
38	CBO-MRO	CG	EMR	MQM-EPM	SERVICIO EP
39	MRO	CG	EMR	COM-OSM	SERVICIO CONTROL DEL BUQUE
40	MRO	CG	EMR	STM-OSM	SERVICIO OPERACIONES
41	MRO	CG	EMR	AMM-OSM	SERVICIO OPERACIONES
42	MRO	CG	EMR	ERM-OSM	SERVICIO OPERACIONES
43	MRO	CG	EMR	MNM	SERVICIO CONTROL DEL BUQUE
44	MRO	CG	EMR	MNM	SERVICIO CONTROL DEL BUQUE
45	MRO	CG	EMR	MNM	SERVICIO CONTROL DEL BUQUE
46	MRO	CG	EMR	ELM-EPM	SERVICIO EP
47	MRO	CG	EMR	ELM-EPM	SERVICIO EP
48	MRO	CG	EMR	MQM-EPM	SERVICIO EP
49	MRO	CG	EMR	MQM-EPM	SERVICIO EP
50	MRO	CG	EMR	HAM-APM	SERVICIO APROVISIONAMIENTO
51	MRO	CG	EMR	HAM-APM	SERVICIO APROVISIONAMIENTO

ANEXO VI: CÓDIGO DE PYTHON

1. ARCHIVO MODEL_CORE1:

```

from pysciptopt import Model, quicksum, SCIP_PARAMSETTING
def run_model(T, D, alpha_val, phi_val=0.62, timeout=None, gap=None):
    model = Model("BAM_MILP SCIP")
    #=====
    # 1. CONFIGURACIÓN DEL SOLVER
    #=====
    gap_to_use = gap if gap is not None else 0.05
    if timeout is not None:
        time_to_use = timeout
    else:
        time_to_use = 3600 if D == 1 else 10800
    model.setRealParam("limits/gap", gap_to_use)
    model.setRealParam("limits/time", time_to_use)
    if D == 1:
        model.setPresolve(SCIP_PARAMSETTING.FAST)
        model.setHeuristics(SCIP_PARAMSETTING.FAST)
    else:
        model.setPresolve(SCIP_PARAMSETTING.AGGRESSIVE)
        model.setHeuristics(SCIP_PARAMSETTING.FAST)
    #=====
    # 2. PARÁMETROS DEL MODELO
    #=====
    L_PIP = 56      # Duración del PIP
    S_d, R_d = 150, 4 # Techo de fatiga y estancia min en puerto
    L_G = 120       # Duración mínima de misión Guinea
    phi = phi_val   # Coeficiente de sostenibilidad
    L_MC = 23       # Duración mínima Mantenimiento (MC)
    #=====
    # 3. VARIABLES DE DECISIÓN
    #=====
    # Estados del buque (Binarias)
    xN = {t: model.addVar(vtype="B", name=f"xN_{t}") for t in range(T + 1)}
    xMC = {t: model.addVar(vtype="B", name=f"xMC_{t}") for t in range(T + 1)}
    xPIP = {t: model.addVar(vtype="B", name=f"xPIP_{t}") for t in range(T + 1)}

