



**Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar**

TRABAJO FIN DE GRADO

*Optimización y simulación para la determinación óptima de
dotación de refuerzo en Buques de la Armada Española*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Ovidiu Nicolae Bacita Bacita

DIRECTORES: Sergio Borrallo Tirado

Débora Cores Carrera

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Optimización y simulación para la determinación óptima de
dotación de refuerzo en Buques de la Armada Española*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

La Armada se enfrenta a la necesidad de ajustar la dotación en sus buques para asegurar el cumplimiento de sus misiones. Esta necesidad es especialmente evidente en los Buques de Acción Marítima (BAM), donde las bajas médicas, las rotaciones y los cambios operativos generan diferencias entre la dotación prevista y la realmente disponible.

Este TFG desarrolla un modelo de optimización y simulación basado en mínimos cuadrados con restricciones, usando el software MATLAB. A partir de datos históricos de disponibilidad, probabilidades de navegación y escenarios hipotéticos, se estima el número de efectivos de refuerzo necesarios para cumplir con las misiones sin sobrepasar los límites de personal óptimo en diversos escenarios operativos. La metodología se fundamenta en distintos casos de estudio, considerando tanto ausencias imprevistas como fluctuaciones en la actividad operativa. Los resultados permiten determinar el refuerzo aproximado para cada categoría, ajustando la tripulación a las necesidades reales de cada buque. Aunque la validación se ha realizado con datos específicos de los BAM, la aproximación es flexible y aplicable a otras unidades, ofreciendo un marco objetivo en la asignación de recursos.

PALABRAS CLAVE

Optimización, Buques de Acción Marítima, Dotación, Gestión de personal, MATLAB.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera dedicar mi más sincero agradecimiento a mis tutores. Al Capitán de Corbeta Don Sergio Borrallo Tirado y a Doña Débora Cores Carrera, por su continuo apoyo, dedicación y guía a lo largo del desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado. Su experiencia, inmensa paciencia y exigencia han sido una parte fundamental para alcanzar los objetivos de este proyecto.

A mi familia, en especial a mi madre y mi hermana, gracias por ser los dos pilares fundamentales de mi vida. Por su apoyo incondicional y ánimos en los momentos más difíciles y exigentes de este proceso de formación. Sin su confianza, este logro no habría sido posible.

Finalmente, quisiera dar las gracias a mis amigos y a mi pareja, por su comprensión, paciencia, innumerables consejos y momentos dedicados.

A todos ustedes, gracias por formar parte de esta etapa tan importante en mi vida.

CONTENIDO

Contenido	9
Índice de Figuras	11
Índice de Tablas.....	12
1 Introducción y objetivos	13
1.1 Justificación del tema.....	13
1.2 Contexto general	13
1.3 Motivación del estudio.....	15
1.4 Objetivos	16
1.4.1 Objetivos generales.....	16
1.4.2 Objetivos específicos	16
2 Estado del arte	18
2.1 Los Buques de Acción Marítima	18
2.2 El entorno marítimo de actuación	19
2.3 Misiones principales y despliegues operativos	20
2.3.1 Misiones principales	20
2.3.2 Despliegues operativos	20
2.4 Antecedentes	21
2.5 Proyectos relacionados.....	22
2.6 Métodos de mínimos cuadrados y regresión lineal	22
2.6.1 Ajuste lineal de datos y planteamiento del problema	22
2.6.2 Existencia y unicidad de la solución.....	23
2.6.3 Métodos para resolver problemas MCL	23
2.6.4 Métodos iterativos para resolver problemas MCL	24
2.6.5 Aplicación de MCL en el ámbito de gestión de personal	24
2.7 Teorías y conceptos relevantes	25
2.7.1 Modelos de optimización y simulación	25
2.7.2 Gestión de recursos humanos en operaciones marítimas	25
2.7.3 Teoría de la probabilidad y estadística aplicada	26
2.7.4 Modelos de decisión bajo incertidumbre	26
3 Planteamiento del problema	27
3.1 Descripción del problema	27
3.2 Importancia del problema	27
3.3 Limitaciones del problema.....	28

3.3.1 Limitaciones en la calidad y disponibilidad de datos	28
3.3.2 Simplificaciones en la estructura del modelo	28
3.3.3 Falta de consideración de aspectos económicos	29
3.3.4 Limitaciones en la adaptabilidad a escenarios dinámicos	29
3.3.5 Ausencia de un análisis de impacto sobre la efectividad de la operación	29
4 Datos y métodos de análisis	30
4.1 Diseño del estudio	30
4.2 Descripción de los datos disponibles	30
4.2.1 Tipos de datos recolectados	30
4.2.2 Fuentes de información.....	34
4.3 Planteamiento del problema de mínimos cuadrados.....	34
4.4 Implementación de la optimización	42
4.4.1 Herramientas y software empleados	42
4.4.2 Parámetros evaluados	42
5 Evaluación de escenarios.....	44
5.1.1 Casos de estudio	44
5.1.2 Análisis de sensibilidad del modelo	46
6 Análisis crítico de los resultados	48
7 Conclusiones	63
7.1 Aportaciones del estudio	63
7.2 Resumen de hallazgos	64
7.3 Líneas futuras	64
8 Bibliografía.....	66
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	68
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	69
Anexo III: Códigos MATLAB	70
Anexo IV: Datos obtenidos MATLAB	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Buque de Acción Marítima P-41 [11].	18
Figura 2-2 Zona Económica Exclusiva de España [17].	19
Figura 2-3 Despliegue Golfo de Guinea [20].	20
Figura 4-1 Gráfico de barras sobre los esfuerzos de los BAM en 2023. (Elaboración propia)	31
Figura 4-2 Gráfico de barras de días de navegación por buque 2024. (Elaboración propia)	31
Figura 4-3 Gráfico sobre la situación de personal unidades MARCAN. (Elaboración propia)	32
Figura 4-4 Estado del personal Unidades MARCAN en abril 2024. (Elaboración propia)	32
Figura 4-5 Estado del personal de marinería en Unidades MARCAN. (Elaboración propia)	33
Figura 4-6 Gráfico de tendencia de cobertura de personal año 2023. (Elaboración propia)	33
Figura 6-1 Comparación dotación final por caso Resolución independiente. (Elaboración propia)	48
Figura 6-2 Comparación del x_{opt} por caso. (Elaboración propia)	49
Figura 6-3 Comparación de residuo por caso. (Elaboración propia)	50
Figura 6-4 Caso base. (Elaboración propia)	51
Figura 6-5 Caso disminución de probabilidad de navegación. (Elaboración propia)	52
Figura 6-6 Caso aumento de la dotación ideal. (Elaboración propia)	53
Figura 6-7 Comparación por casos de dotación final. (Elaboración propia)	54
Figura 6-8 Comparación de dotaciones finales por caso y barco. (Elaboración propia)	55
Figura 6-9 Caso probabilidad muy bajas de navegación. (Elaboración propia)	55
Figura 6-10 Caso ideal muy grande. (Elaboración propia)	56
Figura 6-11 Comparación de dotación final por caso y categoría. (Elaboración propia)	56
Figura 6-12 Comparación por casos. (Elaboración propia)	57
Figura 6-13 Comparación de dotaciones final. (Elaboración propia)	58
Figura 6-14 Caso dotación ideal muy grande. (Elaboración propia)	58
Figura 6-15 Caso probabilidades muy bajas. (Elaboración propia)	59
Figura 6-16 Comparación de dotaciones finales por caso y categoría. (Elaboración propia)	59
Figura 6-17 Comparación de dotación final por categoría en todos los casos. (Elaboración propia)	60
Figura 6-18 Caso probabilidades muy bajas. (Elaboración propia)	61
Figura 6-19 Caso dotación ideal muy grande. (Elaboración propia)	61
Figura 6-20 Caso probabilidad 0 distintas configuraciones	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6-1 Comparación resultados resolución independiente. (Elaboración propia).....	50
--	----

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Justificación del tema

En el marco de la Armada, la correcta planificación del personal a bordo de los buques es un factor decisivo para garantizar la operatividad y la seguridad durante las misiones. No obstante, las propias particularidades de la Armada, que abarcan desde la variedad de escenarios de despliegue hasta la heterogeneidad de las funciones a bordo, generan una variabilidad significativa en la disponibilidad real del personal. La influencia de factores como bajas médicas, formaciones programadas o relevos para misiones internacionales añade un nivel de incertidumbre que dificulta la gestión óptima de la dotación.

Esta realidad se traduce en un riesgo para el cumplimiento de las misiones, pues contar con menos personal del necesario puede conducir a situaciones de sobrecarga y fatiga, mientras que un exceso de tripulación supone un coste adicional que impacta en los recursos de la institución. De esta manera, la asignación eficaz de la dotación de refuerzo se vuelve un problema de primer orden, y demanda el desarrollo de herramientas analíticas que permitan determinar, de manera confiable, la cantidad óptima de personal extra necesaria para cada escenario operativo.

Con el objetivo de abordar esta problemática, el proyecto propone la aplicación de métodos de optimización y simulación para la determinación de la dotación de refuerzo en buques de la Armada. La aproximación empleada se basa en modelos de mínimos cuadrados con restricciones, implementados en MATLAB, y utiliza los datos disponibles de cada categoría, complementados con escenarios hipotéticos cuando la información histórica resulta limitada.

El modelo resultante posee dos características fundamentales. En primer lugar, se adapta con flexibilidad a distintas clases de buques, escenarios de navegación y tipos de misión, puesto que está concebido para manejar variaciones en la disponibilidad de personal y en la probabilidad de navegación. En segundo lugar, integra de forma coherente la posibilidad de situaciones imprevistas, como ausencias o sobrecargas de trabajo, ofreciendo soluciones que evitan tanto que la dotación este por debajo, que menoscaba la eficacia de las operaciones, como el sobredimensionamiento, que encarece la actividad naval.

Si bien el enfoque es aplicable a toda la Armada, en este estudio se ha centrado el análisis en los buques de la clase Meteoro, de los que se cuenta con datos reales y estimaciones representativas de sus dinámicas operativas. Esto permite ilustrar con un caso concreto las ventajas y la pertinencia de la metodología: las limitaciones de personal, los requerimientos según la misión y los perfiles de navegaciones anuales se reflejan en los modelos y en las simulaciones, con lo que se consigue una aproximación más realista y práctica.

El desarrollo de esta solución no solo posee un valor académico, al enmarcarse en el ámbito de la optimización matemática y el análisis de sistemas, sino que también podría suponer una relevancia práctica para la Armada. Una determinación precisa de la dotación de refuerzo en cada escenario incide directamente en la eficiencia en el uso de los recursos humanos y materiales, refuerza la seguridad del personal embarcado y contribuye a optimizar la asignación de personal para atender las necesidades operativas.

1.2 Contexto general

La dotación a bordo de los buques representa un factor determinante para la seguridad y la eficacia de las operaciones navales. Si bien la tecnología y la automatización han avanzado de forma notable, la experiencia y el criterio humano continúan siendo imprescindibles en escenarios de emergencias y misiones de rescate, donde resulta vital tomar decisiones oportunas y flexibles. Por este motivo, la planificación del personal debe entenderse como un elemento dinámico que no se limita a la etapa de

diseño del buque, sino que se mantiene a lo largo de toda su vida operativa, afectando de manera directa tanto la sostenibilidad económica como la funcionalidad[1].

Para ilustrar de manera concreta el problema de la falta de personal en la Armada, tomaremos como referencia los buques de la *Clase Meteoro*, que representan un claro ejemplo de esta problemática. Estas unidades, debido a sus características operativas y organizativas particulares, enfrentan una escasez de dotación de manera recurrente y prolongada, lo que repercute directamente en su capacidad para llevar a cabo las navegaciones necesarias para el cumplimiento de sus misiones.

El origen de este Trabajo de Fin de Grado radica precisamente en la necesidad expresada por la Armada de evaluar una solución para este tipo de buques. Sin embargo, el alcance del estudio no se limita únicamente a la *Clase Meteoro*, sino que busca ofrecer un análisis más amplio sobre la posibilidad de aplicar este modelo de refuerzo a otras unidades de la Armada que puedan enfrentar circunstancias similares. Para sustentar este análisis, se emplearán datos históricos específicos sobre el personal embarcado y los días de navegación de los buques de la *Clase Meteoro*, lo que permitirá una evaluación más precisa y fundamentada de la viabilidad y eficacia de las dotaciones de refuerzo en el contexto operativo de la Armada.

Aun con estos esfuerzos, no es raro que algunas unidades tengan periodos en los que su dotación real se halle por debajo de la cifra ideal. Entre los factores que conducen a estas carencias figuran las bajas por motivos médicos, la asignación temporal de efectivos a misiones de mayor prioridad o el hecho de que ciertos puestos requieran especializaciones difíciles de cubrir. Esto genera sobrecargas de trabajo y fatiga, al tiempo que reducen el margen de reacción ante situaciones imprevistas. Por otro lado, superar con holgura la dotación óptima puede derivar en costes injustificados y en la ineficiencia que supone disponer de personal sin un cometido claro.

Para atenuar estos efectos, las marinas de distintos países han ensayado estrategias de optimización del recurso humano, buscando un equilibrio entre la reducción de personal y la necesidad de preservar la capacidad de respuesta[1]. Un ejemplo ilustrativo es el Proyecto Fénix en el aeropuerto de Huesca-Pirineos, propuesto para la formación avanzada de pilotos de emergencias. Este proyecto pone de relieve la importancia de contar con personal capacitado para intervenir en misiones críticas, reforzando la idea de que la eficacia operativa depende en buena medida de una dotación bien preparada y ajustada a las necesidades[2]. No obstante, añadir personal de forma indiscriminada sin un análisis profundo puede resultar costoso y poco práctico, sobre todo si no hay un mecanismo que asegure una distribución eficiente según las demandas de cada misión.

La experiencia también ha demostrado que confundir la optimización con la simple minimización del número de tripulantes conlleva riesgos considerables. El programa del *DDG-1000 Zumwalt* constituye una referencia en la que la dotación se concibió como un parámetro clave de rendimiento, integrando la tecnología y la automatización sin relegar la importancia del factor humano[3]. En algunos casos, la búsqueda de tripulaciones reducidas sin una estructura bien concebida ha concluido en una sobrecarga laboral y en un mantenimiento preventivo deficitario, lo que afecta la longevidad y la operatividad del buque.

Ante este panorama, la Armada afronta el desafío de establecer procesos de planificación que atiendan las dinámicas específicas de cada unidad. El presente estudio se centra en el desarrollo de un algoritmo que calcule la dotación de refuerzo adecuada para que los buques, incluida la *Clase Meteoro*, se acerquen lo máximo posible a su dotación ideal sin incurrir en un exceso de personal. La propuesta descansa en la combinación de datos históricos y simulaciones de escenarios donde se contemplan la probabilidad de navegación, las eventuales ausencias y las particularidades de cada misión. El objetivo es cubrir las necesidades derivadas de las operaciones navales sin generar costos superfluos ni comprometer la eficacia de las unidades.

Dada la relevancia de mantener niveles altos de disponibilidad y de seguridad, resulta fundamental contar con un método objetivo que sirva de apoyo en la toma de decisiones relacionadas con la

asignación de personal. Para la Armada, un enfoque que equilibre la dotación necesaria y el coste asumible representa un avance en la racionalización de los recursos humanos, así como en la optimización de la respuesta a crisis y emergencias. De esta manera, se consolida la idea de que la planificación de personal es un componente estratégico de la gestión naval, en el que confluyen aspectos tecnológicos, económicos y humanos para cumplir con las demandas de un entorno operativo cada vez más complejo.

1.3 Motivación del estudio

La gestión eficiente de la dotación en unidades navales es un factor crítico que impacta directamente en la seguridad, operatividad y sostenibilidad de la Armada. A lo largo de los años, la reducción de costos ha impulsado la implementación de tecnologías y metodologías de optimización del personal en diversas marinas.

Las fuerzas navales han implementado tecnologías avanzadas de simulación y optimización para la reducción de costos y la mejora de la eficiencia operativa. La Marina de los EE. UU. emplea métodos de simulación Monte Carlo para evaluar la disponibilidad y mantenimiento de su flota, permitiendo una planificación precisa en la asignación de recursos y la predicción de necesidades futuras. Este enfoque probabilístico facilita la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre, asegurando la operatividad con un uso eficiente del presupuesto[4]. Además, el uso de inteligencia artificial y *machine learning*, ha revolucionado la optimización logística y táctica en operaciones militares. La Marina de los EE. UU. ha desarrollado también, el "*Optimized Fleet Response Plan*", un sistema basado en IA que predice fallas en los buques y ajusta dinámicamente los programas de mantenimiento para minimizar el tiempo fuera de servicio. Por otra parte, la Armada China ha integrado modelos de aprendizaje profundo para optimizar el consumo de combustible y mejorar la distribución de recursos en buques de guerra, maximizando la eficiencia operativa y reduciendo costos a través del análisis automatizado de grandes volúmenes de datos en tiempo real[5].

Sin embargo, experiencias previas, como las de la Armada de Estados Unidos, han evidenciado que una disminución de tripulación sin un análisis exhaustivo puede derivar en fallos operativos, sobrecarga de trabajo y una reducción de la capacidad de respuesta de los buques en escenarios críticos.

Este problema se hizo evidente en la Marina de los EE. UU., donde los recortes en mantenimiento y personal tuvieron consecuencias graves en la disponibilidad operativa de sus buques. A pesar de las advertencias del *Informe Balisle (2010)*, que señalaba cómo la reducción de costos afectaba la preparación de la flota, las medidas correctivas no fueron suficientes. La disminución de dotaciones en los barcos generó tripulaciones sobrecargadas y con entrenamiento insuficiente, mientras que la falta de inversión en mantenimiento resultó en un deterioro acelerado de los buques. Estas deficiencias quedaron en evidencia con una serie de accidentes en 2017, incluyendo las colisiones del *USS John S. McCain* y el *USS Fitzgerald*, que expusieron fallas en la supervisión operativa, entrenamiento y condiciones de la flota[6].

Como respuesta a estos incidentes, se ordenó la *Revisión Integral (2017)*, que confirmó que los recortes habían mermado la seguridad y operatividad de los buques. Se identificó que la reducción de personal había llevado a fatiga en las tripulaciones, aumentando el riesgo de errores humanos, mientras que la falta de mantenimiento dejó a numerosos barcos fuera de servicio. Además, los fondos ahorrados no se destinaron a mejorar la preparación de la flota, sino que fueron absorbidos por otros programas, debilitando aún más la capacidad operativa[6].

En el caso de la Armada, la dotación de ciertas unidades ha representado un desafío desde su concepción, afectado su operatividad y la capacidad de cumplir misiones con eficiencia. De esta manera, se busca garantizar que los buques dispongan de una tripulación suficiente para cumplir con sus misiones sin incurrir en sobredimensionamiento de personal, optimizando así los recursos disponibles. En la Marina Mercante Española, la regulación de la dotación mínima de seguridad está establecida a nivel

nacional por la *Orden Ministerial del 14 de julio de 1964*, complementada por el *Real Decreto 285/2002* sobre jornadas especiales de trabajo, el Código IGS y otras normativas europeas e internacionales, como el *Convenio sobre el Trabajo Marítimo 2006* y resoluciones de la Organización Marítima Internacional (OMI)[7], [8]. Estas normativas buscan garantizar que los buques cuenten con una tripulación suficiente y adecuadamente calificada para operar de manera segura y eficiente. Sin embargo, en algunos casos, el exceso de dotación puede generar ineficiencias, como costos adicionales en salarios y mantenimiento, limitaciones en el espacio disponible para la tripulación, o incluso una disminución en la moral del personal debido a la falta de funciones claras o la sobrecarga de trabajo en determinadas áreas. Este problema resalta la necesidad de optimizar la dotación a bordo, equilibrando la seguridad operativa con la eficiencia económica y el bienestar de la tripulación[9].