```

```

# xP estado de puerto ahora es una variable implícita (lineal)
xP = {t: model.addVar(vtype="C", lb=0, ub=1, name=f"xP_{t}") for t in range(T + 1)}
for t in range(T + 1):
    model.addCons(xP[t] == 1 - xN[t] - xMC[t] - xPIP[t])
# Variables de inicio de estado (Binarias)
iMC = {t: model.addVar(vtype="B", name=f"iMC_{t}") for t in range(T + 1)}
iG = {t: model.addVar(vtype="B", name=f"iG_{t}") for t in range(T + 1)}
iP = {t: model.addVar(vtype="B", name=f"iP_{t}") for t in range(T + 1)}
# Variables de Dotación y Fatiga
y = {(d, t): model.addVar(vtype="B", name=f"y_{d}_{t}") for d in range(D) for t in range(T + 1)} # Dotación d activa
z = {(d, t): model.addVar(vtype="B", name=f"z_{d}_{t}") for d in range(D) for t in range(T + 1)} # Dotación d navegando
fatiga_acum = {(d, t): model.addVar(vtype="C", lb=0, ub=S_d, name=f"fat_acum_{d}_{t}") for d in range(D) for t in range(T + 1)}
F = {d: model.addVar(vtype="C", lb=0, name=f"F_{d}") for d in range(D)}
# Variables auxiliares de misión
m = {t: model.addVar(vtype="B", name=f"m_{t}") for t in range(T + 1)} # Buque en misión
#=====
# 4. PRIORIDADES DE BÚSQUEDA PARA AYUDAR AL SOLVER
#=====
for t in range(1, T + 1):
    model.chgVarBranchPriority(iG[t], 1000) # Guinea es lo primero
    model.chgVarBranchPriority(iMC[t], 500) # Luego mantenimientos
    model.chgVarBranchPriority(iP[t], 100) # Luego bloques de puerto
#=====
# 5. FUNCIÓN OBJETIVO
#=====
# Maximizar navegación menos penalización por fatiga (diaria+total)
model.setObjective(
    quicksum(xN[t] for t in range(1, T + 1))
    - alpha_val * quicksum(F[d] for d in range(D)),
    "maximize")
#=====
# 6. RESTRICCIONES OPERATIVAS DEL BUQUE
#=====

```

6.1 Unicidad de estado: El buque solo puede estar en un estado a la vez

for t in range(1, T + 1):

 model.addCons(xN[t] + xP[t] + xMC[t] + xPIP[t] == 1)

6.2 PIP al FINAL del año (Optimización de Simetría)

for t in range(T - L_PIP + 1, T + 1):

 model.addCons(xPIP[t] == 1, name=f"PIP_Final_{t}")

Fijar que NO puede haber PIP antes de esa fecha

for t in range(1, T - L_PIP + 1):

 model.fixVar(xPIP[t], 0.0)

6.3 Lógica del MC, compacto e indivisible

for t in range(1, T + 1):

 # 6.3.1. EXCLUSIVIDAD: Si el buque está en MC, no puede estar en ningún otro estado

 # Esto evita que aparezcan días de "Puerto" (amarillo) dentro del bloque azul

 model.addCons(xN[t] <= 1 - xMC[t], name=f"Excl_Nav_MC_{t}")

 model.addCons(xP[t] <= 1 - xMC[t], name=f"Excl_Port_MC_{t}")

for t in range(1, T - L_MC + 1):

 # 6.3.2. INTEGRIDAD: Si se activa el inicio iMC[t], los próximos L_MC días deben ser xMC

 # Esto garantiza que el bloque no se fragmente

for k in range(t, t + L_MC):

 model.addCons(xMC[k] >= iMC[t], name=f"MC_Integridad_{t}_{k}")

6.3.3. NO SOLAPAMIENTO: Evita que el solver intente iniciar dos MC seguidos

model.addCons(quicksum(iMC[k] for k in range(t, min(t + L_MC, T + 1))) <= 1,

 name=f"MC_Unico_Inicio_{t}")

6.3.4. VINCULACIÓN: xMC solo puede ser 1 si existe un inicio iMC en la ventana de 23 días

for t in range(1, T + 1):

 model.addCons(

 xMC[t] <= quicksum(iMC[k] for k in range(max(1, t - L_MC + 1), t + 1)),

 name=f"MC_Respaldo_iMC_{t}"

)

6.3.5. SEGURIDAD: Prohibir iniciar un MC si no da tiempo a terminarlo antes del PIP final

for t in range(T - L_PIP - L_MC + 2, T + 1):

 model.fixVar(iMC[t], 0.0)

6.3.6. SEGURIDAD ADICIONAL: Prohibir MC durante la misión Guinea

for t in range(1, L_G + 1):

 model.fixVar(iMC[t], 0.0)

model.addCons(quicksum(iMC[t] for t in range(1, T + 1)) == 2, name="Obligar_1_MC")

```

# 6.3.7 Separación mínima de 100 días entre inicios de MC
GAP_MC = 100
for t in range(1, T - GAP_MC + 1):
    model.addCons(quicksum(iMC[k] for k in range(t, t + GAP_MC)) <= 1, name=f"Gap_MC_{t}")

# 6.4. Umbral de salida a navegación
S_salida = 75 # El barco solo sale si la fatiga es menor a 75
BIG_M = 1000 # Valor grande para la lógica condicional
for d in range(D):
    for t in range(2, T + 1):
        # Detectamos el inicio de la navegación: (xN[t] - xN[t-1]) será 1 solo el primer día
        inicio_navegacion = model.addVar(vtype="B", name=f"inicio_nav_{d}_{t}")
        model.addCons(inicio_navegacion >= y[d, t] + (xN[t] - xN[t-1]) - 1)
        # Si inicio_navegacion es 1, entonces fatiga_acum del día anterior debe ser <= S_salida
        model.addCons(
            fatiga_acum[d, t-1] <= S_salida + BIG_M * (1 - inicio_navegacion),
            name=f"UmbralSalida_{d}_{t}")

# 6.5. Lógica de permanencia mínima (R_d = 4)
for t in range(2, T + 1):
    # Detecta el cambio de 'No Puerto' a 'Puerto'
    model.addCons(iP[t] >= xP[t] - xP[t-1], name=f"Detectar_Entrada_{t}")
for t in range(1, T - R_d + 1):
    for k in range(t, t + R_d):
        model.addCons(xP[k] >= iP[t], name=f"Min_Estancia_{t}_{k}")

# 6.6. Restricciones misión de Guinea
# Forzar inicio exacto el día 1
model.addCons(iG[1] == 1, name="Inicio_Mision_Dia_1")
# Prohibimos cualquier otro inicio de misión
for t in range(2, T + 1):
    model.fixVar(iG[t], 0.0)
# Durante los L_G días, misión activa y navegación obligatoria
for t in range(1, L_G + 1):
    model.addCons(m[t] == 1)
    model.addCons(xN[t] == 1) # El buque debe navegar
    model.fixVar(xP[t], 0.0) # Prohibido estar en puerto
    model.fixVar(xMC[t], 0.0) # Prohibido mantenimiento

```

```

    model.fixVar(iMC[t], 0.0) # Prohibido empezar mantenimiento
#=====
# 7. RESTRICCIONES DE DOTACIÓN Y RELEVOS
#=====
for t in range(1, T + 1):
    # 7.1. Dotación activa obligatoria si el buque navega o está en PIP
    model.addCons(quicksum(y[d, t] for d in range(D)) >= xN[t] + xPIP[t])
    # Prohibido tener dotación activa durante Mantenimiento (MC)
    model.addCons(quicksum(y[d, t] for d in range(D)) <= 1 - xMC[t])
# 7.2. Relevos: Solo permitidos cuando el buque está en puerto (xN = 0)
for d in range(D):
    for t in range(2, T + 1):
        model.addCons(y[d, t] - y[d, t-1] <= 1 - xN[t]) # No empezar a estar activa en mar
        model.addCons(y[d, t-1] - y[d, t] <= 1 - xN[t]) # No dejar de estar activa en mar
if D > 1:
# 7.3. La Dotación 0 siempre empieza trabajando (Guinea)
    model.addCons(y[0, 1] == 1, name="D0_Empieza_Guinea")
# La Dotación 1 descansa al inicio
    model.addCons(y[1, 1] == 0, name="D1_Descansa_Inicio")
# 7.4. Permanencia mínima de 45 días
    L_min = 45
    iY = { (d, t): model.addVar(vtype="B", name=f"iY_{d}_{t}") for d in range(D) for t in range(1, T + 1) }
    for d in range(D):
        for t in range(2, T + 1):
            model.addCons(iY[d, t] >= y[d, t] - y[d, t-1], name=f"Inicio_Turno_{d}_{t}")
            for k in range(t, min(t + L_min, T + 1)):
                model.addCons(y[d, k] >= iY[d, t], name=f"Permanencia_Min_{d}_{t}_{k}")
#=====
# 8. LÓGICA DE FATIGA ACUMULADA
#=====
for d in range(D):
    # Fatiga inicial cero
    model.addCons(fatiga_acum[d, 0] == 0)
    # Cálculo del exceso de fatiga sobre el límite sostenible
    limite_sostenible = (phi * T)