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos generales

El objetivo principal de este estudio consiste en desarrollar un sistema de análisis, basado en métodos matemáticos de optimización y simulación en MATLAB, que permita determinar el porcentaje de dotación de refuerzo adicional necesario para compensar las bajas previstas. Se supone que la dotación base del 100% es la cifra óptima para la operatividad, y el modelo calcula el refuerzo extra que, sumado a dicha dotación base, garantiza el cumplimiento de los requisitos operativos. Pese a que la aplicación ideal del modelo contemplaría un amplio historial de datos reales, la presente investigación se apoya en la información disponible, complementada con simulaciones para representar escenarios de disponibilidad y navegación. Esta aproximación permite compensar la ausencia de un registro detallado sobre la dotación y operatividad en buques de la Armada, lo que se desarrollará más adelante en el apartado de antecedentes.

El estudio, pretende ofrecer un método que contribuya a la planificación estratégica del personal, promoviendo una distribución más efectiva y equitativa de los recursos en la flota.

En cuanto a las limitaciones, este proyecto se circunscribe a un marco de análisis centrado, de forma principal, en la *Clase Meteoro* y en un conjunto limitado de datos y supuestos propios de un Trabajo Fin de Grado. Por consiguiente, el modelo no abarca todas las particularidades de diferentes clases de unidades navales ni contempla de manera exhaustiva la diversidad de misiones que podría afrontar la Armada. Sin embargo, los planteamientos y conclusiones obtenidos constituyen una base para futuras investigaciones, con la posibilidad de ampliarse o adaptarse a otros buques, siempre que se disponga de datos adicionales que permitan refinar el sistema de predicción y ajuste.

1.4.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo matemático que, de forma objetiva y basado en reglas y condiciones previamente establecidas, determine el número óptimo de dotación de refuerzo en los buques de la *Clase Meteoro*. Este modelo utilizará las estadísticas históricas de personal y las navegaciones del buque en cuestión para evitar que las tripulaciones operen por debajo de los umbrales de seguridad o excedan lo estrictamente necesario. Aunque la determinación de los límites óptimos de dotación es, en última instancia, competencia de la Armada o del organismo encargado de la gestión de personal, este estudio pretende ofrecer un marco analítico que facilite la evaluación y el ajuste de dichos valores según criterios institucionales y operativos.
- Desarrollar un modelo de simulación y optimización en MATLAB que analice múltiples escenarios, combinando la disponibilidad de personal con la probabilidad de navegación. Dicho modelo deberá permitir la evaluación de posibles déficits en la dotación y el ajuste de la fuerza disponible para mantener niveles adecuados de operatividad.
- Minimizar, dentro de lo posible, la sobrecarga de trabajo y el riesgo operativo resultante de una dotación insuficiente, sin incurrir en un sobredimensionamiento costoso. Para ello, se tendrán en

cuenta las oscilaciones habituales en la disponibilidad de la tripulación y las exigencias operativas de cada misión.

- Proporcionar una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que sea adaptable a la información real disponible para cada buque, y escalable a otros escenarios de la flota cuando se disponga de datos más extensos.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Los Buques de Acción Marítima

Los BAM constituyen la apuesta más reciente de la Armada para reforzar la vigilancia, la protección y la seguridad en el entorno marítimo. Diseñados y construidos por Navantia, destacan por su versatilidad y capacidad multifuncional, pudiendo afrontar misiones de defensa, control del tráfico marítimo, operaciones de rescate y cooperación internacional, así como apoyo logístico y tareas de investigación[10]. Su concepción moderna, como muestra la Figura 2-1, permite adaptar cada unidad a distintas necesidades operativas, desde labores oceanográficas hasta operaciones subacuáticas o de inteligencia.



Figura 2-1 Buque de Acción Marítima P-41 [11].

Las capacidades tecnológicas de los BAM se reflejan en sistemas como el SCOMBA, que integra sensores y armamento para maximizar la eficacia operativa, y en la posibilidad de operar helicópteros y drones, ampliando el alcance de vigilancia y la rapidez de respuesta[12]. Con una eslora de 93.9 metros, una manga de 14.2 metros y un desplazamiento aproximado de 3000 toneladas, ofrecen una autonomía de hasta 8000 millas náuticas[10]. Además, la propulsión híbrida CODOE (*Combined Diesel or Electric*) contribuye a la eficiencia en el consumo de combustible y reduce la huella medioambiental de las operaciones [12].

En el ámbito logístico y de mantenimiento, los BAM se diseñaron con la premisa de facilitar el soporte operativo y la sostenibilidad a largo plazo, incorporando sistemas de gestión a bordo que

permiten una monitorización continua de los equipos y una rápida identificación de averías. Este planteamiento busca reducir los tiempos de inactividad en puerto y mejorar la disponibilidad global de la flota, un factor esencial para el cumplimiento de los compromisos operativos de la Armada[10], [12].

2.2 El entorno marítimo de actuación

El entorno marítimo desempeña un papel esencial en la seguridad y el desarrollo económico mundial, ya que aproximadamente el 90% del comercio internacional se realiza por vía marítima[13]. España, con más de 8000 kilómetros de costa, ocupa una posición geográfica privilegiada: el Estrecho de Gibraltar, por donde transita el 10% del tráfico marítimo global, y el Archipiélago Canario, situado en la confluencia de rutas entre Europa, África y América, son áreas de gran relevancia estratégica[14]. Las políticas europeas que fomentan las autopistas del mar y el "*short sea shipping*" han revalorizado el transporte marítimo, reconociéndolo como una opción eficiente y más sostenible frente a otros modos de desplazamiento[15].

Este extenso y dinámico espacio marítimo enfrenta asimismo amenazas diversas, como el terrorismo, la piratería, el tráfico de personas, de drogas y de armas, así como riesgos ambientales relacionados con el cambio climático y la contaminación marina[16]. Para la Armada, proteger los intereses nacionales e internacionales en este entorno multifacético exige una capacidad operativa sólida y versátil. En este sentido, los BAM destacan como plataformas capaces de responder a amenazas asimétricas y escenarios de alta complejidad, contribuyendo a salvaguardar la estabilidad y la seguridad de las rutas marítimas[12]. Sus sistemas de comunicaciones y de mando y control les permiten interoperar con otras unidades de la Armada y con aliados internacionales, promoviendo la cooperación en el ámbito de la seguridad marítima.



Figura 2-2 Zona Económica Exclusiva de España [17].

El papel de España en la Unión Europea y en organizaciones internacionales refuerza la importancia de contar con buques polivalentes que satisfagan un amplio espectro de misiones, desde la defensa y la protección del tráfico mercante hasta las tareas de rescate humanitario y control medioambiental. En un contexto de creciente actividad marítima y disputas por los recursos naturales, la presencia de buques con las capacidades de los BAM resulta esencial para salvaguardar la Zona Económica Exclusiva (ZEE), mostrado en la Figura 2-2, y proyectar la imagen de un país comprometido con la seguridad global.

2.3 Misiones principales y despliegues operativos

2.3.1 Misiones principales

Los BAM cumplen funciones clave en la protección del espacio marítimo, lo que incluye la vigilancia y el control de la ZEE, la lucha contra la piratería y el narcotráfico, y el apoyo a operaciones humanitarias y medioambientales. Su versatilidad radica en la posibilidad de operar helicópteros y vehículos no tripulados, lo que mejora sus capacidades de detección y refuerza su eficacia en misiones de rescate, apoyo logístico y ayuda humanitaria. Además, su potencia de fuego y sistemas de combate les permiten afrontar amenazas asimétricas en la mar, garantizando la seguridad de las vías marítimas y la protección de los intereses estatales[18], [19].

La versatilidad de estos buques se extiende, asimismo, a operaciones de presencia y vigilancia en regiones alejadas de la península, como el Golfo de Guinea, Figura 2-3, o el Índico, donde la Armada puede desempeñar roles de cooperación en instrucción, lucha contra la pesca ilegal o apoyo a aliados en la prevención de conflictos. Los BAM han demostrado su utilidad en misiones de escolta de buques civiles que navegan en zonas de riesgo y en operaciones de protección de infraestructuras marítimas críticas[20].



Figura 2-3 Despliegue Golfo de Guinea [20].

2.3.2 Despliegues operativos

En el ámbito internacional, los BAM han participado en misiones como la Operación Atalanta, iniciativa de la Unión Europea para combatir la piratería en el Golfo de Adén y el Océano Índico, en la que han escoltado buques de ayuda humanitaria y resguardado rutas comerciales. Su integración en operaciones de la OTAN y la Unión Europea refuerza la seguridad marítima en el Mediterráneo y en zonas de alta sensibilidad estratégica, mediante labores de interdicción, vigilancia y control de actividades ilícitas[21].

A nivel nacional, los BAM colaboran con las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado en la protección de la ZEE española, especialmente en áreas críticas como el Estrecho de Gibraltar, donde la lucha contra el narcotráfico y el contrabando reviste particular importancia[20]. También participan en labores de salvamento y rescate, respondiendo con inmediatez a emergencias marítimas que pueden involucrar derrames de sustancias contaminantes o naufragios, contribuyendo así a la protección medioambiental y a la salvaguarda de vidas humanas.

La participación continua de los BAM en ejercicios conjuntos y misiones de proyección, tanto en aguas nacionales como internacionales, pone de manifiesto su importancia estratégica para la Armada. Su presencia en escenarios de crisis aporta disuasión, capacidad de respuesta rápida y un valioso apoyo logístico, lo que refuerza el compromiso de España con la estabilidad internacional y la defensa de los intereses marítimos. En consecuencia, estos buques se han consolidado como uno de los pilares básicos de la flota española, sumando sus capacidades polivalentes a la robustez de otras unidades navales para proteger rutas comerciales, prevenir actos ilícitos y salvaguardar la soberanía nacional en alta mar.

2.4 Antecedentes

El presente estudio surge de la necesidad de mejorar la gestión del personal en los Buques de Acción Marítima, unidades versátiles de la Armada diseñadas para operar en un entorno cada vez más complejo y demandante. Los BAM, caracterizados por su alto grado de automatización y enfoque polivalente, experimentan en la práctica variaciones significativas de dotación debido a bajas médicas, permisos, rotaciones y la exigencia de formación continua. Estas circunstancias generan sobrecarga laboral y fatiga en la tripulación, afectando la eficacia de las misiones y prolongando los ciclos de adiestramiento. Si bien las innovaciones tecnológicas han facilitado el desempeño operativo, el factor humano continúa siendo determinante en la seguridad y la sostenibilidad de las operaciones navales.

A lo largo de los últimos años, se ha observado en diferentes marinas la adopción de políticas de reducción de costes que, en no pocos casos, han derivado en una plantilla insuficiente para las exigencias diarias de los buques. Ejemplos como la *US Navy* evidencian que la supuesta optimización mediante recortes drásticos de personal puede conducir a incidentes y sobrecarga laboral, obligando posteriormente a invertir en soluciones que devuelvan la capacidad operativa a niveles aceptables. En el caso de los BAM, la Armada ha procurado equilibrar la incorporación de tecnología y la retención de un número adecuado de tripulantes para salvaguardar la integridad de las operaciones, pero persisten dudas sobre cuál es el mejor punto de equilibrio entre ahorro de recursos y preparación.

Este proyecto busca estudiar la viabilidad de asignar personal adicional que complemente la dotación base de los buques, atendiendo tanto a la disponibilidad real de cada barco como a las necesidades de descanso y capacitación de la tripulación. La idea consiste en evitar la falta de personal que, en la práctica, conlleva una carga de trabajo excesiva y reduce la eficiencia en misiones extendidas o que exigen turnos de guardia sucesivos. Al mismo tiempo, se persigue no incurrir en un aumento excesivo de dotación que suponga un coste injustificado y desemboque en personal ocioso. De esta manera, se pretende equilibrar la balanza entre eficacia operativa y sostenibilidad.

Uno de los principales desafíos en la planificación de la dotación en los BAM es la falta de datos históricos detallados sobre la disponibilidad real de tripulación y la relación entre personal embarcado y carga operativa. Esta limitación impide realizar un análisis basado exclusivamente en registros previos y obliga a complementar la investigación con modelos probabilísticos y simulaciones que permitan estimar escenarios diversos.

En este estudio, la falta de información completa ha sido abordada mediante la construcción de un modelo flexible, capaz de operar con datos históricos cuando estén disponibles, pero también de generar escenarios basados en parámetros operativos realistas. Aunque esta metodología ofrece una solución viable, la precisión del modelo se vería significativamente mejorada si en el futuro se dispusiera de un mayor volumen de datos reales sobre dotación y navegación. En ese caso, el algoritmo podría ajustarse mejor a las dinámicas reales de la flota y ofrecer recomendaciones más precisas y aplicables a la planificación operativa de la Armada.

2.5 Proyectos relacionados

La problemática de la optimización de las dotaciones en buques de la Armada ha sido abordada desde perspectivas diversas en trabajos como "*El futuro de las dotaciones en los buques de la Armada: Statu Quo, Optimización o Dotaciones Múltiples*" de Luis Seguí Gómez de Olea[1]. En este estudio, se analizan las ventajas y riesgos de distintas estrategias orientadas a ajustar la cantidad de personal a bordo, examinando ejemplos en los que la reducción excesiva ha propiciado carencias operativas y situaciones de riesgo. Se resalta, además, la necesidad de integrar la perspectiva del factor humano en la fase de diseño de los buques, de modo que la automatización y el número de tripulantes formen un conjunto armónico que no comprometa la seguridad ni la capacidad de respuesta.

Otro antecedente metodológico se localiza en la "*Metodología General de Dotación, Infraestructura y Localización Óptimos*" de la Policía de Investigaciones de Chile[22]. Esta propuesta sugiere un marco sistemático para el cálculo de las necesidades de personal, contemplando variables de índole operativa y logística que permitan equilibrar la demanda real de servicios con la eficiencia en la gestión de los recursos. Aunque se trata de un ámbito diferente al de la Armada, sus principios resultan aplicables al análisis de la dotación en un buque, dado que también busca una optimización alineada con criterios de sostenibilidad y eficacia.

Estos trabajos, entre otros, avalan la pertinencia de examinar la posibilidad de establecer refuerzos de personal en los BAM, y aportan experiencias útiles sobre la gestión de riesgos asociados a la disminución de tripulaciones y la adopción de modelos operativos flexibles. Sus conclusiones demuestran la conveniencia de un enfoque integral en el que la reducción de costes no desplace la atención de la seguridad y la calidad de las operaciones.

2.6 Métodos de mínimos cuadrados y regresión lineal

La planificación de la dotación en los Buques de Acción Marítima entraña la necesidad de estimar y ajustar una serie de parámetros que relacionen la disponibilidad de personal con los requerimientos de las misiones. Con este fin, se recurre a métodos de mínimos cuadrados, una herramienta estadística que penaliza de forma especialmente intensa las desviaciones más amplias, garantizando así coherencia en las soluciones y reduciendo el error global en la aproximación de los datos.

2.6.1 Ajuste lineal de datos y planteamiento del problema

Un ajuste lineal de datos $\{y_i\}_{i=1}^m$ se formula como el problema de MCL mostrado en la ecuación:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} = \frac{1}{2} \| Cx - d \|^2 \quad (2-1)$$

Donde:

- $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$ es la matriz de diseño o de coeficientes, cuyos elementos pueden representarse como en la matriz:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mn} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{m \times n} \quad (2-2)$$

- $x \in \mathbb{R}^n$ es el vector de parámetros a determinar. En el contexto de este proyecto, se incluyen factores de refuerzo u otras variables necesarias para ajustar la dotación a los distintos escenarios.

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n \quad (2-3)$$

- $d \in \mathbb{R}^m$ es el vector de los valores observados, que en el caso de la gestión de dotaciones podrían ser diferentes respecto a la dotación ideal, promedios históricos o requerimientos de personal.

$$d = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^m \quad (2-4)$$

La función del problema de minimización puede escribirse como la expresión:

$$f(x) = \frac{1}{2}(Cx - d)^T(Cx - d) = \frac{1}{2}(x^T C^T Cx - x^T C^T d - d^T Cx + d^T d) \quad (2-5)$$

Al expandir el producto (2-5) se obtiene la expresión:

$$f(x) = \frac{1}{2}(x^T C^T Cx - 2x^T C^T d + d^T d) \quad (2-6)$$

Para hallar el mínimo, se impone que el gradiente sea igual a cero, quedando la ecuación:

$$\nabla f(x) = C^T Cx - C^T d = 0 \implies C^T Cx = C^T d \quad (2-7)$$

Las ecuaciones (2-7) se conocen como ecuaciones normales. Siempre que C tenga rango completo por columnas, la matriz $C^T C$ será invertible, y existirá una única solución al problema de mínimos cuadrados, resultando la ecuación:

$$x = (C^T C)^{-1} C^T d \quad (2-8)$$

2.6.2 Existencia y unicidad de la solución

Aunque el sistema $Cx = d$ no tenga solución exacta, la solución de MCL es la que minimiza el error cuadrático $\|Cx - d\|$. Se tienen los siguientes casos:

- Si C es rango completo columna, la solución del MCL es única.
- Si C no es rango completo, la solución no es única, pero puede obtenerse la de menor norma usando la descomposición en valores singulares (SVD) y la pseudoinversa de Moore-Penrose.

2.6.3 Métodos para resolver problemas MCL

Se pueden seguir varios métodos para resolver el problema de MCL:

- **Ecuaciones Normales**

Resolver directamente $C^T Cx = C^T d$. Es un método rápido, pero puede resultar inestable si C está mal condicionada.

- **Factorización QR**

Si $C = QR$, donde Q es ortogonal y R es triangular superior, se transforma el problema en $Rx = Q^T d$. Generalmente es más estable que las ecuaciones normales y se utiliza en numerosas librerías de álgebra lineal.

- **Descomposición SVD**

Mediante la descomposición en valores singulares $C = U\Sigma V^T$, la solución de MCL se expresa como $x = V\Sigma^+U^T d$ donde Σ^+ es la pseudoinversa de Σ . Este método es el más robusto numéricamente y abarca los casos en que C no es de rango completo.

2.6.4 Métodos iterativos para resolver problemas MCL

El problema de MCL puede también resolverse mediante el uso de métodos iterativos:

- Método de Gradiente o Gradiente Conjugado: se aplica para minimizar $f(x) = \|Cx - d\|^2$ de forma iterativa, sin necesidad de factorizar grandes matrices.
- Otros métodos de primer orden: como LSQR o el descenso de gradiente estocástico (SGD), que son adecuados para problemas de gran escala o para datos que llegan de manera secuencial.

En este presente proyecto, se opta por resolver el problema directamente mediante funciones de MATLAB como *lsqin*, que pueden combinar factorizaciones estables y métodos activos, en lugar de recurrir a métodos iterativos más avanzados. Dado que las dimensiones de las matrices suelen ser moderadas, el recurso a gradientes conjugados o métodos de primer orden no resulta indispensable.

2.6.5 Aplicación de MCL en el ámbito de gestión de personal

En la gestión de dotaciones de buques, el ajuste mediante mínimos cuadrados se emplea para relacionar la dotación efectiva con los valores objetivos como probabilidad de navegación, demanda de personal por categorías o demanda de personal según misiones a llegar a cabo. Se construye un sistema de la forma que se muestra en la expresión:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} \|Cx - d\|^2 \tag{2-9}$$

Donde:

- C representa la matriz de coeficientes que combina factores operativos como probabilidad de navegación, y el reparto porcentual de refuerzo para cada categoría.
- d es el vector objetivo que engloba la diferencia entre la dotación ideal y la dotación real o histórica.
- x agrupa las variables a optimizar, como el factor de refuerzo para cada categoría.