```

```

model.addCons(F[d] >= quicksum(z[d, t] for t in range(1, T + 1)) - limite_sostenible)
model.addCons(F[d] >= 0) # El exceso no puede ser negativo
for t in range(1, T + 1):
    # z[d,t] es 1 solo si la dotación d está activa y el buque navega
    model.addCons(z[d, t] >= y[d, t] + xN[t] - 1)
    model.addCons(z[d, t] <= y[d, t])
    model.addCons(z[d, t] <= xN[t])
    # 8.1. Dinámica de la fatiga: Persistente y Lineal
    # Sube +1 si navega (z=1).
    # Baja -5 si está en puerto o fuera (z=0).
    model.addCons(
        fatiga_acum[d, t] >= fatiga_acum[d, t-1] + z[d, t] - 5 * (1 - z[d, t]),
        name=f"Evol_Fatiga_{d}_{t}")
    # 8.2. La fatiga no puede ser negativa
    model.addCons(fatiga_acum[d, t] >= 0)
    # 8.3. La fatiga no puede ser mayor que (S_d):
    # M de gran valor (Big-M) = 1000
    model.addCons(
        fatiga_acum[d, t] <= S_d + 1000 * (1 - y[d, t]),
        name=f"Limit_Seguridad_{d}_{t}")

#=====
# 9. EJECUCIÓN Y EXTRACCIÓN DE RESULTADOS
#=====

model.optimize()
if model.getNSols() > 0:
    sol = model.getBestSol()
    return {
        "nav_days": sum(round(model.getSolVal(sol, xN[t])) for t in range(1, T + 1)),
        "availability": (sum(round(model.getSolVal(sol, xN[t])) for t in range(1, T + 1)) / T) * 100,
        "xN": [round(model.getSolVal(sol, xN[t])) for t in range(1, T+1)],
        "xMC": [round(model.getSolVal(sol, xMC[t])) for t in range(1, T+1)],
        "xPIP": [round(model.getSolVal(sol, xPIP[t])) for t in range(1, T+1)],
        "y": {d: [round(model.getSolVal(sol, y[d, t])) for t in range(1, T+1)] for d in range(D)},
        "fatiga_list": {d: [model.getSolVal(sol, fatiga_acum[d, t]) for t in range(1, T+1)] for d in
range(D)},
        "exceso_f": [model.getSolVal(sol, F[d]) for d in range(D)],

```

```
"n_mc": sum(round(model.getSolVal(sol, iMC[t])) for t in range(1, T + 1)),
# --- DATOS COMPUTACIONALES PARA EL PDF ---
"n_vars": model.getNVars(),
"n_cons": model.getNConss(),
"solve_time": model.getSolvingTime(),
"gap": model.getGap()}
```

2. ARCHIVO EJECUTAR_ESCENARIOS:

```
import pandas as pd
```

```
from modelo_core1 import run_model
```

```
import graficos
```

```
T = 730
```

```
ALPHA = 1 # Peso de la penalización por fatiga
```

```
print(">>> Iniciando Simulación...")
```

```
res_d1 = run_model(T, 1, ALPHA)
```

```
res_d2 = run_model(T, 2, ALPHA)
```

```
if res_d1 and res_d2:
```

```
    print("\n>>> Procesando Resultados y Generando Gráficos...")
```

```
    # =====
```

```
    # BLOQUE 1: CRONOGRAMAS Y ACTIVIDAD
```

```
    # =====
```

```
    print("Generando Cronogramas y Heatmaps...")
```

```
    # Estado del buque
```

```
    graficos.generar_estado_buque_mejorado(res_d1, T, "01_estado_buque_D1.png")
```

```
    graficos.generar_estado_buque_mejorado(res_d2, T, "02_estado_buque_D2.png")
```

```
    # Heatmap de rotaciones (Solo para D2)
```

```
    graficos.graficar_heatmap_actividad(res_d2, T, 2, "03_heatmap_relevos_D2.png")
```

```
    # =====
```

```
    # BLOQUE 2: FATIGA INDIVIDUAL
```

```
    # =====
```

```
    print("Generando Gráficos de Fatiga...")
```

```
    # Fatiga D1
```

```
graficos.graficar_fatiga_profesional(res_d1, T, 1, "04_fatiga_D1.png", S_d=150)
# Fatiga D2 (Ambas dotaciones)
graficos.graficar_fatiga_profesional(res_d2, T, 1, "05_fatiga_D2_Dot1.png", S_d=150)
graficos.graficar_fatiga_profesional(res_d2, T, 2, "05_fatiga_D2_Dot2.png", S_d=150)
# =====
# BLOQUE 3: GRAFICAS COMPARATIVAS
# =====
print("Generando gráficas Comparativas...")
# (Productividad, Disponibilidad, Esfuerzo)
graficos.generar_comparativa_tfg(res_d1, res_d2, "06_dashboard_comparativo_final.png")
# =====
# BLOQUE 4: NAVEGACIÓN ACUMULADA Y DENSIDAD DE LA FATIGA
# =====
# Navegación acumulada
graficos.graficar_navegacion_acumulada(res_d1, res_d2, T, "07_navegacion_acumulada.png")
# Densidad de fatiga KDE
graficos.graficar_perfil_riesgo(res_d1, res_d2, "08_perfil_riesgo_humano.png")
# =====
# BLOQUE 5: TABLAS DE RESULTADOS Y RENDIMIENTO
# =====
print("Guardando Reportes en PDF y Consola...")
# Guardar PDF
graficos.guardar_tablas_pdf(res_d1, res_d2, "09_Resultados_Resumen_TFG.pdf")
# Mostrar tabla de rendimiento en consola
perf_data = {
    "Escenario": ["D=1 (Única)", "D=2 (Doble)"],
    "Variables": [res_d1['n_vars'], res_d2['n_vars']],
    "Restricciones": [res_d1['n_cons'], res_d2['n_cons']],
    "Tiempo (s)": [round(res_d1['solve_time'], 2), round(res_d2['solve_time'], 2)],
    "Gap Final": [f'{res_d1["gap"]*100:.2f}%', f'{res_d2["gap"]*100:.2f}%']]
print("\n" + "="*60)
print("RENDIMIENTO COMPUTACIONAL DEL MODELO")
print("="*60)
print(pd.DataFrame(perf_data).to_string(index=False))
print("="*60)
```

```
# =====
# BLOQUE 5: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD
# =====

print("Iniciando Análisis de Sensibilidad...")
import json

# 1. Sensibilidad de Phi
phis = [0.5, 0.6, 0.7, 0.8]
res_phi_d1 = []
res_phi_d2 = []

# --- BUCLE DE SIMULACIÓN ---
for p in phis:
    print(f'\n>>> TEST PHI: {p}')
    # Ejecución D1
    r1 = run_model(T, 1, ALPHA_COMUN, phi_val=p, timeout=1200, gap=0.20)
    res_phi_d1.append(r1['nav_days'] if r1 else 0)
    # Ejecución D2
    r2 = run_model(T, 2, ALPHA_COMUN, phi_val=p, timeout=1800, gap=0.20)
    res_phi_d2.append(r2['nav_days'] if r2 else 0)

# --- GUARDADO DE SEGURIDAD ---
# Por si falla la gráfica, los datos quedan en este archivo
datos_finales = {"phis": phis, "d1": res_phi_d1, "d2": res_phi_d2}
with open("resultados_phi.json", "w") as f:
    json.dump(datos_finales, f)

# --- GRAFICADO ---
try:
    graficos.graficar_sensibilidad_phi(phis, res_phi_d1, res_phi_d2, "11_sensibilidad_phi.png")
    print("Gráfica 11 generada con éxito.")
except Exception as e:
    print(f'Error al graficar, pero los datos están guardados: {e}')

# 2. Sensibilidad de Alpha
alphas = [0, 0.5, 1, 1.5, 2]
res_alpha_d1, res_alpha_d2 = [], []
for a in alphas:
    r1 = run_model(T, 1, a, timeout=1800, gap=0.25) # Relajamos gap para velocidad
```

```

r2 = run_model(T, 2, a, timeout=3600, gap=0.25)
res_alpha_d1.append(r1['nav_days'] if r1 else 0)
res_alpha_d2.append(r2['nav_days'] if r2 else 0)
graficos.graficar_sensibilidad_alpha(alphas, res_alpha_d1, res_alpha_d2,
"10_sensibilidad_alpha.png")
print("\n>>> SIMULACIÓN COMPLETA. Revisa la carpeta de resultados.")