Este ajuste se realiza con la función *lsqin* en MATLAB, que añade la posibilidad de incorporar restricciones lineales o de no negatividad. Así, se evita que el modelo proponga soluciones fuera de la lógica operativa como refuerzos negativos o superiores a un cierto umbral y se garantiza que las nuevas dotaciones resulten viables.

La función *lsqin* resuelve un problema de mínimos cuadrados $\min \|Cx - d\|$ sujetándolo a restricciones, como $Ax \leq b$ o límites inferiores y superiores para las variables. Se busca que la diferencia entre lo calculado por el modelo y el objetivo sea la menor posible, penalizando fuertemente las desviaciones grandes.

- Se minimiza $\|Cx - d\|$ con más énfasis en las discrepancias grandes, logrando un ajuste estadísticamente coherente.
- El algoritmo impide que se violen condiciones como $x \geq 0$ o la no superación de un máximo. De este modo, el resultado se mantiene dentro de la realidad operativa, evitándose plantear dotaciones inferiores al mínimo de seguridad.
- MATLAB emplea métodos numéricamente robustos para combinar el ajuste por mínimos cuadrados y las restricciones lineales, evitando inestabilidades.
- El proceso de cálculo finaliza cuando no se puede mejorar más el error $\|Cx - d\|$ o al satisfacer las condiciones de optimalidad. Se devuelve el vector x que soluciona el problema.

2.7 Teorías y conceptos relevantes

El estudio de la dotación de personal en buques requiere un enfoque basado en modelos matemáticos y estadísticos que permitan optimizar la asignación de recursos humanos en función de la demanda operativa. Para ello, es fundamental comprender las teorías y conceptos que sustentan el análisis, desde la optimización matemática hasta la gestión de recursos humanos en entornos marítimos. En este apartado, se presentan los fundamentos teóricos que respaldan el desarrollo del modelo de optimización implementado en este estudio.

2.7.1 Modelos de optimización y simulación

La optimización en la gestión de dotaciones de personal es crucial para garantizar la operatividad de los buques sin exceder costos ni afectar la seguridad operativa. En este estudio, se ha desarrollado un modelo de optimización basado en la minimización de la reducción del porcentaje de dotación total respecto al 100%, asegurando que la tripulación disponible no sea inferior al 90% ni supere el 110%.

El modelo matemático empleado sigue los principios de la optimización bajo incertidumbre, un enfoque que permite la toma de decisiones cuando los parámetros clave no son completamente conocidos. En este contexto, la disponibilidad de la tripulación y la probabilidad de navegación son variables inciertas que requieren un tratamiento probabilístico para garantizar soluciones factibles y eficientes. Como se exponen en estudios sobre optimización bajo incertidumbre, estos modelos presuponen distribuciones de probabilidad estimables y buscan una política de decisión que sea viable para la mayoría de los posibles escenarios futuros[23].

Dado que la incertidumbre es una característica inherente a la planificación de la dotación de personal, este estudio ha implementado restricciones y funciones objetivo que permiten anticipar escenarios operativos variables, evitando decisiones subóptimas basadas en suposiciones deterministas. En lugar de depender de una única previsión fija, se construye una estrategia flexible que minimice el impacto de desviaciones inesperadas en la disponibilidad del personal[23].

2.7.2 Gestión de recursos humanos en operaciones marítimas

La gestión del factor humano en la operatividad de buques es un aspecto crítico que afecta tanto la eficiencia como la seguridad de las misiones. Según estudios sobre la gestión operacional en el ámbito marítimo, se ha determinado que el 75% de las pérdidas en la industria marítima son causadas por el factor humano, a pesar de los avances tecnológicos que han optimizado otros aspectos operacionales[24].

El porcentaje de dotación disponible representa el personal presente en el buque sin contar con refuerzos, siendo siempre inferior al 100% debido a bajas médicas, rotaciones y permisos. La gestión eficiente de la dotación debe considerar no solo la cantidad de personal necesario, sino también los efectos de la fatiga, el estrés y la toma de decisiones en situaciones críticas. Investigaciones han demostrado que la fatiga generada por sobrecarga de trabajo, turnos prolongados y falta de descanso adecuado son causas recurrentes de errores humanos a bordo, lo que refuerza la necesidad de contar con un modelo de optimización adecuado para evitar estas situaciones[24].

Dado que la fase de navegación es especialmente crítica, se requiere que la dotación se acerque lo máximo posible al 100% durante estos periodos. Con ese fin, el modelo de optimización propuesto evalúa la necesidad de refuerzo en función de la probabilidad de navegación de cada período. De hecho, el modelo pondera de forma diferenciada las estadísticas históricas de dotación, asignando mayor peso a aquellos periodos en los que se navega con más frecuencia. Este enfoque busca que el ajuste final de la dotación de refuerzo resulte óptimo para los periodos de navegación, en comparación con los periodos en los que el buque permanece en puerto, garantizando así una distribución de la tripulación que maximice la seguridad y eficiencia operativa.

2.7.3 Teoría de la probabilidad y estadística aplicada

El análisis de la disponibilidad del personal y la probabilidad de navegación se basa en valores medios y desviaciones estándar, lo que permite estimar la variabilidad sin necesidad de generar escenarios aleatorios masivos. El cálculo del porcentaje óptimo de refuerzo se realiza considerando la dispersión de los datos, permitiendo obtener una solución precisa sin recurrir a técnicas de simulación complejas.

Además, el factor humano introduce un nivel de incertidumbre que no puede ser completamente modelado mediante distribuciones estadísticas. Factores como la percepción del riesgo, la toma de decisiones bajo presión y la comunicación entre tripulantes afectan la operatividad del buque y deben ser considerados en cualquier modelo de gestión de dotación[24].

El modelo de optimización utilizado pondera la dotación en función de su desviación respecto a la media, asegurando que la solución final refleje condiciones operativas realistas sin necesidad de técnicas de muestreo probabilístico. Esta metodología permite una estimación robusta y computacionalmente eficiente del refuerzo necesario para cada periodo.

2.7.4 Modelos de decisión bajo incertidumbre

La toma de decisiones en entornos con incertidumbre requiere un enfoque basado en modelos matemáticos que permitan evaluar distintas configuraciones de dotación. Para ello, se emplea un criterio de decisión que minimiza la desviación respecto a la dotación ideal, asegurando que el refuerzo propuesto sea el adecuado según la variabilidad del personal y la probabilidad de navegación en cada periodo.

El factor humano es un componente determinante en la toma de decisiones operativas en el mar. Según estudios recientes, el estrés, la fatiga y la falta de comunicación efectiva entre tripulantes son factores recurrentes en accidentes marítimos. En particular, la fatiga reduce la capacidad de respuesta de la tripulación y disminuye su eficiencia en la gestión de tareas críticas[24]. Para abordar estos desafíos, el modelo optimizado permite calcular una solución precisa sin necesidad de generar miles de escenarios posibles, reduciendo la carga computacional y asegurando un refuerzo eficiente.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 Descripción del problema

En la planificación operativa se parte de la premisa de que la dotación base (100%) es la cifra óptima necesaria para la operatividad del buque. Sin embargo, debido a bajas, rotaciones y otros imprevistos, el número real de efectivos disponibles es inferior a este ideal. Por ello, el modelo se centra en calcular el refuerzo adicional, es decir, el porcentaje extra de personal necesario para compensar estas deficiencias, de modo que, al sumarlo a la dotación base, se alcanza la dotación total óptima.

El problema se intensifica debido a la variabilidad en la probabilidad de navegación, la cual depende del tipo de misión y del periodo del año. Durante fases de alta actividad, es fundamental que la dotación garantice la operatividad sin sobrecargar a la tripulación, mientras que en periodos de menor exigencia, una dotación excesiva implica costos innecesarios. Encontrar el equilibrio adecuado para asignar refuerzos según las necesidades reales de cada buque resulta crucial para evitar tanto la insuficiencia operativa como el sobredimensionamiento del personal a bordo.

Para abordar esta problemática, en este estudio se desarrolla un modelo matemático de optimización basado en mínimos cuadrados con restricciones, el cual minimiza la desviación entre la dotación real y la ideal. Este enfoque permite calcular la dotación de refuerzo necesaria en función de datos históricos y escenarios simulados, asegurando así una asignación más eficiente del personal en la Armada.

3.2 Importancia del problema

La planificación de la dotación de personal en unidades navales constituye un desafío estratégico que impacta directamente en la operatividad, la eficiencia económica y el cumplimiento de normativas internacionales. Sin embargo, en la práctica, las bajas y rotaciones hacen que el número de efectivos disponibles sea inferior a este ideal. Por ello, es importante determinar el porcentaje extra de personal que, sumado a la dotación base, completa el total óptimo, evitando tanto un refuerzo insuficiente, que comprometería la seguridad y la seguridad, como un exceso, que supondría un uso ineficiente de recursos [1].

En el ámbito económico, el exceso de personal a bordo representa un uso ineficiente de los recursos disponibles. La sobredotación incrementa costos en salarios, formación y logística sin una justificación operativa clara, lo que en última instancia reduce la eficiencia en la asignación de recursos dentro de la Armada. Además, es necesario considerar el marco normativo vigente, dado que existen regulaciones nacionales e internacionales que establecen mínimos de dotación de seguridad a bordo, como el *Real Decreto 285/2002* y el *Convenio sobre el Trabajo Marítimo* de la OMI [8], [7].

Desde una perspectiva académica, este estudio aporta una simple contribución en la aplicación de métodos matemáticos de optimización para la planificación del personal en unidades navales. La metodología utilizada se basa en técnicas de mínimos cuadrados con restricciones, combinadas con simulaciones en MATLAB, lo que permite evaluar distintos escenarios operativos con un enfoque cuantitativo[23]. A diferencia de estudios anteriores, este modelo pretende optimizar la dotación de refuerzo de con base en datos históricos, y también incorpora variaciones en la disponibilidad de tripulación y la probabilidad de navegación. Este enfoque lo haría aplicable a otras áreas dentro de la gestión de recursos humanos en defensa y logística.

Desde el punto de vista práctico, la implementación del modelo podría tener un impacto directo en la eficiencia operativa de los buques de la Armada. La correcta asignación del personal a bordo permitiría mejorar la distribución de las tareas, evitando cargas excesivas de trabajo y garantizando niveles adecuados de operatividad en cada misión [1]. Además, la optimización de la dotación contribuiría a la sostenibilidad económica de la institución, procurando reducir los costos innecesarios derivados del sobredimensionamiento de una dotación, y garantizando un uso eficiente de los recursos disponibles. A nivel humano, la planificación adecuada del personal permitiría reducir la fatiga de la tripulación, evitando situaciones de estrés laboral que podrían afectar su rendimiento y capacidad de respuesta ante emergencias [24].

3.3 Limitaciones del problema

A pesar de los avances logrados en el desarrollo del modelo de optimización para la determinación de la dotación de refuerzo en los buques de la Armada, existen una serie de limitaciones que deben ser consideradas. Estas limitaciones afectan la precisión de los resultados obtenidos, la aplicabilidad del modelo a escenarios reales y la robustez del sistema ante variaciones en los datos de entrada.

3.3.1 Limitaciones en la calidad y disponibilidad de datos

Uno de los principales aspectos a tener en cuenta en la aplicación del modelo es la calidad y representatividad de los datos históricos disponibles. En este estudio se ha trabajado con un conjunto limitado de registros operativos, lo cual no afecta directamente a la estructura ni al funcionamiento del modelo, ya que este está diseñado para operar con los datos que se le proporcionan. El modelo mantiene su validez metodológica independientemente de la cantidad de datos, y realiza los cálculos de manera coherente según la información disponible.

No obstante, una mayor disponibilidad de datos, especialmente si están basadas en estadísticas históricas más amplias y confiables, permitirá obtener resultados más precisos y representativos. Por tanto, la limitación de datos no compromete el diseño del modelo, pero sí puede afectar a la interpretación de los resultados y la solidez de las conclusiones extraídas en esta aplicación concreta.

Además, el modelo no contempla todavía factores externos impredecibles como bajas médicas imprevistas, retrasos en los relevos de personal o variaciones en la disponibilidad de los buques. Estos elementos pueden influir notablemente en la operatividad real de las unidades, lo que refuerza la utilidad futura de mecanismos incorporados adicionales que permitirán gestionar de forma más eficaz la incertidumbre en la disponibilidad de la tripulación.

3.3.2 Simplificaciones en la estructura del modelo

El modelo matemático empleado asume ciertas simplificaciones en la asignación de refuerzos, lo que puede limitar su aplicabilidad en escenarios más complejos. En particular, se ha modelado la dotación de refuerzo como un ajuste lineal sin considerar interacciones más sofisticadas entre las diferentes categorías de personal. Sin embargo, en la realidad operativa, la estructura jerárquica y las dependencias funcionales entre oficiales, suboficiales y marineros pueden influir de manera significativa en la distribución óptima del refuerzo.

El modelo se centra en minimizar la diferencia entre la dotación ideal y la dotación final sin imponer restricciones adicionales sobre la composición del personal a bordo. Esto puede llevar a soluciones que, aunque matemáticamente óptimas, no sean operativamente viables si no se respetan las proporciones clave en la tripulación. En un entorno real, donde ciertos roles son imprescindibles para la ejecución de determinadas tareas, el modelo debería incorporar restricciones adicionales que aseguren una dotación equilibrada en función de la especialización del personal.

3.3.3 Falta de consideración de aspectos económicos

El presente estudio se enfoca en la optimización de la dotación de refuerzo desde una perspectiva operativa, sin integrar un análisis detallado de los costos asociados a la asignación de personal adicional. En un contexto real, cualquier incremento en la dotación conlleva costos salariales, logísticos y de formación, los cuales pueden hacer inviable la aplicación de algunas de las soluciones propuestas. En este sentido, la inclusión de restricciones presupuestarias permitiría mejorar la aplicabilidad del modelo, equilibrando la eficiencia operativa con la sostenibilidad financiera [25].

Además, en la gestión de recursos humanos en defensa, los recursos económicos suelen ser un factor limitante, lo que hace necesario desarrollar estrategias de asignación que no solo maximicen la operatividad, sino que también minimicen los costos asociados a refuerzos innecesarios. La incorporación de un análisis de costos dentro del modelo permitiría realizar una evaluación más realista de la viabilidad de las soluciones propuestas.

3.3.4 Limitaciones en la adaptabilidad a escenarios dinámicos

El modelo desarrollado se basa en un ajuste estático de la dotación de refuerzo, sin capacidad de adaptarse en tiempo real a cambios en la situación operativa. Si bien en entornos navales las condiciones pueden variar con rapidez, la realidad de la gestión de personal en la Armada impone ciertas limitaciones al dinamismo del sistema. En la práctica, las dotaciones de los buques no pueden modificarse de forma continua ni constante, lo que reduce el margen para aplicar ajustes inmediatos, por razones logísticas y organizativas.

No obstante, la incorporación de un enfoque de optimización dinámica podría ser útil como herramienta de planificación, permitiendo recalcular de forma periódica la dotación óptima en función de datos actualizados sobre la disponibilidad de personal y las navegaciones previstas. Aunque los escenarios reales sean menos dinámicos de lo ideal desde una perspectiva de optimización operativa, contar con un modelo flexible facilitaría una mejor preparación ante variaciones imprevistas y permitiría anticipar necesidades de refuerzo con mayor precisión, mejorando así la continuidad y eficiencia de las operaciones [6].

3.3.5 Ausencia de un análisis de impacto sobre la efectividad de la operación

Si bien el modelo se centra en la optimización de la dotación de refuerzo, no se han realizado estudios que analicen el impacto directo de las diferentes soluciones sobre el rendimiento de la operación. En la práctica, un modelo que reduzca los residuos matemáticos no necesariamente implica una mejora en la efectividad de la dotación real. Existen factores cualitativos no contemplados, como la experiencia del personal, la capacidad de adaptación a diferentes misiones o la cohesión del equipo de trabajo, los cuales pueden afectar significativamente el desempeño de la tripulación.

Para validar la efectividad real del modelo, será necesario complementar este estudio con pruebas empíricas o simulaciones operativas que permitan medir cómo las diferentes estrategias de refuerzo afectan la eficiencia de la operación naval. La integración de métricas de desempeño en futuras investigaciones podría mejorar la aplicabilidad del modelo y su capacidad de generar recomendaciones más precisas para la planificación del personal en la Armada.

4 DATOS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

4.1 Diseño del estudio

El estudio se ha diseñado en un principio con el objetivo de optimizar la dotación en los Buques de Acción Marítima de la Armada, particularmente en los de la *Clase Meteoro*. Para ello, se ha desarrollado un modelo matemático basado en técnicas de optimización y simulación que permite analizar la relación entre la disponibilidad de personal y las necesidades operativas de cada misión.

Este modelo se fundamenta en la recopilación de datos históricos de navegación y dotación, así como en la definición de parámetros clave como la probabilidad de navegación y los mínimos operativos requeridos. Se ha desarrollado un enfoque basado en la variabilidad real de la dotación en cada buque, analizando las fluctuaciones del personal disponible y los refuerzos requeridos para cumplir con las misiones asignadas. Para ello, se han determinado diferentes configuraciones operativas que permiten ajustar la dotación en función de los escenarios de navegación y las necesidades de cada periodo.

4.2 Descripción de los datos disponibles

4.2.1 Tipos de datos recolectados

Los datos utilizados en este estudio han sido obtenidos a partir de registros históricos correspondientes a los BAM situados en Canarias, centrándose en los siguientes aspectos:

- Días de navegación por buque: Se han registrado los días efectivos de mar de los buques Meteoro, Rayo, Relámpago y Tornado.
- Probabilidad de navegación: Calculada como la fracción de días en que cada buque ha estado en operación respecto al total del año.
- Dotación mínima requerida para navegar: Se ha establecido que el mínimo de seguridad es de 33 personas, distribuidas entre oficiales, suboficiales y marinería.
- Dotación recomendada en función de la exigencia de la misión: Se han determinado tres niveles de dotación: mínima (33 personas), navegación no demandante (42-45 personas) y navegación demandante (52 personas).
- Ausencias y bajas: Se ha considerado la variabilidad del personal debido a exoneraciones, bajas médicas y otras circunstancias que afectan la disponibilidad operativa.
- Distribución del refuerzo: Se han calculado los porcentajes de refuerzo necesarios para cada categoría, con base en los datos de dotación histórica y en la probabilidad de navegación de cada buque.

- Cálculo del factor de ajuste: Se ha estimado un coeficiente de ajuste que permite determinar cuántos efectivos adicionales son necesarios en función de la demanda operativa y las limitaciones presupuestarias.

El análisis de los datos operativos se centra en el ciclo comprendido entre julio de 2023 y julio de 2024, durante el cual los Buques de Acción Marítima con base en Canarias han demostrado una intensa actividad.

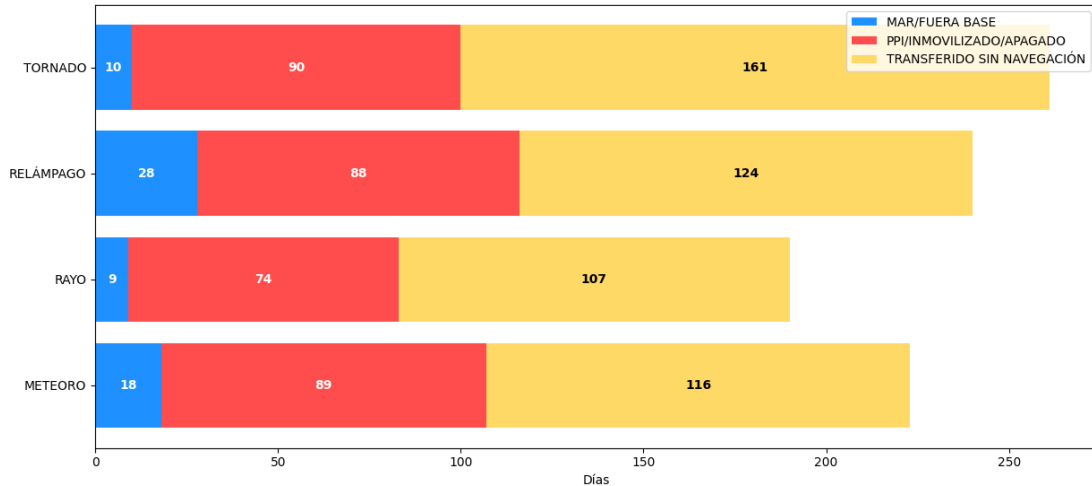


Figura 4-1 Gráfico de barras sobre los esfuerzos de los BAM en 2023. (Elaboración propia)

La Figura 4-1 es un gráfico de barras horizontales apiladas que muestra la distribución de los días de actividad de cada buque a lo largo de 2023, desglosada en tres categorías, días de navegación efectiva o en operaciones fuera de la base, días en puerto, mantenimiento o con mínima actividad, y días asignados a la cadena operativa, pero sin actividad de mar.

Se observa que, en todos los casos, la proporción de mar o fuera de base, días de navegación efectiva, es relativamente baja frente a las otras categorías, lo que podría indicar una necesidad de optimizar los ciclos de actividad y mantenimiento, o bien la existencia de periodos de espera operativa prolongadas.

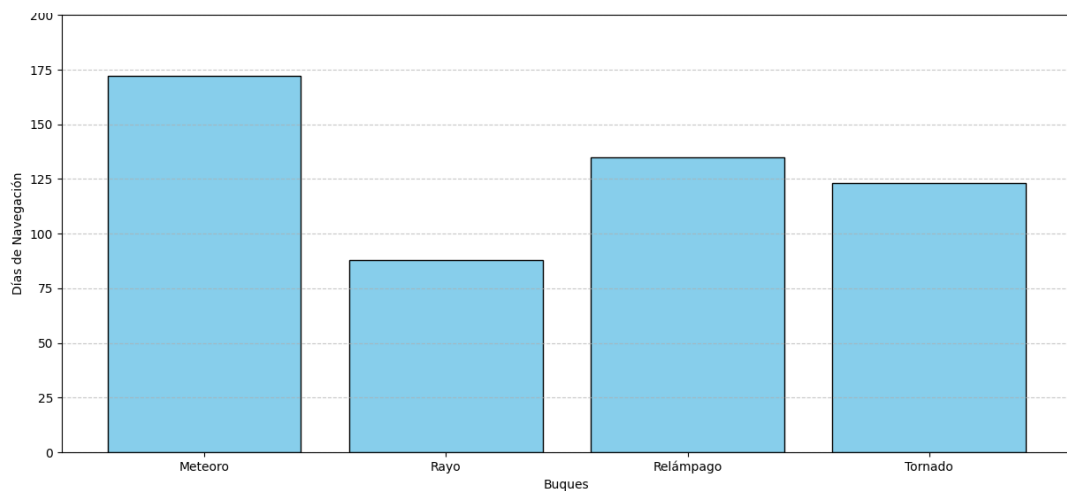


Figura 4-2 Gráfico de barras de días de navegación por buque 2024. (Elaboración propia)

La Figura 4-2 ilustra, mediante un gráfico de barras, los días de navegación de los cuatro buques durante el año 2024. En ella se observa que Meteoro acumula el mayor número de días de navegación, seguido por Relámpago y Tornado, y finalmente Rayo con la cifra más baja. Este reparto refleja la

intensidad operativa que cada unidad ha asumido en el período, sirviendo como referencia para ajustar futuras planificaciones de despliegues y mantenimientos.

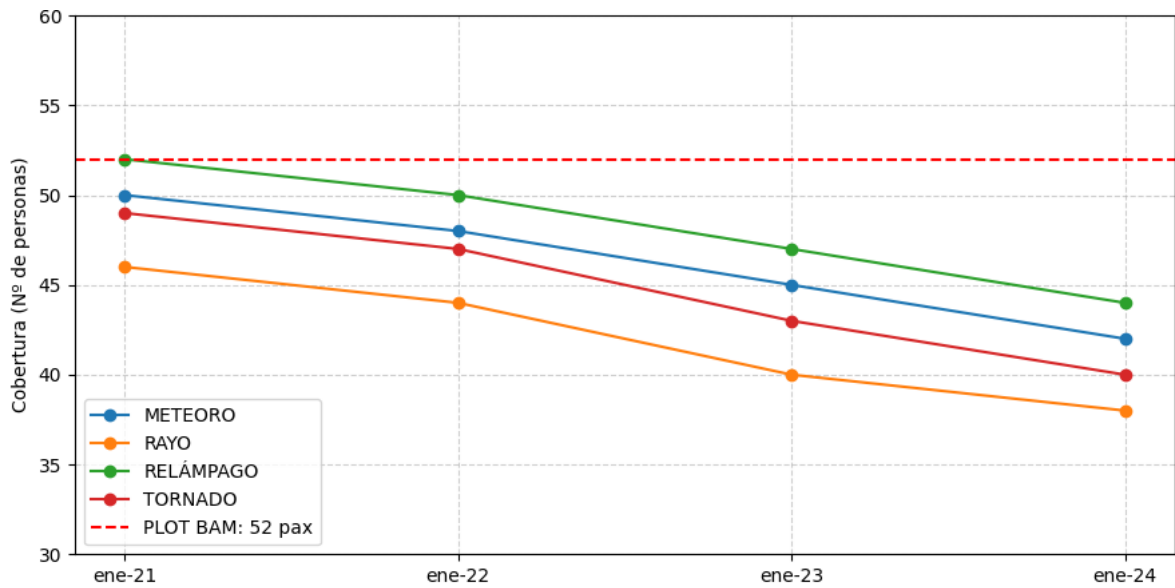


Figura 4-3 Gráfico sobre la situación de personal unidades MARCAN. (Elaboración propia)

En la Figura 4-3 se observa la evolución de la cobertura de personal para los buques Meteoro, Rayo, Relámpago y Tornado, entre enero de 2021 y enero de 2024. La línea roja punteada la dotación máxima posible. Como se aprecia, todas las unidades muestran una tendencia descendente a lo largo de los años, pasando de valores cercanos a la dotación máxima en 2021 a cifras significativamente más bajas en 2024. Este comportamiento puede atribuirse a factores como bajas, retiros, falta de refuerzos y otras causas que afectan la disponibilidad de personal.

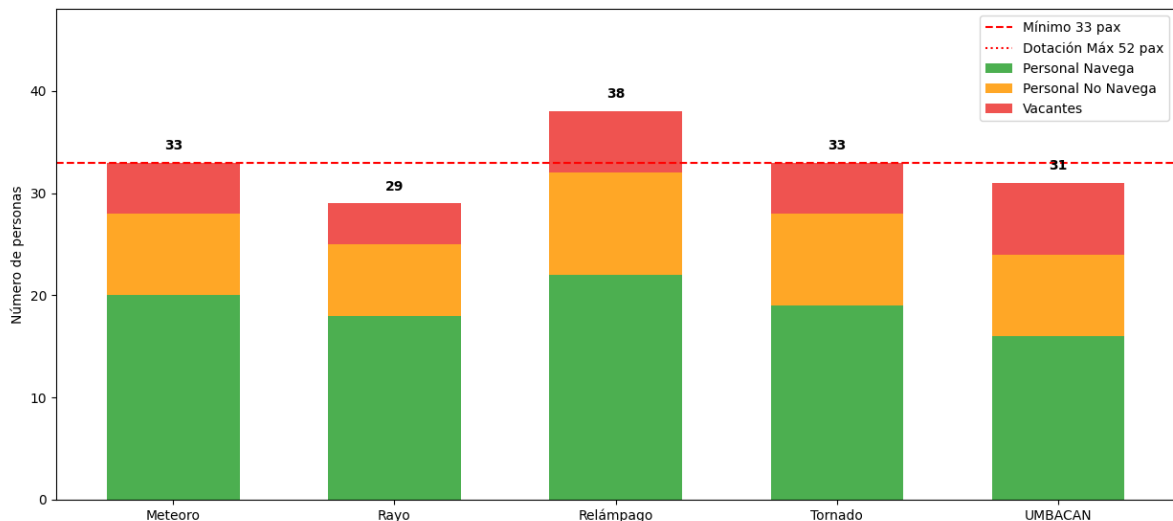


Figura 4-4 Estado del personal Unidades MARCAN en abril 2024. (Elaboración propia)

La Figura 4-4 muestra, en columnas apiladas, la composición del personal de cada unidad en abril de 2024. En esta gráfica se pone de manifiesto cómo, en algunos casos, el personal total se acerca al mínimo de seguridad (33), mientras que en otros supera ese umbral, pero sin llegar a la dotación máxima ideal.

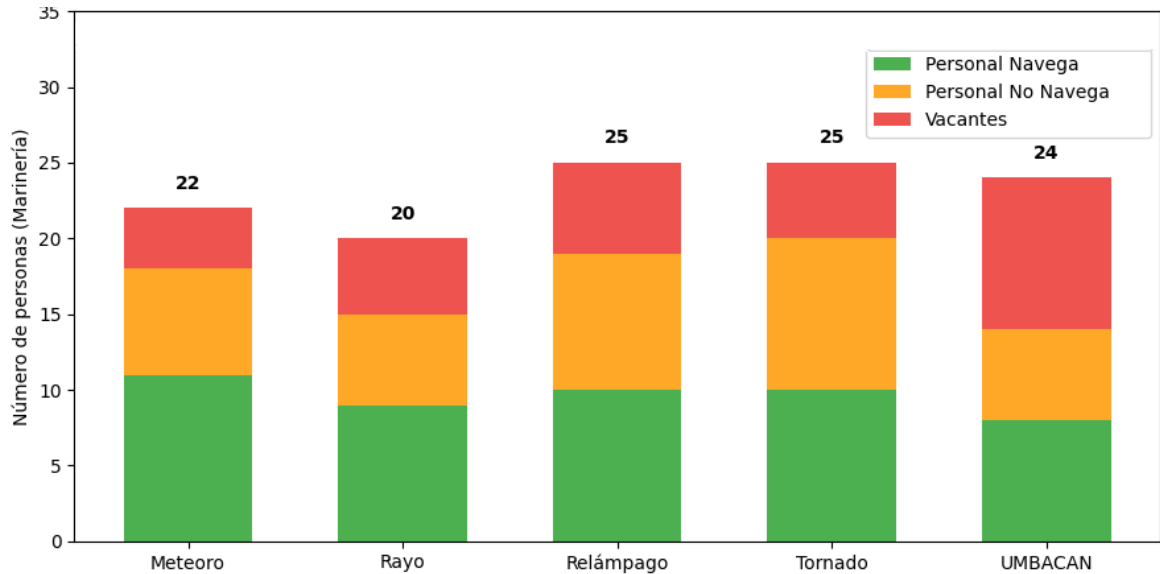


Figura 4-5 Estado del personal de marinería en Unidades MARCAN. (Elaboración propia)

La Figura 4-5 se centra exclusivamente en la marinería de cada unidad, presentando un gráfico de barras apiladas. Se aprecia cómo la marinería disponible varía independientemente de la unidad, mostrándose un gran número de vacantes, y, además, un número de personal considerable que no navega debido a diversas causas. Esto puede repercutir en la capacidad de mantener guardias, turnos y trabajos de mantenimiento, especialmente en navegaciones prolongadas.

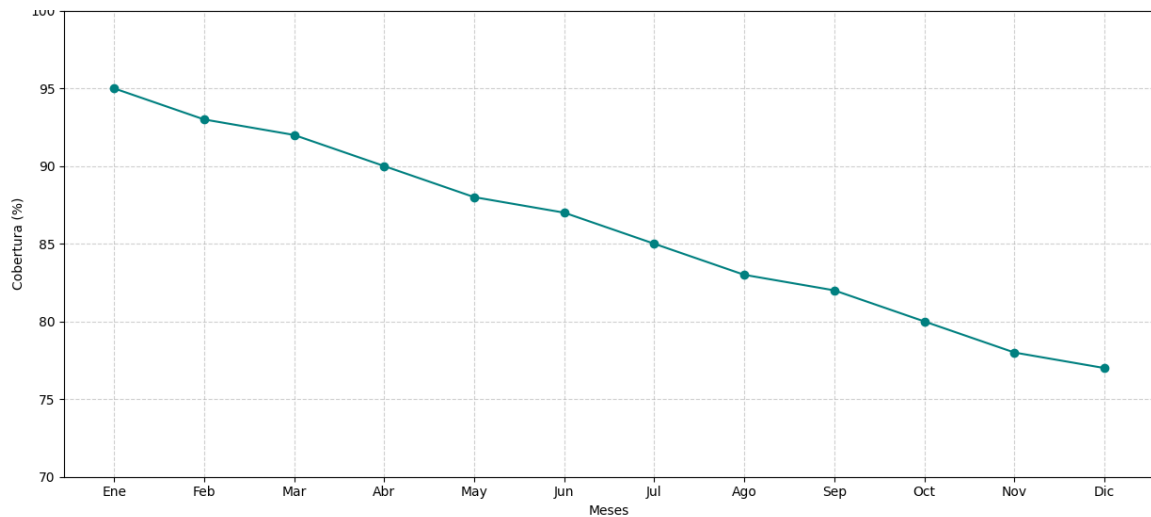


Figura 4-6 Gráfico de tendencia de cobertura de personal año 2023. (Elaboración propia)

En la Figura 4-6 se presenta un ejemplo de la tendencia de cobertura de personal a lo largo de un año, de enero a diciembre. La gráfica evidencia una disminución progresiva del porcentaje de cobertura, pasando de valores cercanos al 95% a inicios de año hasta alrededor del 75% en diciembre. Este comportamiento subraya la importancia de planificar rotaciones y refuerzos para evitar que la dotación caiga por debajo de los niveles críticos, especialmente en períodos de mayor exigencia operativa.

Todos los datos mostrados evidencian una tendencia decreciente en la cobertura de personal, atribuida a factores como bajas médicas, retiros y la necesidad de refuerzos. Muchas unidades operan cerca o por debajo del mínimo seguro de 33 personas, lo que subraya la urgencia de implementar programas de rotación y refuerzo. Además, se observa una disparidad en la actividad entre los buques,

ya que mientras algunos, como el Meteoro, acumulan un mayor número de días de navegación, otros, como el Rayo, tienen una actividad significativamente menor. Estos hallazgos constituyen una base sólida para la planificación operativa y la asignación de personal, y resaltan la necesidad de mantener un seguimiento continuo y establecer planes de contingencia para garantizar la seguridad y eficacia en las misiones marítimas.

4.2.2 Fuentes de información

La información ha sido obtenida del segundo comandante del BAM Meteoro, quien ha proporcionado registros detallados sobre la dotación y operatividad de los buques. Se ha complementado con datos históricos de navegación y misiones realizadas en el ciclo operativo 2023-2024. Además, los cálculos y modelos han sido validados con datos extraídos de los códigos desarrollados en MATLAB, que han permitido simular diversos escenarios de optimización.

4.3 Planteamiento del problema de mínimos cuadrados

El objetivo es ajustar la dotación, para obtener un refuerzo en tres categorías, oficiales, suboficiales y marineros para cuatro barcos, minimizando la diferencia entre una dotación deseada y la que se obtiene a partir de las variables de refuerzo. El modelo se formula como un problema de mínimos cuadrados lineal con restricción de no negatividad:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n, x \geq 0} \|Cx - d\|^2 \quad (4-1)$$

donde:

- C es la matriz de coeficientes.
- x es el vector de variables de refuerzo para cada categoría.
- d es el vector que representa las diferencias necesarias entre la dotación ideal y la dotación promedio para cada categoría en cada barco.

En cada uno de los códigos que se plantean a continuación, la dimensión de C , x y d se define según la metodología empleada para su resolución, ya sea en un solo sistema global o un conjunto de subproblemas para cada categoría y barco.

CASO 1: Resolución independiente

En el *Código Resolución independiente* desarrollado en el Anexo III: Códigos MATLAB, se muestra que para cada categoría se utiliza un único factor de refuerzo x_i que se aplica de forma global a todos los barcos. El factor x_i se multiplica por un vector de ponderaciones, obtenido al multiplicar el porcentaje de refuerzo asignado a la categoría por la probabilidad de navegación de cada barco. La diferencia necesaria d_i para cada categoría se calcula a partir de la diferencia entre la dotación ideal demandante y el promedio histórico, en este caso, común a todos los barcos, y se replica en un vector de 4 elementos. Así, se resuelve un problema de mínimos cuadrados independiente para cada categoría, garantizando que el refuerzo aplicado sea no negativo. Se plantea lo siguiente:

Para cada una de las categoría (donde $i= 1$ para Oficiales, $i=2$ para Suboficiales y $i=3$ para Marineros), se definen los datos históricos de dotación de j barcos ($j=1,2,3,4$), de la forma:

$$Dot_i^{hist} = \begin{pmatrix} D_{i1}^{hist} \\ D_{i2}^{hist} \\ D_{i3}^{hist} \\ D_{i4}^{hist} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4, \text{ para } i=1,2,3 \quad (4-2)$$

A partir de estos datos iniciales, se calcula la dotación promedio histórico con la fórmula:

$$prom_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 D_{ij}^{hist} \quad (4-3)$$

Se forma el vector de promedios como:

$$prom = \begin{pmatrix} prom_1 \\ prom_2 \\ prom_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \quad (4-4)$$

Se determina el vector dotación ideal, que es la dotación considerada ideal para cada categoría, y el vector dotación mínima operativa establecida, con la que se puede navegar con seguridad, resultando los vectores:

$$dot_deman^{ideal} = \begin{pmatrix} dot_1 \\ dot_2 \\ dot_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \quad (4-5)$$

$$MinNaveg = \begin{pmatrix} min_1 \\ min_2 \\ min_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \quad (4-6)$$

Para cada categoría i , se define la brecha entre la dotación ideal y la dotación histórica como un escalar:

$$d_i = dot_i - prom_i \quad (4-7)$$

Este valor representa la cantidad adicional de personal de refuerzo que se quiere cubrir. La diferencia necesaria d_i se replica en cada componente para formar un vector en \mathbb{R}^4 , ya que todos los barcos requieren de la misma cantidad de d_i . Se genera el vector:

$$\bar{d}_i = \begin{pmatrix} d_i \\ d_i \\ d_i \\ d_i \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4, \text{ para } i=1,2,3 \quad (4-8)$$

A continuación, definimos el vector porcentajes \mathbf{p} , que asigna un peso relativo a cada categoría i , $i=1,2,3$. Se considera que la necesidad de refuerzo es mayor si la diferencia entre la dotación ideal y la dotación mínima es mayor. Esto resulta en que $p_1 + p_2 + p_3 = 1$.

$$p_i = \frac{dot_i - min_i}{\sum_{k=1}^3 (dot_k - min_k)} \quad (4-9)$$

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \quad (4-10)$$

Se establece el vector probabilidades de navegación \mathbf{P} que contiene la probabilidad de que cada barco realice navegaciones o misiones:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4 \quad (4-11)$$

Ahora, para cada categoría i , se construye C_i multiplicando el porcentaje p_i por el vector de probabilidades \mathbf{P} del siguiente modo:

$$C_i = p_i \mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_i P_1 \\ p_i P_2 \\ p_i P_3 \\ p_i P_4 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4 \quad (4-12)$$

Una vez definidos C_i y \bar{d}_i se establece el problema de optimización para cada categoría i , resolviendo en bucle ($i=1,2,3$) para cada una de ellas la expresión:

$$\min_{x_i \geq 0} \| C_i x_i - \bar{d}_i \|^2 \quad (4-13)$$

donde:

- $x_i \in \mathbb{R}$ es la variable de refuerzo (un escalar) que se busca.
- La restricción $x_i \geq 0$ impide asignar un refuerzo negativo.