```

3. ARCHIVO GRAFICOS:

```

import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import numpy as np
from matplotlib.colors import ListedColormap
import matplotlib.patches as mpatches

#=====
# 1. CONFIGURACIÓN ESTILO
#=====

plt.rcParams.update({
    'font.size': 10,
    'axes.titlesize': 12,
    'axes.labelsize': 10,
    'legend.fontsize': 9,
    'figure.dpi': 300,
    'font.family': 'sans-serif'})

def imprimir_tabla(df, titulo):
    """Muestra un resumen de resultados en consola de forma estética."""
    print(f'\n{'='*55}\n {titulo}\n{'='*55}\n{df.to_string(index=False)}\n")

def guardar_tablas_pdf(res_d1, res_d2, nombre_archivo):
    """Genera un PDF con la tabla de rendimiento y la comparativa operativa."""
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
    ax.axis('off')

#=====
# 2. GENERACIÓN DE TABLAS
#=====

# --- TABLA 1: RESUMEN OPERATIVO ---
data_op = [

```

```

["Escenario", "D=1 (Única)", "D=2 (Doble)"],
["Días Navegación", res_d1['nav_days'], res_d2['nav_days']],
["Mantenimientos (MC)", res_d1['n_mc'], res_d2['n_mc']],
["Disponibilidad (%)", f'{res_d1['availability']:.1f}%', f'{res_d2['availability']:.1f}%']]

# --- TABLA 2: RENDIMIENTO COMPUTACIONAL ---
data_comp = [
    ["Escenario", "D=1", "D=2"],
    ["Variables", res_d1.get('n_vars', 'N/A'), res_d2.get('n_vars', 'N/A')],
    ["Restricciones", res_d1.get('n_cons', 'N/A'), res_d2.get('n_cons', 'N/A')],
    ["Tiempo de Resolución (s)", f'{res_d1.get('solve_time', 0):.2f}', f'{res_d2.get('solve_time', 0):.2f}'],
    ["Gap Final", f'{res_d1.get('gap', 0)*100:.2f}%', f'{res_d2.get('gap', 0)*100:.2f}%']]
full_data = data_op + [["", "", ""]] + [["DATOS COMPUTACIONALES", "", ""]] + data_comp
table = ax.table(cellText=full_data, loc='center', cellLoc='center', colWidths=[0.4, 0.25, 0.25])
table.auto_set_font_size(False)
table.set_fontsize(10)
table.scale(1.2, 1.8)
for i in [0, 5]:
    for j in range(3):
        table[(i, j)].get_text().set_weight('bold')
        table[(i, j)].set_facecolor('#dcdcdc')
plt.title("Resumen de Resultados del Modelo MILP - TFG", fontweight='bold', pad=20)
plt.savefig(nombre_archivo, bbox_inches='tight')
plt.close()

#=====
# 3. CRONOGRAMA OPERATIVO DEL BUQUE
#=====

import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.patches as mpatches
import numpy as np
def generar_estado_buque_mejorado(res, T, nombre):
    plt.figure(figsize=(15, 3))
    for t in range(T):
        if res['xPIP'][t] > 0.5: color = '#e74c3c' # Rojo: PIP
        elif res['xMC'][t] > 0.5: color = '#3498db' # Azul: MC