Al resolver el problema de mínimos cuadrados, se obtiene el valor óptimo de x_i^* que minimiza la norma $\| C_i x_i - \bar{d}_i \|^2$, cumpliendo con la restricción $x_i \geq 0$ para cada categoría i .

El solución x_i^* de se utiliza para calcular, para cada categoría i , el vector de refuerzo en \mathbb{R}^4

$$ref_i = \begin{pmatrix} ref_{i1} \\ ref_{i2} \\ ref_{i3} \\ ref_{i4} \end{pmatrix} = C_i x_i^* \quad (4-14)$$

El refuerzo promedio para cada categoría se obtiene promediando el vector refuerzo:

$$\overline{ref}_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 ref_{ij}, \text{ siendo } i=1,2,3 \quad (4-15)$$

Finalmente, la dotación final en la categoría i se muestra con la operación:

$$Dotación\ Final_i = prom_i + \overline{ref}_i \quad (4-16)$$

CASO 2: Resolución independiente localizado

En el Código Resolución independiente localizado disponible en el Anexo III: Códigos MATLAB, se mantienen las mismas tres categorías y cuatro barcos, pero se resuelve el problema de manera más localizada, es decir, para cada combinación de categoría i y barco j se determina un factor de refuerzo $x_{i,j}$ específico. La diferencia necesaria $d_{i,j}$ se calcula individualmente para cada barco a partir de la dotación ideal demandante y el promedio histórico correspondiente a ese barco. El mismo vector de ponderación C_i , derivado del porcentaje de refuerzo para la categoría y la probabilidad de navegación, se utiliza en cada subproblema, y el objetivo se formula replicando el valor de $d_{i,j}$ en un vector de 4 elementos. De esta forma, se plantean 12 subproblemas independientes, uno por cada par (i,j) , todos con la restricción de no negatividad. Para ello, define lo siguiente:

Para cada categoría i (donde $i=1$ para Oficiales, $i=2$ para Suboficiales y $i=3$ para Marineros) se plantean los datos históricos generados para 4 barcos ($j=1,2,3,4$) objeto de análisis. Se generan para cada categoría vectores (4-2), para calcular la matriz $datos_categ$ (dimensión 3×4), donde cada fila corresponde a una categoría y cada columna a un barco. Se genera de la forma:

$$datos_categ_{ij} = (D_{ij}^{hist}) \text{ para } i=1,2,3 \text{ y } j=1,2,3,4 \quad (4-17)$$

Se vuelve a definir el vector dotación ideal y el vector dotación mínima operativa establecida, resultando los vectores (4-5) y (4-6).

A continuación se asigna un peso relativo a cada categoría i , $i=1,2,3$. Se plantea nuevamente, con la expresión (4-9), que la necesidad de refuerzo es mayor si la diferencia entre la dotación ideal y la dotación mínima es mayor. Almacenamos estos datos en el vector porcentajes \mathbf{p} como se mostró en el vector (4-10).

Se vuelve a definir el vector de probabilidades de navegación para los 4 barcos como en el vector (4-11).

En este caso, el problema se aborda de forma localizada, es decir, se resuelve de manera independiente para cada categoría i y barco j . Teniendo esto presente, para cada categoría i y cada barco j se calcula la brecha entre dotación ideal e histórica, donde $datos_{ij}$ es la dotación histórica del barco j en la categoría i , extraída directamente de la matriz de $datos_categ$. Se calcula de la forma:

$$d_{ij} = dot_deman_i - datos_categ_{ij} \quad (4-18)$$

Para cada categoría i se utiliza el mismo vector ponderación, incluyendo el peso p_i y la probabilidad de navegación de cada barco, que se define en el vector (4-12).

Para cada combinación (i,j) , se forma un vector objetivo replicando el valor de d_{ij} . Esto refleja que, para el barco j en la categoría i , la cantidad adicional necesaria es d_{ij} . Se define:

$$\overline{d}_{ij} = d_{ij} \cdot e = \begin{pmatrix} d_{ij} \\ d_{ij} \\ d_{ij} \\ d_{ij} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4, \text{ para } i=1,2,3 \text{ y } j=1,2,3,4 \quad (4-19)$$

donde e es el vector unitario de dimensión 4.

De este modo, para cada categoría i y barco j se resuelve el subproblema:

$$\min_{x_{ij} \geq 0} \| C_i x_{ij} - \overline{d}_{ij} \|^2 \quad (4-20)$$

donde:

- $x_{ij} \in \mathbb{R}$ es el factor de refuerzo específico para la categoría i y barco j .
- La restricción $x_i \geq 0$ asegura un refuerzo no negativo.

Al resolver el problema de mínimos cuadrados, se obtiene los valores óptimos de x_{ij}^* que minimiza la norma $\| C_i x_{ij} - d_{ij} \|^2$, cumpliendo con la restricción $x_i \geq 0$ para cada categoría i y barco j .

El refuerzo asignado a cada barco se calcula mediante la operación siguiente:

$$ref_{ij} = \begin{pmatrix} ref_{i1} \\ ref_{i2} \\ ref_{i3} \\ ref_{i4} \end{pmatrix} = C_i x_{ij}^*, \text{ para } i=1,2,3 \text{ y } j=1,2,3,4 \quad (4-21)$$

Finalmente, la dotación final para el barco j en la categoría i se obtiene sumando al valor histórico el refuerzo con la operación:

$$Dotación\ Final_{ij} = datos_categ_{ij} + \overline{ref}_{ij} \quad (4-22)$$

CASO 3a: Modelo global con promedio unificado

El Código Modelo global promedio unificado mostrado en el Anexo III: Códigos MATLAB, utiliza un enfoque global para ajustar la dotación de refuerzo de tres categorías para cuatro barcos, partiendo

de datos históricos donde cada categoría posee un único promedio, como en el caso 1. Se define la diferencia necesaria d_i para cada categoría como la diferencia entre la dotación ideal demandante y este promedio, y se replica en cada barco. Se construye una matriz de coeficientes \mathbf{C} que contiene, en cada una de sus 12 filas el valor de ponderación y probabilidad de navegación correspondiente a la categoría i y barco j . De esta forma, se construye un único sistema global que se resuelve mediante mínimos cuadrados con restricción de no negatividad sobre el vector \mathbf{x} , con $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$, obteniéndose así un factor de refuerzo global para cada categoría.

Posteriormente, para cada barco se calcula el refuerzo específico multiplicando el valor óptimo de x_i^* por la ponderación correspondiente, y se determina la dotación final. Se plantea de lo siguiente:

Para cada una de las categorías (donde $i=1$ para Oficiales, $i=2$ para Suboficiales y $i=3$ para Marineros), se definen los datos históricos de dotación de j barcos ($j=1,2,3,4$) como en el caso 1, con la expresión (4-2).

Se calcula la dotación promedio histórico con la fórmula (4-3), y se forma el vector de promedios como el vector (4-4). Del mismo modo, vuelven a establecer los vectores dotación ideal demandante y dotación mínima, como los vectores (4-5) y (4-6).

Para cada categoría i , se define una vez más, la brecha como en la expresión (4-7), y se replica el escalar en cada componente como en vector (4-8), de modo que se asume que todos los barcos requieren la misma cantidad de d_i .

Posteriormente, se define el vector porcentajes \mathbf{p} , del mismo modo que en el caso 1, con el vector (4-10), y se establece también el vector probabilidades de navegación \mathbf{P} , como un vector (4-11).

Para cada categoría i , se construye el vector C_i multiplicando el porcentaje p_i por el vector de probabilidades \mathbf{P} , resultando el vector (4-12) en \mathbb{R}^4 .

Una vez definidos C_i y d_i , se procede a construir el sistema global de ecuaciones, que relaciona las 3 categorías con los 4 barcos, generando un total de 12 ecuaciones. Se define la matriz $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{12 \times 3}$ de forma que cada una de las 12 filas representa una ecuación asociada a la combinación de una categoría i y un barco j :

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_1 & | & \bar{0} & | & \bar{0} \\ - & + & - & + & - \\ \bar{0} & | & C_2 & | & \bar{0} \\ - & + & - & + & - \\ \bar{0} & | & \bar{0} & | & C_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{12 \times 3} \quad (4-23)$$

Se define un vector $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^{12}$ en el que, para cada categoría i , se utiliza el valor d_i (la brecha entre la dotación ideal y el promedio) para las 4 ecuaciones correspondientes a esa misma categoría, resultando:

$$\mathbf{d} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_1 \\ d_1 \\ d_1 \\ d_2 \\ d_2 \\ d_2 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_3 \\ d_3 \\ d_3 \end{pmatrix} \quad (4-24)$$

Una vez definidos C y d se establece el problema global:

$$\min_{x \geq 0} \|Cx - d\|^2 \quad (4-25)$$

donde:

- $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3$ es el vector de factores de refuerzo para cada categoría.
- La restricción $x \geq 0$ garantiza que cada x_i sea no negativo.

La solución $x^* = \begin{pmatrix} x_1^* \\ x_2^* \\ x_3^* \end{pmatrix}$ minimiza la norma del error entre la ponderación Cx y el vector de términos independientes d .

El x_i^* es el valor base de refuerzo para la categoría i , y el término C_i que ajusta el factor para cada barco, de modo que la asignación de refuerzo sea más realista y específica para cada unidad.

Para cada categoría i y para cada barco j , el refuerzo se calcula con:

$$ref_global_i = \begin{pmatrix} ref_global_{i1} \\ ref_global_{i2} \\ ref_global_{i3} \\ ref_global_{i4} \end{pmatrix} = C_i x_i^* \quad (4-26)$$

La dotación final para cada categoría i y para cada barco j se obtiene sumando el refuerzo global al promedio histórico unificado de la categoría de la forma que muestra la operación:

$$Dotación\ Final\ Global_{ij} = prom_i + ref_global_{ij} \quad (4-27)$$

CASO 3b: Modelo global con datos localizados

El *Código Modelo global con datos localizados* dispuesto en el Anexo III: Códigos MATLAB, adopta también un enfoque global para resolver el ajuste de la dotación en las tres categorías para cuatro barcos; sin embargo, en este caso los datos históricos se generan de forma aleatoria para cada barco, de modo que se obtiene un promedio específico por categoría y barco. Esto implica que la diferencia necesaria $d_{i,j}$ se calcula individualmente para cada combinación, categoría i y barco j , como la diferencia entre la dotación ideal demandante para la categoría y el promedio particular de ese barco.

Se construye una matriz de diseño $C \in \mathbb{R}^{12 \times 3}$ en la que cada ecuación es definida por la misma fórmula de valor de ponderación y probabilidad de navegación, mientras que el vector objetivo $d \in \mathbb{R}^{12}$ contiene el valor $d_{i,j}$ en cada posición. Se resuelve el problema global de mínimos cuadrados con restricción de no negatividad sobre $x \in \mathbb{R}^3$ y, una vez obtenido el vector de refuerzo global, se determina para cada barco el refuerzo específico, la dotación final sumándole el promedio individual. Se plantea del siguiente modo:

Para cada una de las categorías (donde $i=1$ para Oficiales, $i=2$ para Suboficiales y $i=3$ para Marineros), se definen los datos históricos de dotación de j barcos ($j=1,2,3,4$), de la forma:

$$Dot_i^{aleto} = \begin{pmatrix} D_{i1}^{aleto} \\ D_{i2}^{aleto} \\ D_{i3}^{aleto} \\ D_{i4}^{aleto} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4, \text{ para } i=1,2,3 \quad (4-28)$$

En este modelo, los datos se agrupan también en una matriz de dimensiones 3 x 4 llamada *datos_categ*, donde las filas representan las categorías (1: oficiales, 2: suboficiales, 3: marineros) y las columnas representan cada uno de los 4 barcos. Se genera de la forma (4-17).

Como en el resto de los códigos, se definen el vector dotación ideal demandante y el vector dotación mínima, resultando los vectores (4-5) y (4-6).

Para cada categoría *i*, se define la brecha o diferencia entre la dotación ideal y la dotación histórica como un escalar:

$$d_i = dot_deman_i - datos_categ_{ij} \quad (4-29)$$

Este escalar representa, para cada categoría *i* y el barco *j*, la cantidad adicional de personal de refuerzo que se quiere cubrir.

Después, se define el vector porcentajes **p**, del mismo modo que en el caso 1, con el vector (4-10), y se establece también el vector probabilidades de navegación **P**, como un vector (4-11).

En este modelo global con datos localizados se integran las 3 categorías y los 4 barcos, lo que genera un sistema de 12 ecuaciones. Se define la matriz de coeficientes $C \in \mathbb{R}^{12 \times 3}$ de fila representa una ecuación asociada a la combinación de una categoría *i* y un barco *j*.

Para cada categoría *i* y cada barco *j*, se asigna en la fila correspondiente el valor, como muestra la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, mientras que en las demás columnas se asigna 0. De modo que, cada ecuación refleja únicamente la contribución de la categoría *i* para el barco *j*. Se define como la matriz (4-23).

De la misma manera, se conforma el vector $d \in \mathbb{R}^{12}$ en el que, para cada categoría *i* y cada barco *j*, se asigna la diferencia necesaria d_{ij} para esa combinación. Cada ecuación tiene como objetivo minimizar la diferencia entre el refuerzo asignado a través del modelo global y esta brecha local. De este modo, el vector **d** quedará organizado como en el vector:

$$d = \begin{pmatrix} d_{11} \\ d_{12} \\ d_{13} \\ d_{14} \\ d_{21} \\ d_{22} \\ d_{23} \\ d_{24} \\ d_{31} \\ d_{32} \\ d_{33} \\ d_{34} \end{pmatrix} \quad (4-30)$$

donde, $d_{ij} = dot_deman_i - datos_categ_{ij}$.

Una vez definidos *C* y *d* se plantea el sistema global:

$$\min_{x \geq 0} \| Cx - d \|^2 \quad (4-31)$$

donde:

- $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3$ es el vector de factores de refuerzo para cada categoría.
- La restricción $x \geq 0$ garantiza que cada x_i sea no negativo.

La solución $\mathbf{x}^* = \begin{pmatrix} x_1^* \\ x_2^* \\ x_3^* \end{pmatrix}$ minimiza error global $\| C\mathbf{x}^* - d \|^2$

Para cada categoría i y para cada barco j , el refuerzo se calcula como la expresión:

$$ref_global_{ij} = \begin{pmatrix} ref_global_{i1} \\ ref_global_{i2} \\ ref_global_{i3} \\ ref_global_{i4} \end{pmatrix} = C_i x_{ij}^* \quad (4-32)$$

La dotación final para cada categoría i y para cada barco j se obtiene sumando el refuerzo global al promedio histórico unificado de la categoría de la forma que muestra la operación:

$$Dotación\ Final\ Global_{ij} = datos_categ_{ij} + ref_global_{ij} \quad (4-33)$$

CASO 3c: Modelo global con restricciones de dotación para misión

El Código Modelo global con restricciones misión representado dentro en el Anexo III: Códigos MATLAB, utiliza el mismo modelo global que ajusta la dotación de refuerzo como se realiza en el caso 3a. El sistema global se formula mediante un problema de mínimos cuadrados con restricción de no negatividad sobre el vector \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$, de manera que se minimice $\| C\mathbf{x} - d \|^2$.

Para este caso, se imponen restricciones adicionales que garantizan que, para cada barco, la dotación final total calculada como la suma de la dotación base, es decir, que se encuentre entre un límite mínimo y un límite máximo. Estas restricciones permiten ajustar el modelo a las necesidades específicas de la misión o requerimientos determinados.

Siguiendo el mismo planteamiento expuesto en el caso 3a, se definen los datos y variables de igual manera, una vez definidos C y d se establece el problema global:

$$\min_{x \geq 0} \| C\mathbf{x} - d \|^2 \quad (4-34)$$

donde:

- $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3$ es el vector de factores de refuerzo para cada categoría.
- La restricción $\mathbf{x} \geq 0$ garantiza que cada x_i sea no negativo.

Una vez obtenida la solución $\mathbf{x}^* = \begin{pmatrix} x_1^* \\ x_2^* \\ x_3^* \end{pmatrix}$, para cada categoría i y barco j se calcula el refuerzo y la dotación final mediante las expresiones:

$$ref_global_{ij} = \begin{pmatrix} ref_global_{i1} \\ ref_global_{i2} \\ ref_global_{i3} \\ ref_global_{i4} \end{pmatrix} = C_i x_{ij}^* \quad (4-35)$$

$$Dotación\ Final\ Global_{ij} = datos_categ_{ij} + ref_global_{ij} \quad (4-36)$$

- Restricciones adicionales por misión:

Además de minimizar la diferencia entre $C\mathbf{x} - d$, se imponen restricciones que aseguran que, para cada barco j , la dotación final total se encuentre dentro de un rango definido.

Para ello, se impone que la suma de la dotación final total del barco j (suma de todas las categorías) se encuentre entre un límite mínimo L_{min} y un límite máximo L_{max} . Se define la doble desigualdad:

$$L_{min} \leq \sum_{i=1}^3 (Dotación\ Final\ Global_{ij}) \leq L_{max}, \text{ para } i = 1,2,3 \text{ y para } j = 1,2,3,4 \quad (4-37)$$

4.4 Implementación de la optimización

La optimización de la dotación de refuerzo se ha implementado íntegramente en MATLAB, integrando de manera coherente y sistemática las fases de modelado, simulación y resolución del problema. Se han desarrollado diferentes enfoques, desde la resolución independiente por categoría y su versión localizada hasta los modelos globales con promedio unificado, datos localizados y restricciones adicionales.

En este proyecto, se ha optado por resolver el problema de mínimos cuadrados mediante la función *lsqin* de MATLAB, la cual permite incluir restricciones lineales para garantizar soluciones realistas en el contexto de la asignación de personal. La metodología aplicada combina la factorización QR y la evaluación en valores singulares, SVD, cuando es necesario, asegurando estabilidad numérica en los cálculos. No se han empleado métodos iterativos como el Gradiente Conjugado o LSQR, ya que las dimensiones de las matrices en este estudio son moderadas y los métodos directos proporcionan resultados precisos y computacionalmente eficientes.

Además, se han aplicado enfoques tanto independientes como globales para el ajuste de la dotación, lo que permite analizar distintos ajustes de refuerzo en función de los escenarios de navegación y necesidades operativas de la Armada. La elección de este enfoque se justifica por su capacidad para manejar restricciones, evitar soluciones inverosímiles y asegurar que los refuerzos calculados cumplan con los requisitos establecidos en cada caso.

4.4.1 Herramientas y software empleados

La implementación del modelo se realizó completamente en MATLAB, aprovechando tanto sus funcionalidades básicas como herramientas avanzadas de optimización y visualización. El entorno MATLAB proporciona un robusto ambiente de desarrollo que facilita la manipulación y procesamiento de datos, la generación de números aleatorios, cálculos estadísticos y operaciones aritméticas. Además, se utilizó la *Optimization Toolbox*, en particular la función *lsqin*, la cual es fundamental para la resolución de problemas de mínimos cuadrados lineales con restricciones de no negatividad. Esta función emplea métodos numéricamente robustos, como la factorización QR y técnicas de métodos activos, para ajustar el vector de refuerzo x de manera óptima, incluso cuando se imponen restricciones adicionales, como límites en la dotación final total por barco. La integración completa en MATLAB facilita la conexión de todas las fases del proyecto, desde la formulación del problema y la simulación de escenarios hasta la optimización y la presentación gráfica de resultados, garantizando así coherencia, reproducibilidad y eficiencia en el proceso de toma de decisiones.

4.4.2 Parámetros evaluados

En el proceso de optimización se han considerado diversos parámetros que permiten evaluar no solo la eficacia del modelo, sino también su aplicabilidad operativa. En primer lugar, el factor de refuerzo óptimo, representado por el vector x , se calibra para determinar el número adicional de efectivos necesario en cada una de las tres categorías, que son oficiales, suboficiales y marineros. Este parámetro busca compensar la diferencia entre la dotación ideal demandante y la dotación promedio histórica o específica por barco mediante la aplicación de un ajuste que minimiza el error cuadrático.

Del mismo modo, se analiza la distribución del refuerzo, la cual se fundamenta en la matriz de coeficientes C que integra la probabilidad de navegación y los porcentajes de refuerzo asignados a cada categoría. Esta estructura permite evaluar cómo se asigna el refuerzo de forma proporcional a la demanda

de cada buque. Se evalúa también el impacto en la dotación final, verificando que la suma del promedio inicial y el refuerzo aplicado se sitúe dentro de un rango operativamente, lo cual es crucial para garantizar tanto la seguridad como la eficiencia de la operación.

Por otro lado, se cuantifica el residuo del modelo, es decir, la desviación entre la solución óptima obtenida (Cx) y el vector objetivo d . Este residuo actúa como indicador de la precisión del ajuste y, en consecuencia, de la calidad del modelo. Finalmente, en aquellos modelos que incluyen restricciones adicionales como la limitación de la dotación final total en cada buque se verifica que dichas restricciones se cumplan, lo que aporta una evaluación integral del impacto de la optimización en la operatividad.

5 EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

Con el propósito de evaluar la capacidad del modelo en la asignación óptima de personal y su respuesta ante distintos escenarios operativos, se han definido múltiples casos de estudio. Estos casos permiten analizar cómo varían las soluciones obtenidas al modificar parámetros clave como la probabilidad de navegación de los barcos, la dotación ideal demandante y los datos históricos de personal.

El análisis de estos casos no solo busca verificar la estabilidad del modelo, sino también identificar sus puntos de sensibilidad y posibles limitaciones. En particular, se han diseñado experimentos que incluyen ajustes controlados, combinaciones de cambios y situaciones extremas para explorar los límites del modelo.

Los casos de estudio se organizan en tres principales:

- **Variación en las probabilidades de navegación:** Se modifica la disponibilidad de los barcos para evaluar cómo afecta la asignación de personal.
- **Cambios en la dotación ideal demandante:** Se ajustan los requisitos de personal para observar la respuesta del modelo ante aumentos o reducciones en la demanda.
- **Modificación de los datos históricos:** Se analiza cómo influye la base histórica en la asignación óptima del refuerzo.

5.1.1 Casos de estudio

CASO 1: Variación en las probabilidades de navegación

Este caso estudia el impacto de la disponibilidad operativa de los barcos en la asignación de personal. Dado que el modelo distribuye el refuerzo considerando la probabilidad de navegación de cada barco, cualquier cambio en este parámetro afecta directamente a la dotación final.

El objetivo de este análisis es determinar cómo la variación en las probabilidades de navegación altera la asignación de refuerzos y en qué condiciones el modelo sigue proporcionando soluciones coherentes y ajustadas a la demanda. Se han diseñado varios escenarios:

1.1 Aumento generalizado de las probabilidades de navegación: se incrementa la probabilidad de operación en todos los barcos de manera uniforme para analizar si el modelo redistribuye el refuerzo de manera más eficiente y si la dotación final logra cubrir mejor la demanda.

1.2 Reducción generalizada de las probabilidades de navegación: se disminuye la probabilidad de navegación en todos los barcos para evaluar cómo reacciona el modelo ante una menor disponibilidad operativa.

1.3 Ajuste en la probabilidad de un solo barco: se modifica la probabilidad de operación de un único barco para examinar si el refuerzo se redistribuye principalmente hacia ese barco o si el modelo mantiene una asignación equilibrada en toda la flota.

1.4 Combinación de aumentos y reducciones en distintos barcos: se incrementa la probabilidad en algunos barcos y se reduce en otros para observar si el modelo se adapta correctamente a cambios heterogéneos en la disponibilidad operativa.

1.5 Probabilidad de navegación nula en uno o varios barcos: se simulan situaciones en las que ciertos barcos no pueden operar, con el fin de analizar la capacidad del modelo para reasignar el personal restante de manera eficiente.

CASO 2: Variación en la dotación ideal demandante

Este caso examina el comportamiento del modelo cuando se modifican los requisitos de personal en cada categoría. Como el modelo busca minimizar el error entre la dotación ideal y la asignación final, es importante evaluar cómo responde ante aumentos o reducciones en la demanda.

Los objetivos principales de este análisis son:

- Determinar en qué medida el modelo puede ajustar la asignación de refuerzos cuando los requerimientos de personal varían.
- Identificar si existen umbrales a partir de los cuales el modelo no logra adaptarse eficientemente, generando residuos elevados.
- Evaluar si los cambios en una categoría de personal afectan indirectamente la asignación en las demás.

Se han definido los siguientes escenarios:

2.1 Aumento progresivo de la dotación ideal: se incrementan los valores de la dotación ideal en todas las categorías en distintos niveles, permitiendo observar cómo varía la asignación de refuerzos y si el modelo mantiene un comportamiento estable.

2.2 Reducción progresiva de la dotación ideal: se disminuyen los valores de la dotación ideal para comprobar si el modelo reduce el refuerzo de manera proporcional y si se mantiene el equilibrio entre las categorías.

2.3 Modificación selectiva de una categoría: se incrementa o reduce la dotación ideal únicamente en una de las categorías, por ejemplo, aumentando solo el número de oficiales, con el fin de analizar cómo impacta en la asignación de personal en el resto de la estructura.

2.4 Ajustes combinados: se modifican dos categorías de manera opuesta, por ejemplo, aumentar suboficiales y reducir marineros, para evaluar cómo el modelo redistribuye el refuerzo entre categorías con demandas divergentes.

2.5 Dotación ideal extrema: se exige una dotación ideal muy elevada en una categoría específica, como aumentar la cantidad de Marineros hasta valores inusualmente altos, con el fin de evaluar si el modelo tiene capacidad de respuesta o si se generan errores elevados.

CASO 3: Modificación de los datos históricos

En este caso se estudia la influencia de los datos históricos en la asignación óptima del personal. Dado que el modelo parte de una base de dotación promedio para calcular los refuerzos, cualquier cambio en estos datos puede modificar el resultado final.

El objetivo principal de este análisis es determinar:

- Cómo afecta la proximidad entre los datos históricos y la dotación ideal a la necesidad de refuerzo.

- Si pequeñas alteraciones en los datos históricos generan grandes variaciones en la asignación de personal, lo que indicaría una alta sensibilidad del modelo.
- Si la asignación de refuerzos cambia significativamente cuando los datos históricos se modifican en categorías específicas.

Para ello, se han diseñado los siguientes experimentos:

3.1 Ajuste escalonado de los datos históricos: se incrementan o reducen progresivamente los valores históricos en todas las categorías para analizar si la dotación final y el refuerzo se ajustan de manera proporcional.

3.2 Modificación selectiva de los datos históricos: se alteran los datos históricos de una sola categoría para comprobar cómo influye en la distribución global del refuerzo.

3.3 Introducción de ruido aleatorio: se aplican fluctuaciones aleatorias en los datos históricos para evaluar la estabilidad del modelo frente a variaciones menores en la información de entrada.

3.4 Cambios contrapuestos en los datos históricos: se aumentan los datos históricos en una categoría y se reducen en otra, con el objetivo de examinar si el modelo compensa los cambios de manera equitativa o si genera una asignación desbalanceada.

5.1.2 Análisis de sensibilidad del modelo

El análisis de sensibilidad tiene como objetivo evaluar la robustez y estabilidad del modelo frente a variaciones en los parámetros clave, identificando los rangos en los que la solución se mantiene estable y los umbrales críticos donde el error o el residuo crecen significativamente. Este análisis es crucial para entender hasta qué punto el modelo responde de manera predecible ante modificaciones en la probabilidad de navegación, la dotación ideal y los datos históricos. Los distintos enfoques permiten analizar la sensibilidad del modelo desde diferentes perspectivas:

Identificación de umbrales críticos

Uno de los aspectos clave en la validación del modelo es determinar los umbrales a partir de los cuales la solución deja de ser eficiente o viable. Los límites se observan en tres parámetros principales:

- **Probabilidad de navegación:** se reduce progresivamente la probabilidad de operación de los barcos hasta encontrar el punto en el que el modelo ya no puede asignar dotaciones óptimas sin generar errores elevados. Se estudia si el modelo colapsa gradualmente o si existe un umbral abrupto a partir del cual el refuerzo se vuelve ineficaz.
- **Dotación ideal:** se aumenta y disminuye la dotación ideal para determinar hasta qué nivel el modelo puede seguir distribuyendo el refuerzo de manera eficiente. Se buscan puntos en los que un incremento pequeño en la dotación provoca un aumento desproporcionado del residuo.
- **Datos históricos:** se evalúa cómo cambia la asignación de refuerzos cuando los datos históricos se alejan progresivamente de la dotación ideal, analizando si existe un punto de quiebre donde el modelo deja de responder adecuadamente.

Sensibilidad a variaciones escaladas

Para analizar el comportamiento del modelo en escenarios de cambio gradual, se han aplicado ajustes incrementales en cada parámetro:

- **Modificación escalonada de la probabilidad de navegación:** se varían las probabilidades en intervalos de $\pm 0,05$ o $\pm 0,10$ para observar si el ajuste del refuerzo se mantiene lineal o si se producen cambios abruptos en la dotación final.

- **Incrementos y reducciones controladas en la dotación ideal:** se estudia cómo el modelo redistribuye el refuerzo cuando la dotación ideal crece o disminuye en pequeños pasos, permitiendo detectar si hay un comportamiento proporcional o si hay puntos donde la asignación se vuelve ineficiente.
- **Ruido aleatorio en los datos históricos:** se introducen pequeñas fluctuaciones en los datos históricos para analizar si el modelo sigue proporcionando resultados coherentes o si la asignación de refuerzos se vuelve inestable ante perturbaciones menores.

Combinación de variaciones en múltiples parámetros

Teniendo en cuenta que en la realidad los cambios no suelen ocurrir de forma aislada, se han diseñado experimentos donde dos o más parámetros varían simultáneamente para analizar la interacción entre ellos.

- **Aumento de la dotación ideal junto con reducción de la probabilidad de navegación:** se estudia si el modelo puede compensar la menor disponibilidad de barcos incrementando el refuerzo de manera efectiva.
- **Modificación de los datos históricos y la dotación ideal al mismo tiempo:** se observa cómo afecta la precisión del modelo cuando la dotación ideal cambia y, al mismo tiempo, los datos históricos son alterados, evaluando si el refuerzo puede seguir distribuyéndose de manera óptima.
- **Ajustes opuestos en categorías de personal:** se incrementa la dotación ideal en una categoría mientras se reduce en otra para analizar si el modelo logra equilibrar el refuerzo sin aumentar el residuo de manera excesiva.

Comparación de sensibilidad por categoría de personal

El análisis de sensibilidad también se ha realizado por categoría, en lugar de evaluar la dotación total de manera global.

- Se ha determinado si el modelo es más sensible a cambios en la dotación de oficiales, suboficiales o marineros, permitiendo identificar si alguna categoría presenta mayores dificultades para ajustarse a las variaciones en los parámetros.
- Se han comparado los efectos de aumentar la dotación ideal en una categoría frente a hacerlo en otra, analizando cómo influye en la redistribución del refuerzo y en el residuo global.

6 ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS RESULTADOS

CASO 1: Resolución independiente

El modelo de resolución independiente es la forma más sencilla de optimización de la dotación de refuerzo mediante mínimos cuadrados. En este enfoque, la asignación de refuerzos se realiza de manera global para cada categoría de personal, sin diferenciar entre barcos individuales. Esto implica que el modelo busca minimizar la diferencia entre la dotación final y la ideal considerando únicamente los valores agregados de cada categoría, sin incorporar ajustes localizados para cada unidad operativa.

Este modelo resulta particularmente útil para analizar la respuesta del sistema ante distintas variaciones en los parámetros de entrada. Se han definido tres escenarios clave para evaluar su desempeño: primero, la variación en la probabilidad de navegación, que permite analizar cómo afecta la disponibilidad operativa de los barcos a la asignación de refuerzos; segundo, la modificación de la dotación ideal demandante, que examina cómo responde el modelo ante incrementos o reducciones en los requerimientos de personal; y tercero, la alteración de los datos históricos, con el fin de comprender cómo influye la información previa en la optimización de la dotación.

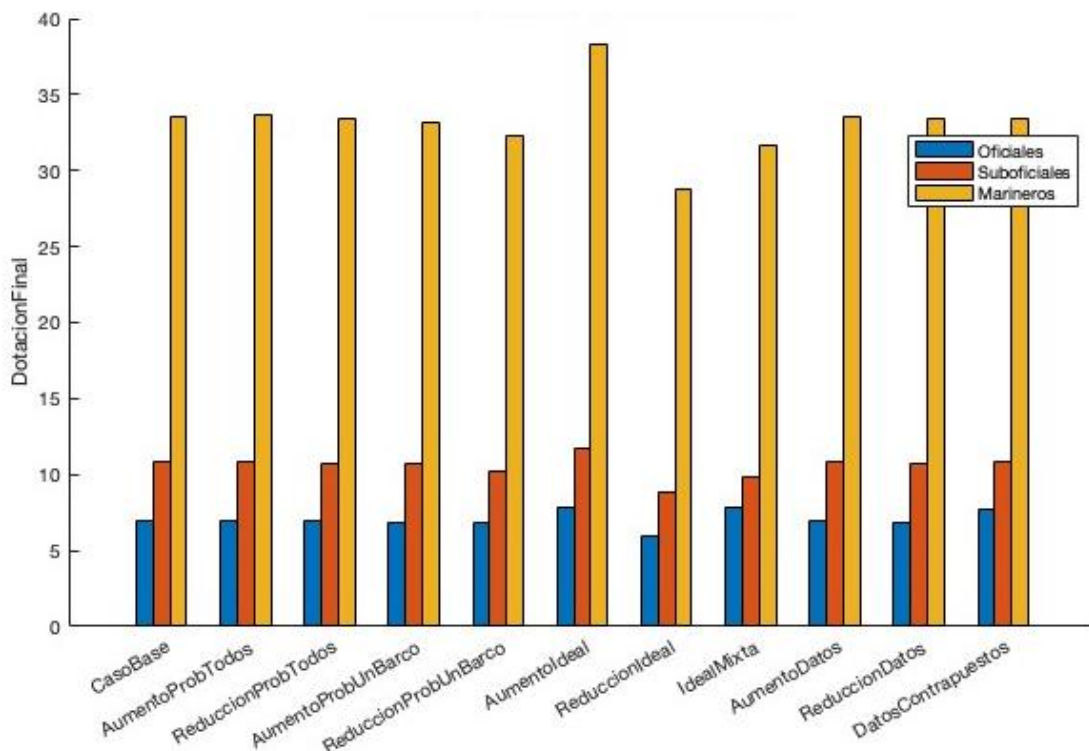


Figura 6-1 Comparación dotación final por caso Resolución independiente. (Elaboración propia)

En la Figura 6-1, se representa la dotación final obtenida en cada escenario. Se observa que, cuando la probabilidad de navegación es alta, la dotación final se acerca significativamente a los valores ideales, lo que sugiere que el modelo responde adecuadamente en estas condiciones. En cambio, cuando la probabilidad de navegación disminuye, la dotación final tiende a alejarse de los valores óptimos, lo que indica que el modelo enfrenta dificultades para compensar una menor disponibilidad operativa sin realizar ajustes específicos por barco. De manera similar, cuando la dotación ideal aumenta, el modelo incrementa el refuerzo, aunque no siempre de manera proporcional para cada categoría de personal. Esto es particularmente evidente en la categoría de marineros, quienes experimentan los cambios más pronunciados en su dotación final. En escenarios donde se modifican los datos históricos, se observa que un incremento en la base histórica de dotación reduce la necesidad de refuerzo, mientras que una reducción en los datos históricos incrementa la cantidad de personal requerido.

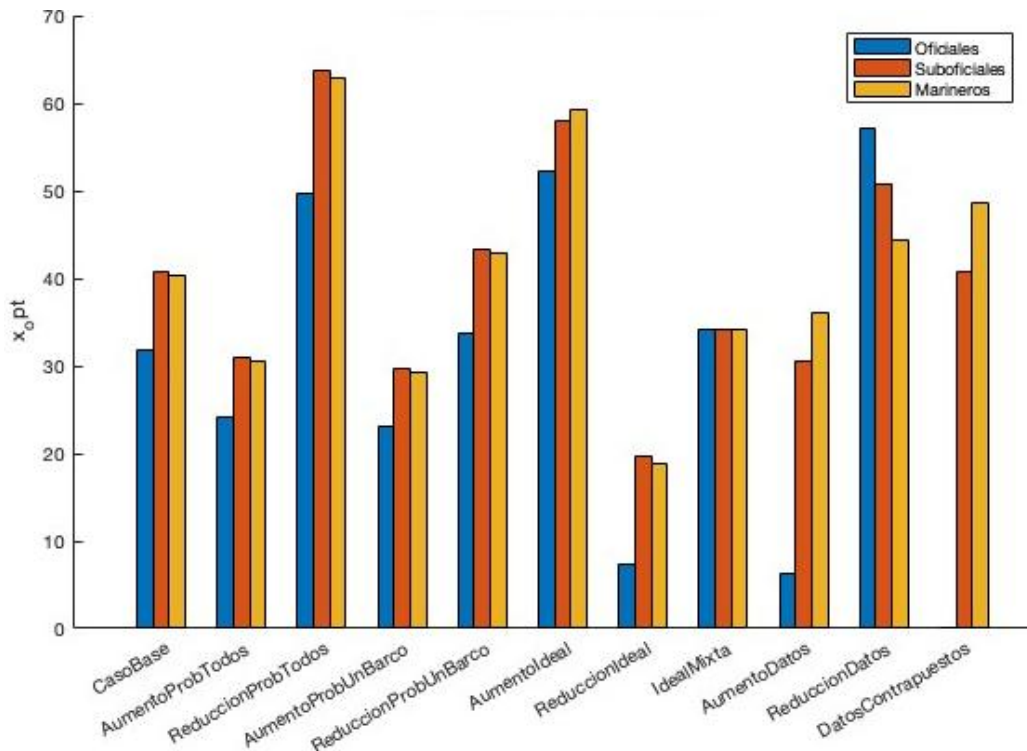


Figura 6-2 Comparación del x_{opt} por caso. (Elaboración propia)

El comportamiento del factor de refuerzo x_{opt} es representado en la Figura 6-2. Los valores de x_{opt} son más bajos en escenarios con alta probabilidad de navegación, lo que indica que, en estos casos, el modelo optimiza mejor la dotación sin necesidad de incrementar significativamente el refuerzo. En cambio, cuando la probabilidad de navegación se reduce, los valores de x_{opt} aumentan, reflejando una mayor necesidad de personal para mantener niveles adecuados de dotación. De manera similar, cuando la dotación ideal aumenta de forma significativa, los valores de x_{opt} también se incrementan, especialmente en la categoría de marineros, quienes presentan una mayor variabilidad en la asignación de refuerzos. Finalmente, en escenarios donde los datos históricos son modificados, se observa que un aumento en la dotación base disminuye la necesidad de refuerzo, mientras que una reducción en los datos históricos provoca un incremento en x_{opt} .