```

```

elif res['xN'][t] > 0.5: color = '#2ecc71' # Verde: Navegación
else: color = '#95a5a6' # Gris: Puerto
plt.hlines(y=1, xmin=t, xmax=t+1, colors=color, lw=50)
plt.xlim(0, T)
plt.ylim(0.5, 1.5) # Ajustamos límites para centrar la barra gruesa
plt.yticks([])
plt.xticks(np.arange(0, T + 1, 30), fontsize=11, rotation=0)
plt.title(f'Cronograma Operativo: {nombre.split('.')[0]}', fontsize=14, fontweight='bold', pad=15)
patches = [
    mpatches.Patch(color='#2ecc71', label='Navegación'),
    mpatches.Patch(color='#95a5a6', label='Puerto'),
    mpatches.Patch(color='#3498db', label='Mantenimiento (MC)'),
    mpatches.Patch(color='#e74c3c', label='Inmovilización (PIP)')]
plt.legend(handles=patches, loc='upper center', bbox_to_anchor=(0.5, -0.3),
           ncol=4, frameon=False, fontsize=12)
plt.tight_layout()
plt.savefig(nombre, dpi=300, bbox_inches='tight')
plt.close()
#=====
# 2. FATIGA Y ESFUERZO HUMANO
#=====
def graficar_fatiga_profesional(res, T, d_num, nombre, S_d=150):
    plt.figure(figsize=(20, 5))
    idx = d_num - 1
    if idx in res['fatiga_list']:
        valores = res['fatiga_list'][idx]
        plt.plot(range(T), valores, label=f'Dotación {d_num}', linewidth=1.8, color='#2c3e50')
        plt.fill_between(range(T), valores, S_d, where=(np.array(valores) > S_d), color='red', alpha=0.3,
label="Exceso de Fatiga")
        plt.axhline(y=S_d, color='red', linestyle='--', alpha=0.8, label=f'Límite S_d ({S_d})")
        plt.xticks(np.arange(0, T + 1, 30), rotation=45, fontsize=8)
        plt.title(f'Evolución de la Fatiga - Dotación {d_num} (Horizonte {T} días)", fontweight='bold')
        plt.legend(loc='upper left')
        plt.grid(True, alpha=0.2)
        plt.tight_layout()
        plt.savefig(nombre, dpi=300)

```

```

plt.close()
#=====
# 3. HEATMAP DE ROTACIONES (D=2)
#=====
def graficar_heatmap_actividad(res, T, D, nombre):
    plt.figure(figsize=(25, 3.5))
    y_data = [res['y'][d] for d in range(D)]
    buque_data = res['xN']
    full_data = np.array([buque_data] + y_data)
    y_labels = ["BUQUE (Mar)"] + [f'Dotación {d+1}' for d in range(D)]
    sns.heatmap(full_data, cmap="YlGn", cbar=False, linewidths=0, yticklabels=y_labels)
    plt.axhline(y=1, color='white', linewidth=2)
    plt.title(f'Análisis de Alternancia y Disponibilidad (D={D})', fontweight='bold', pad=15)
    plt.xticks(np.arange(0, T + 1, 30), rotation=45)
    plt.savefig(nombre, bbox_inches='tight', dpi=300)
    plt.close()
#=====
# 4. GRAFICAS COMPARATIVAS, NAVEGACIÓN ACUMULADA Y DENSIDAD FATIGA
#=====
def generar_comparativa_tfg(res_d1, res_d2, nombre):
    sns.set_style("white")
    fig, axes = plt.subplots(1, 3, figsize=(18, 6))
    escenarios = ['Única (D=1)', 'Doble (D=2)']
    # 1. Productividad
    nav = [res_d1['nav_days'], res_d2['nav_days']]
    axes[0].bar(escenarios, nav, color=['#7f8c8d', '#27ae60'], width=0.5)
    axes[0].set_title("DÍAS DE MAR TOTALES", fontweight='bold')
    # 2. Disponibilidad
    disp = [res_d1['availability'], res_d2['availability']]
    axes[1].bar(escenarios, disp, color=['#7f8c8d', '#2980b9'], width=0.5)
    axes[1].set_title("DISPONIBILIDAD (%)", fontweight='bold')
    axes[1].set_ylim(0, 100)
    # 3. Esfuerzo Medio
    esfuerzo = [res_d1['nav_days'], res_d2['nav_days']] / 2
    axes[2].bar(escenarios, esfuerzo, color=['#7f8c8d', '#d35400'], width=0.5)
    axes[2].set_title("ESFUERZO MEDIO / DOTACIÓN", fontweight='bold')