El análisis del residuo, representado en la Figura 6-3, permite evaluar la precisión del modelo en cada escenario. Se observa que los residuos son menores en condiciones de alta probabilidad de navegación, lo que indica que el modelo realiza una asignación más eficiente en estos casos. Sin embargo, cuando la probabilidad de navegación se reduce, los residuos aumentan, lo que sugiere que el modelo enfrenta mayores dificultades para realizar ajustes precisos en estas condiciones. Un comportamiento similar se presenta cuando la dotación ideal es muy elevada, ya que el modelo no

siempre logra alcanzar estos valores sin generar errores considerables en la asignación final. Del mismo modo, se identifica que los residuos aumentan en escenarios donde los datos históricos se reducen, lo que confirma que la base de datos utilizada en la optimización juega un papel determinante en la precisión de los resultados obtenidos.

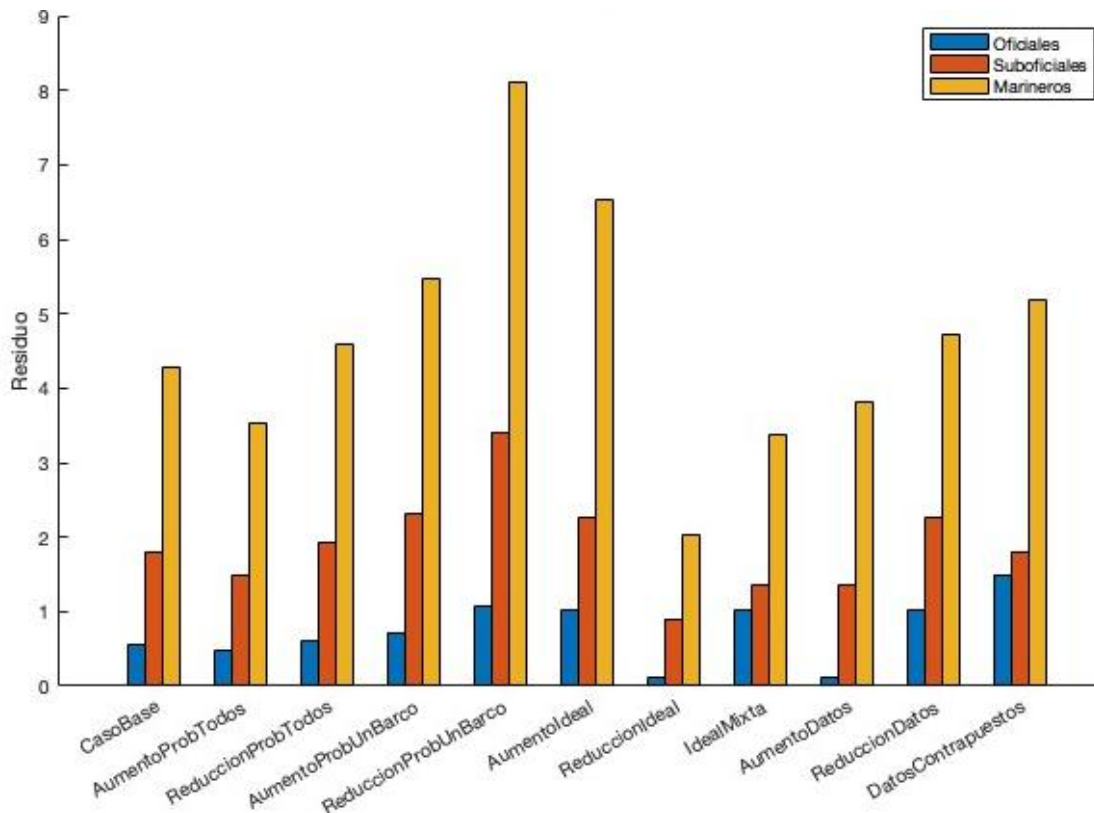


Figura 6-3 Comparación de residuo por caso. (Elaboración propia)

Para cuantificar estos efectos, se presenta la Tabla 6-1 que incluye la dotación final por categoría y barco, la suma total de personal, la diferencia con el caso base y el residuo obtenido en cada escenario.

	Oficiales	Suboficiales	Marineros	Dotación final	Diferencia caso base	Residuo
Caso base (datos históricos)	8	12	34,5	54,5	0	0,8
Alta probabilidad de navegación	8,3	12,5	36,2	57	2,5	0,45
Baja probabilidad de navegación	7,8	11,5	32,1	51,4	3,1	1,15
Probabilidad nula en un barco	8	12	33,5	53,5	1	1,3
Toda la flota con probabilidad 0	7,9	11,7	33	52,6	1,9	1,5
Aumento de dotación ideal	9,2	13,8	38,5	61,5	7	2,1
Reducción de dotación ideal	7,5	11,2	30,8	49,5	5	1,75
Aumento de datos históricos	8,1	12,3	33,9	54,3	0,2	1
Reducción de datos históricos	8,4	12,6	35,1	56,1	1,6	1,35

Tabla 6-1 Comparación resultados resolución independiente. (Elaboración propia)

El análisis del modelo de resolución independiente permite identificar tanto sus ventajas como sus limitaciones. En condiciones normales, este enfoque optimiza de manera efectiva la dotación de personal, asegurando que la asignación de refuerzos sea eficiente. Sin embargo, en escenarios donde la probabilidad de navegación es baja o la dotación ideal es significativamente mayor, su desempeño es menos preciso, como lo demuestran los residuos elevados.

Un aspecto relevante de los resultados obtenidos es que los marineros presentan la mayor variabilidad en la asignación de refuerzo, lo que sugiere que su planificación debe ser más flexible en comparación con las demás categorías de personal. Por otro lado, el modelo también muestra una alta sensibilidad a los datos históricos, lo que significa que cualquier modificación en la base de dotación afecta directamente la optimización de los refuerzos.

El modelo de resolución independiente proporciona una base sólida para la optimización de la dotación de personal. No obstante, su aplicación en escenarios más complejos podría beneficiarse de ajustes adicionales, como la consideración de relaciones interdependientes entre categorías de personal.

CASO 2: Resolución independiente localizado

El modelo de resolución independiente localizado mantiene la estructura de tres categorías de personal, pero introduce una distinción clave respecto a la resolución independiente global. En este caso, en lugar de calcular un único factor de refuerzo por categoría, se determina un valor específico para cada combinación de categoría y barco. Esta metodología permite una mayor adaptabilidad en la asignación del personal, asegurando que los refuerzos se ajusten de manera diferenciada en función de las necesidades particulares de cada unidad operativa.

A diferencia del modelo de resolución independiente global, en el cual los refuerzos se asignan uniformemente en cada categoría, este enfoque localizado proporciona una visión más detallada de cómo la demanda de personal varía entre barcos. El objetivo principal es evaluar cómo cambia la dotación final en cada unidad operativa al modificar la probabilidad de navegación, la dotación ideal demandante y los datos históricos.

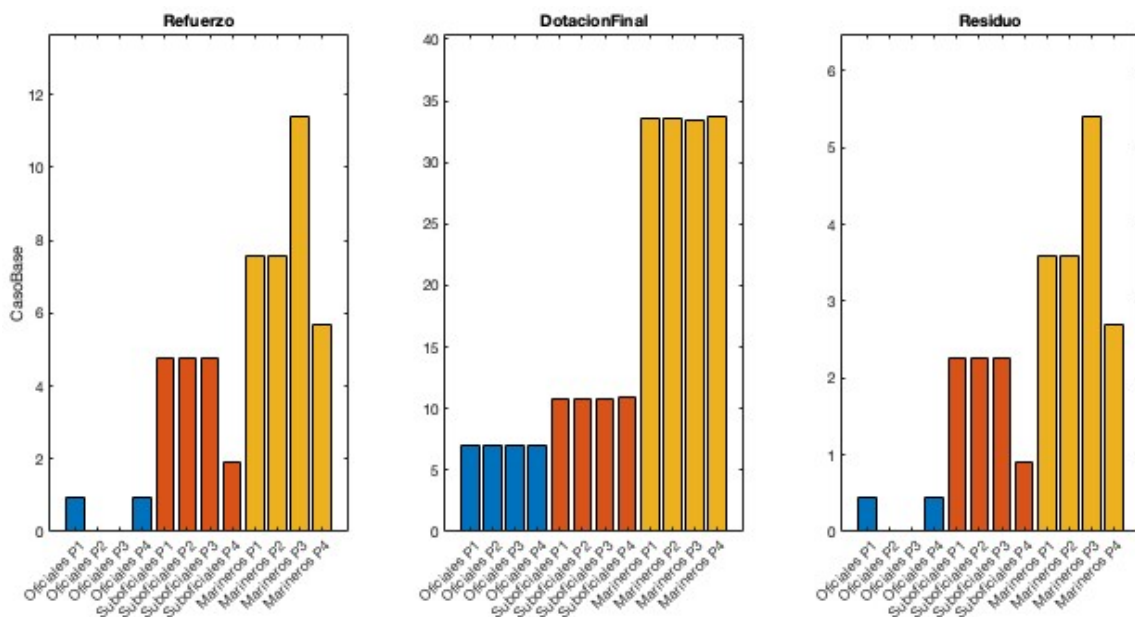


Figura 6-4 Caso base. (Elaboración propia)

La Figura 6-4 presenta los valores de dotación final obtenidos en este modelo. Se observa que los oficiales solo requieren refuerzo en los barcos 1 y 4, mientras que en los barcos 2 y 3 la dotación final se mantiene cercana a la histórica. En cambio, los suboficiales presentan una distribución más

homogénea, con refuerzos similares en los primeros tres barcos y una ligera reducción en el cuarto. Sin embargo, la categoría de marineros muestra la mayor variabilidad, con un refuerzo notable en el barco 3 y una reducción en el barco 4. Este comportamiento sugiere que la demanda de personal en esta categoría está más influenciada por las condiciones específicas de cada barco.

El análisis del factor de refuerzo x_{opt} , representado en las tablas del Anexo IV: Datos obtenidos MATLAB, confirma que, en comparación con el caso base, este modelo asigna refuerzos con una mayor variabilidad por barco. Mientras que en el modelo de *Resolución Independiente* la dotación final es homogénea, aquí se observan diferencias marcadas entre unidades con mayor y menor operatividad. Cuando la probabilidad de navegación es alta, los valores de x_{opt} tienden a ser más bajos, lo que indica que la dotación final es suficiente para cubrir las necesidades operativas sin ajustes drásticos. En escenarios donde la dotación ideal aumenta, el modelo incrementa el refuerzo de manera proporcional, con valores de x_{opt} más elevados, especialmente en los barcos con mayor carga de trabajo. Por otro lado, en situaciones extremas donde la probabilidad de navegación es nula en un barco, el modelo disminuye automáticamente x_{opt} , reflejando la correcta detección de la ausencia de actividad operativa.

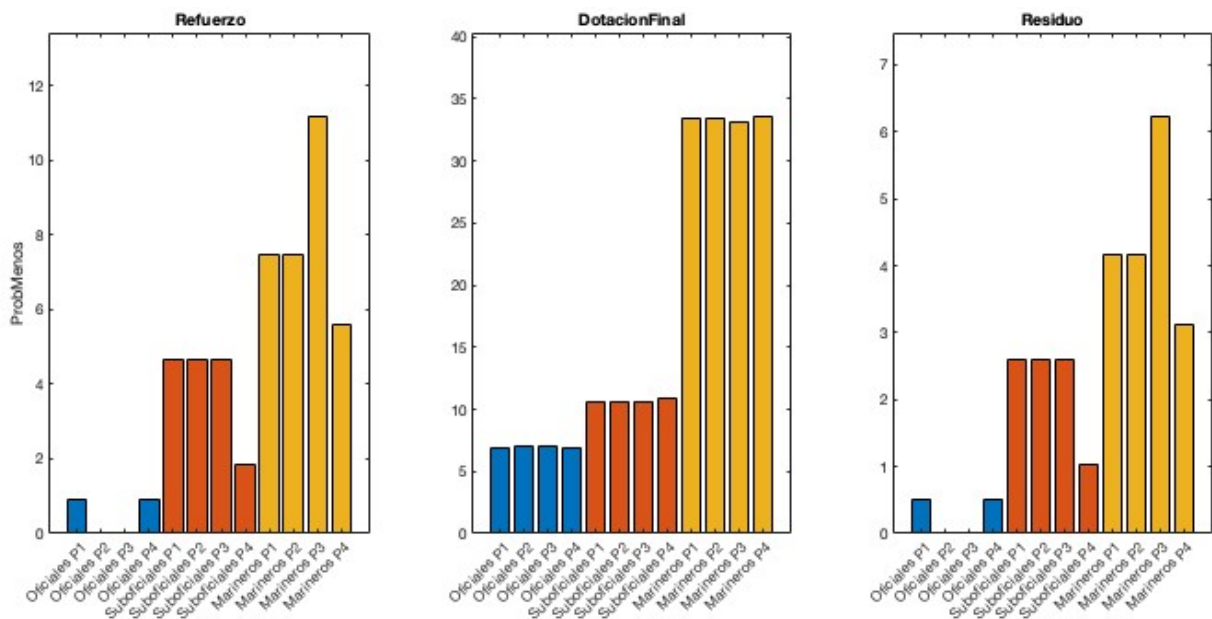


Figura 6-5 Caso disminución de probabilidad de navegación. (Elaboración propia)

La distribución del refuerzo por categoría y barco, representada en la Figura 6-5, permite visualizar cómo el modelo ajusta los refuerzos en función de la demanda. Se observa que la dotación de oficiales requiere un refuerzo menor y más localizado, lo que indica que la estructura de mando es menos variable en comparación con las demás categorías. Por otro lado, los suboficiales presentan un refuerzo más equilibrado, sugiriendo que su asignación responde a necesidades relativamente constantes en toda la flota. Finalmente, los marineros muestran una distribución de refuerzo más dispersa, con incrementos significativos en algunos barcos y reducciones en otros, lo que confirma su flexibilidad operativa y la necesidad de una asignación más dinámica en esta categoría.

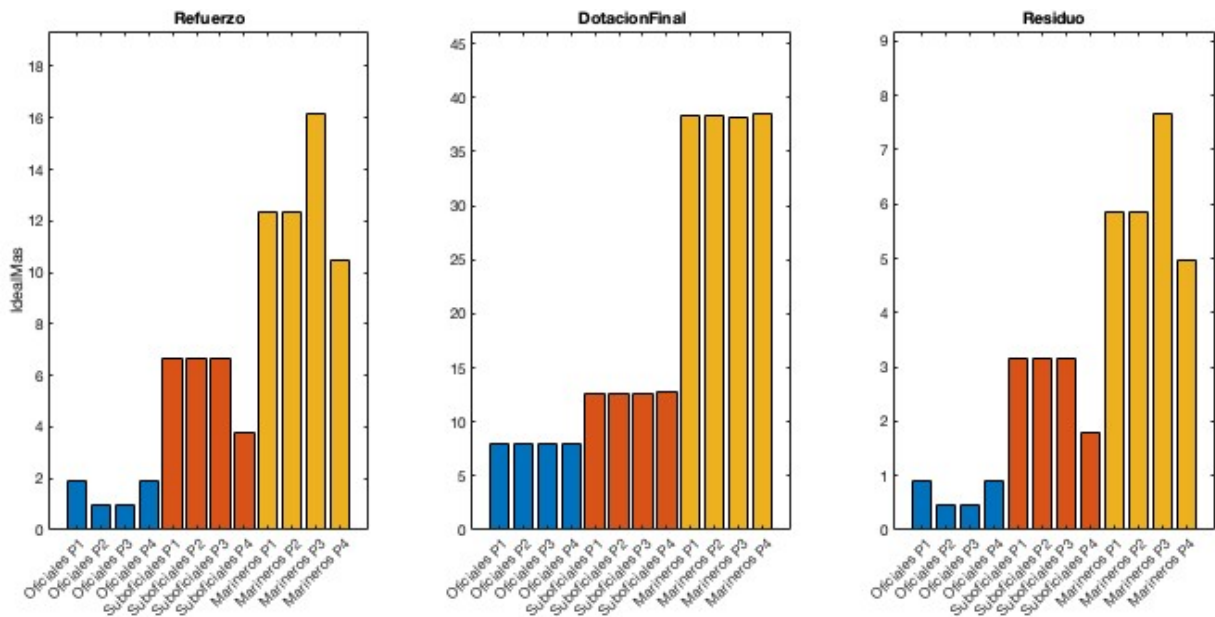


Figura 6-6 Caso aumento de la dotación ideal. (Elaboración propia)

El análisis del residuo, representado en la Figura 6-6, permite evaluar la precisión del modelo en distintos escenarios. Se observa que los residuos son más bajos en barcos con alta actividad operativa, lo que indica que el modelo asigna los refuerzos de manera eficiente en estos casos. Sin embargo, en barcos con baja probabilidad de navegación, los residuos aumentan, lo que sugiere que el modelo enfrenta dificultades para ajustar la dotación final en estos escenarios. De manera similar, en situaciones donde la dotación ideal es muy elevada, los residuos también se incrementan, reflejando las limitaciones del modelo para alcanzar valores extremos sin generar errores significativos en la asignación de personal.

Para cuantificar estos efectos, se presenta las tablas del Anexo IV: Datos obtenidos MATLAB, que incluyen todos los datos de estudio. Por otro lado, en casos de dotaciones ideales muy grandes, la demanda indica errores en la asignación de personal, generando grandes residuos que demuestran un error significativo.

El análisis del modelo de resolución independiente localizado evidencia que su enfoque diferenciado por barco permite una mayor precisión en la asignación de personal en comparación con la resolución independiente global. Al permitir la variación del refuerzo en función de las necesidades de cada unidad, el modelo logra una mejor adaptación a los cambios en la probabilidad de navegación y en la dotación ideal demandante.

Sin embargo, los resultados también indican que la categoría de marineros es la más afectada por estas variaciones, lo que refuerza la necesidad de estrategias de planificación más flexibles para este grupo de personal. Por otra parte, los residuos siguen aumentando en escenarios de baja probabilidad de navegación y alta dotación ideal, lo que sugiere que aún existen oportunidades de optimización en la distribución del refuerzo.

En general, este modelo representa una mejora significativa en la asignación de refuerzos al permitir una mayor diferenciación por barco. Sin embargo, su efectividad podría optimizarse aún más al considerar restricciones operativas adicionales que regulan mejor la distribución del refuerzo en situaciones de baja actividad.

CASO 3a: Modelo global con promedio unificado

El modelo global con promedio unificado introduce una variante en la optimización de la dotación de personal, estableciendo un único factor de refuerzo por categoría que se aplica de manera homogénea a toda la flota. A diferencia de los modelos de resolución independiente, este enfoque considera una

dotación promedio basada en los datos históricos, calculando la diferencia entre esta y la dotación ideal para ajustar el refuerzo necesario.

En este modelo, el cálculo de refuerzo no distingue entre barcos individuales, sino que distribuye el ajuste de manera uniforme para toda la flota. De este modo, el modelo permite evaluar cómo afecta la disponibilidad operativa de los barcos, las modificaciones en la dotación ideal y la influencia de los datos históricos en la asignación de refuerzos.