```

```
plt.suptitle("JUSTIFICACIÓN OPERATIVA DEL MODELO", fontsize=16, fontweight='bold',
y=1.02)
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.savefig(nombre, dpi=300, bbox_inches='tight')
```

```
plt.close()
```

```
def graficar_navegacion_acumulada(res_d1, res_d2, T, nombre):
```

```
    plt.figure(figsize=(12, 6))
```

```
    nav_acum_d1 = np.cumsum(res_d1['xN'])
```

```
    nav_acum_d2 = np.cumsum(res_d2['xN'])
```

```
    plt.plot(range(T), nav_acum_d1, label="D=1", color='#95a5a6', linestyle='--')
```

```
    plt.plot(range(T), nav_acum_d2, label="D=2", color='#27ae60', lw=2.5)
```

```
    plt.fill_between(range(T), nav_acum_d1, nav_acum_d2, color='#2ecc71', alpha=0.2)
```

```
    plt.title("Comparativa de Navegación Acumulada", fontweight='bold')
```

```
    plt.legend()
```

```
    plt.savefig(nombre)
```

```
    plt.close()
```

```
def graficar_perfil_riesgo(res_d1, res_d2, nombre):
```

```
    plt.figure(figsize=(12, 7))
```

```
    f1 = [val for d in res_d1.get('fatiga_list', {}) for val in res_d1['fatiga_list'][d]]
```

```
    f2 = [val for d in res_d2.get('fatiga_list', {}) for val in res_d2['fatiga_list'][d]]
```

```
    sns.kdeplot(f1, fill=True, color="#e74c3c", label="D=1", alpha=0.4)
```

```
    sns.kdeplot(f2, fill=True, color="#27ae60", label="D=2", alpha=0.4)
```

```
    plt.axvline(150, color='black', linestyle='--', label="Límite S_d")
```

```
    plt.title("PERFIL DE RIESGO: DISTRIBUCIÓN DE FATIGA", fontweight='bold')
```

```
    plt.legend()
```

```
    plt.savefig(nombre)
```

```
    plt.close()
```

```
#=====
```

5. SENSIBILIDAD

```
#=====
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
def graficar_sensibilidad_phi(phis, res_d1, res_d2, nombre_archivo):
```

```
    """
```

```
    Grafica la comparativa de días de navegación entre D1 y D2
```

```
    según el límite de sostenibilidad Phi.
```

```

"""
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(phis, res_d1, marker='o', linestyle='--', color='red', label='Dotación Única (D=1)')
plt.plot(phis, res_d2, marker='s', linestyle='-', color='green', label='Doble Dotación (D=2)')
plt.title("Sensibilidad de la Disponibilidad según Límite de Sostenibilidad ( $\phi$ )", fontsize=14)
plt.xlabel("Valor de Phi ( $\phi$ ) - % máximo de tiempo en mar por dotación", fontsize=12)
plt.ylabel("Total Días de Navegación", fontsize=12)
plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.6)
plt.legend()
for i, p in enumerate(phis):
    plt.annotate(f'{res_d1[i]} d', (phis[i], res_d1[i]), textcoords="offset points", xytext=(0,10),
ha='center', color='red')
    plt.annotate(f'{res_d2[i]} d', (phis[i], res_d2[i]), textcoords="offset points", xytext=(0,10),
ha='center', color='green')
plt.tight_layout()
plt.savefig(nombre_archivo)
plt.close()
def graficar_sensibilidad_alpha(alphas, res_d1, res_d2, nombre):
    plt.figure(figsize=(10, 6))
    plt.plot(alphas, res_d1, marker='o', label='D=1', color='#e74c3c')
    plt.plot(alphas, res_d2, marker='s', label='D=2', color='#27ae60')
    plt.title("Sensibilidad Alpha (Penalización Fatiga)")
    plt.grid(True, alpha=0.3)
    plt.legend()
    plt.savefig(nombre)
plt.close()

```