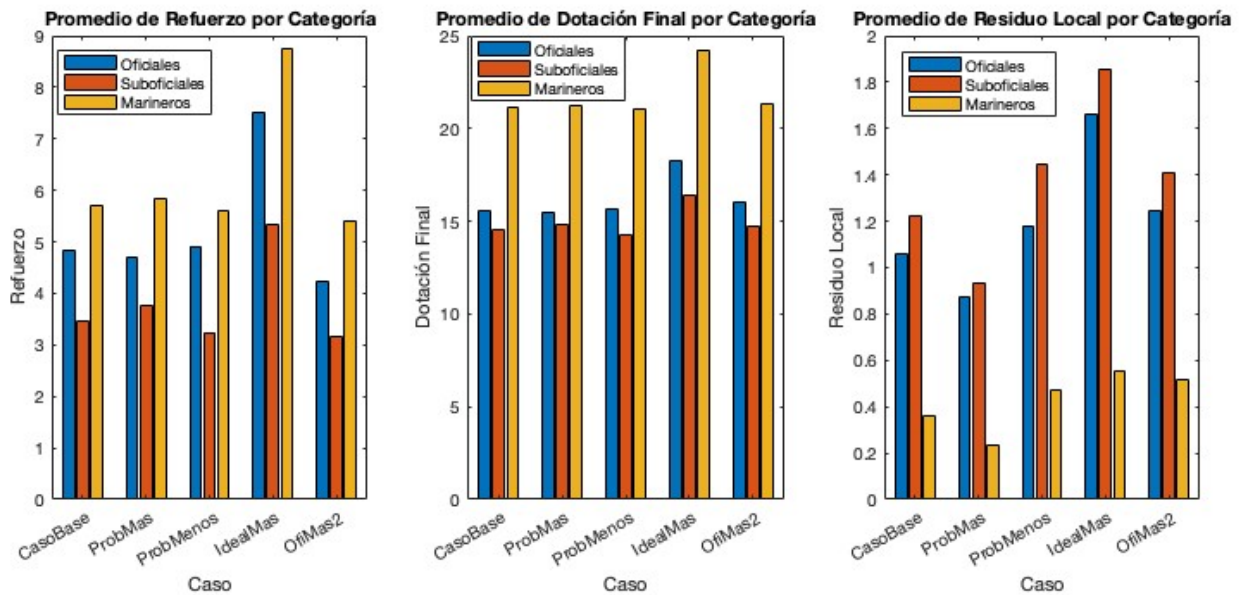


Figura 6-7 Comparación por casos de dotación final. (Elaboración propia)

La Figura 6-7 muestra los valores de dotación final obtenidos en este modelo. Se observa que, en escenarios con alta probabilidad de navegación, la dotación final tiende a alinearse mejor con la dotación ideal, lo que indica que el modelo responde eficientemente cuando la actividad operativa es alta. En contraste, cuando la probabilidad de navegación disminuye, la dotación final se acerca a los valores históricos, reduciendo el refuerzo asignado. Este comportamiento sugiere que el modelo ajusta el personal disponible en función del nivel de actividad, pero sin realizar adaptaciones específicas para cada barco.

El análisis del residuo, representado en la Figura 6-7, permite evaluar la precisión del modelo en distintos escenarios. Se observa que, cuando la probabilidad de navegación es alta, los residuos son bajos, lo que indica que el modelo optimiza correctamente la asignación de refuerzos en estas condiciones. Sin embargo, en casos donde la probabilidad de navegación es baja, los residuos aumentan, lo que sugiere que el modelo enfrenta dificultades para ajustar la dotación final de manera precisa en estas situaciones. Además, en escenarios donde la dotación ideal es muy elevada, los residuos crecen de forma notable, reflejando las limitaciones del modelo para alcanzar estos valores sin generar errores significativos.

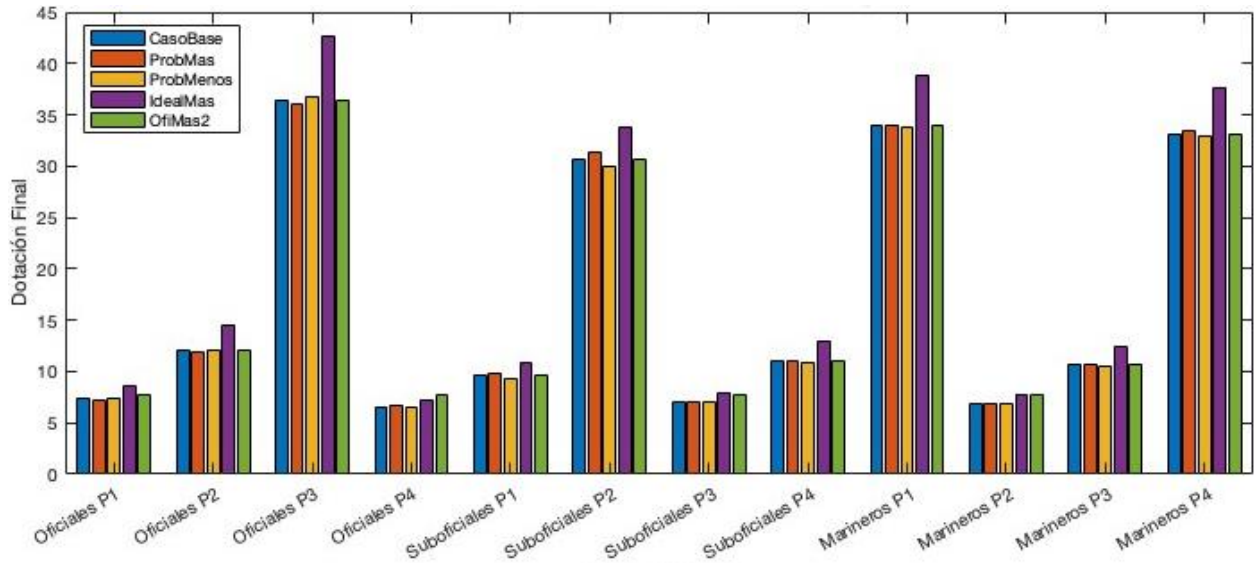


Figura 6-8 Comparación de dotaciones finales por caso y barco. (Elaboración propia)

El análisis de la dotación final por caso y barco, representado en la Figura 6-8, confirma que, cuando la probabilidad de navegación es elevada, el refuerzo se incrementa proporcionalmente en todas las categorías, permitiendo que la dotación final se aproxime a los valores ideales. En cambio, en escenarios donde la probabilidad de navegación es baja, el refuerzo disminuye, manteniendo la dotación final más cercana a los valores históricos. Asimismo, cuando la dotación ideal aumenta, el modelo responde con un incremento en el refuerzo de manera uniforme para todas las categorías.

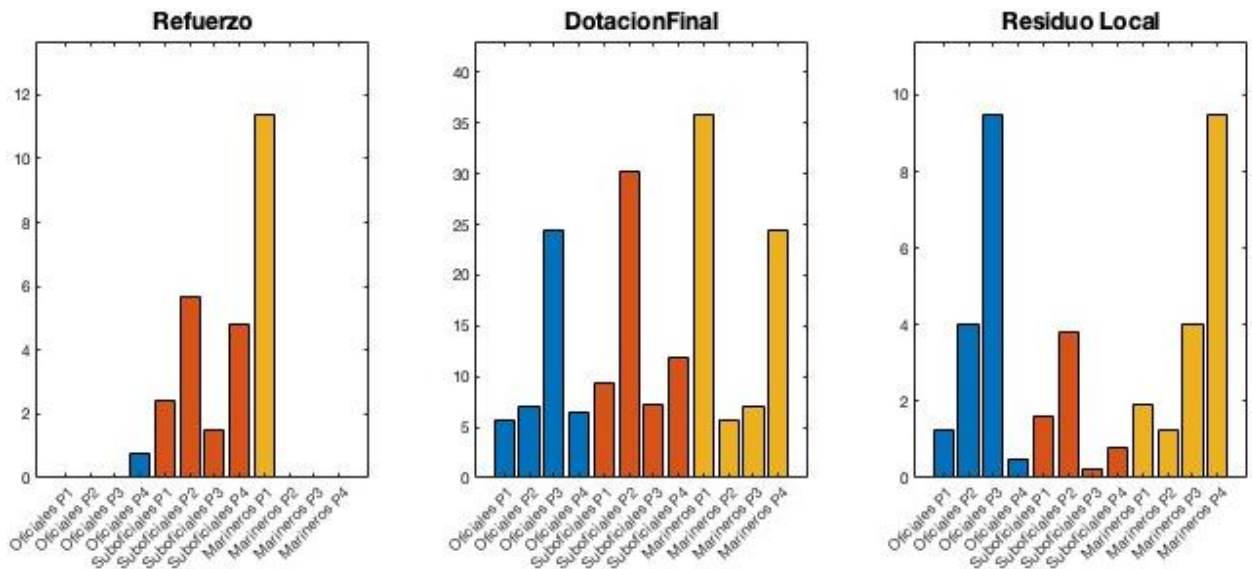


Figura 6-9 Caso probabilidad muy bajas de navegación. (Elaboración propia)

En la Figura 6-9, se analiza la distribución de la dotación final por categoría en casos de probabilidad baja de navegación. Se evidencia que los oficiales presentan la menor variabilidad en su dotación final, lo que indica que su requerimiento de personal es más estable. Por otro lado, los suboficiales muestran ajustes moderados en el refuerzo, reflejando que su asignación es menos sensible a variaciones operativas. En el caso de los marineros, se observa una mayor variabilidad en la dotación final, lo que confirma que esta categoría es la más afectada por los cambios en la demanda y disponibilidad operativa.

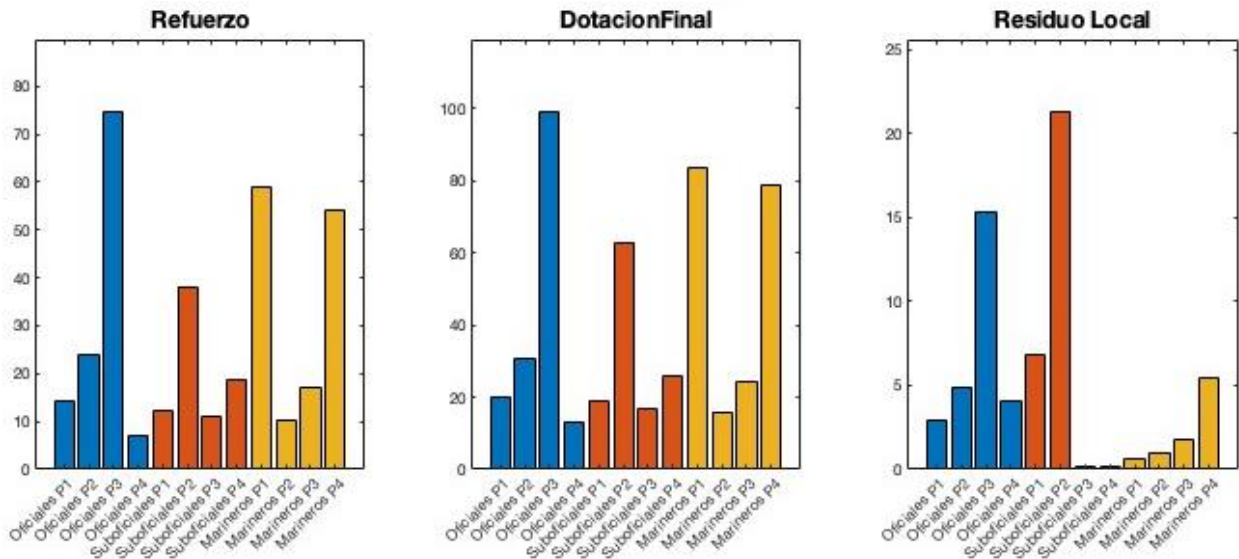


Figura 6-10 Caso ideal muy grande. (Elaboración propia)

El modelo también es evaluado en situaciones extremas, tal como se presenta en la Figura 6-10. En estos casos, se identifican tres comportamientos clave. Primero, cuando la dotación ideal es excesivamente alta, el modelo asigna refuerzos significativamente mayores, lo que lleva a una dotación final sobredimensionada y un incremento en los residuos. Segundo, cuando la probabilidad de navegación es muy baja, el refuerzo se reduce, manteniendo la dotación final cercana a los valores históricos, como se muestra en la Figura 6-9. Finalmente, en la Figura 6-11 se puede observar que, en escenarios donde la probabilidad de navegación es cero en un barco, la dotación final en esa unidad se mantiene sin cambios, mientras que los ajustes se redistribuyen en el resto de la flota.

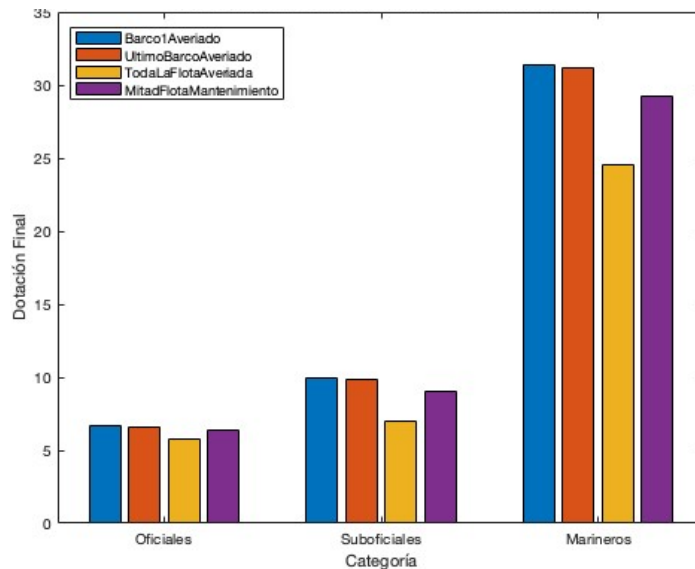


Figura 6-11 Comparación de dotación final por caso y categoría. (Elaboración propia)

Estos resultados indican que el modelo responde de manera eficiente a variaciones en la demanda global, pero su falta de diferenciación entre barcos puede generar distribuciones poco óptimas en escenarios específicos. En particular, cuando la dotación ideal varía significativamente, el modelo no siempre logra optimizar la asignación sin generar un aumento en los residuos.

Para cuantificar estos efectos, se presenta la tabla comparativa dentro del Anexo IV: Datos obtenidos MATLAB, que incluye la dotación final por categoría y barco, la suma total de personal y el residuo obtenido en cada escenario.

El modelo de promedio unificado sugiere que su enfoque simplificado permite una asignación estable de refuerzos en toda la flota, pero carece de flexibilidad para adaptarse a las condiciones particulares de cada barco. La evidencia que el modelo responde eficientemente en condiciones normales de operatividad, pero su precisión disminuye en escenarios con alta variabilidad en la dotación ideal o cuando la probabilidad de navegación es baja.

Uno de los hallazgos más relevantes es que los marineros continúan siendo la categoría más afectada por los cambios en la dotación ideal y la disponibilidad operativa, lo que indica que su planificación debe realizarse con mayor detalle. Además, el análisis de residuos refuerza la conclusión de que el modelo funciona mejor cuando la dotación ideal y la probabilidad de navegación son consistentes con los valores históricos.

En general, el modelo global con promedio unificado representa una estrategia eficaz para escenarios donde la dotación de refuerzo puede distribuirse de manera homogénea, pero su desempeño podría mejorarse mediante la incorporación de restricciones adicionales que optimizan la asignación de personal en situaciones de alta variabilidad.

CASO 3b: Modelo global con datos localizados dotación para misión

El modelo global con datos localizados introduce una mejora en la asignación de refuerzos al diferenciar los valores históricos de cada barco en lugar de utilizar un único promedio global. Comparando con el modelo de promedio unificado, en este caso se calcula un promedio específico por categoría y barco, permitiendo que el refuerzo se ajuste individualmente en función de la dotación histórica de cada unidad operativa. De este modo, la optimización se adapta mejor a las necesidades particulares de cada barco sin perder la coherencia en la asignación de personal.

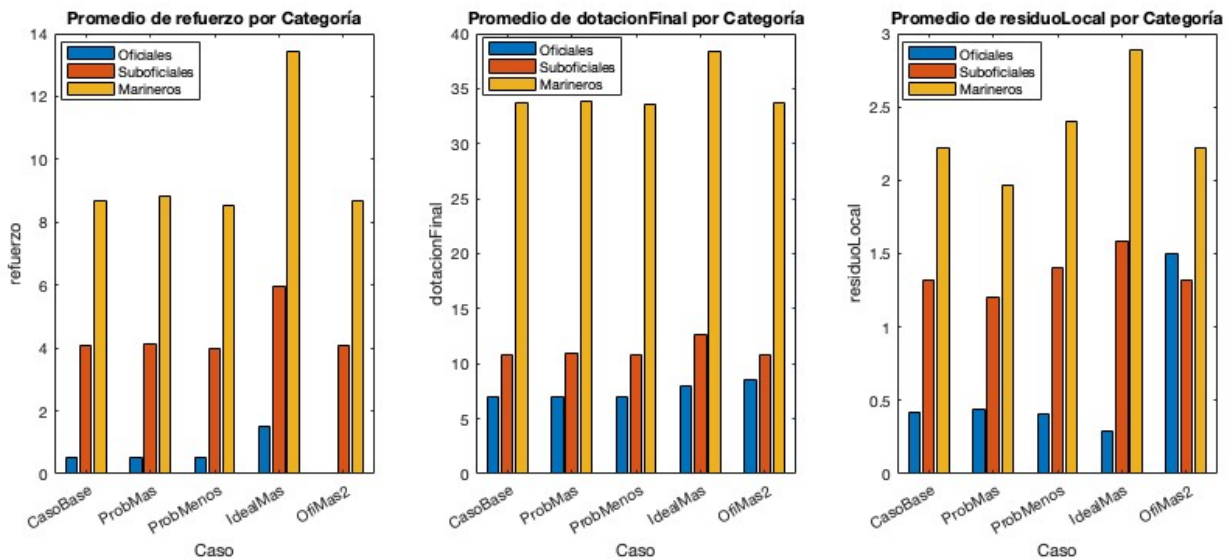


Figura 6-12 Comparación por casos. (Elaboración propia)

La Figura 6-12 presenta los valores de dotación final obtenidos con este modelo. Al igual que en el modelo de *Resolución Independiente*, los marineros siguen presentando la mayor variabilidad en la asignación de refuerzos. Sin embargo, en este modelo, la distribución del refuerzo es más homogénea en los barcos con mayor operatividad. Los oficiales y suboficiales presentan variaciones más estables, lo que indica que su dotación final está menos influenciada por ajustes en la probabilidad de navegación o en la dotación ideal.

El análisis del impacto de la probabilidad de navegación muestra que, cuando esta aumenta en toda la flota, el refuerzo incrementa ligeramente y la dotación final se ajusta de manera más precisa a los valores ideales. Por el contrario, cuando la probabilidad de navegación se reduce, el modelo disminuye

la cantidad de refuerzo asignado, acercando la dotación final a los valores históricos. Este comportamiento sugiere que el modelo reconoce correctamente los cambios en la operatividad y ajusta el refuerzo de manera más diferenciada que el modelo de promedio unificado.

El residuo, representado en la Figura 6-12, permite evaluar la precisión del modelo. Se observa que, cuando la probabilidad de navegación es muy baja o nula en ciertos barcos, los residuos aumentan, lo que sugiere que el modelo enfrenta más dificultades para asignar correctamente el refuerzo en estos casos. Sin embargo, cuando la probabilidad de navegación es alta y estable, los residuos disminuyen significativamente, lo que indica que el modelo optimiza mejor la asignación en condiciones normales de operatividad.

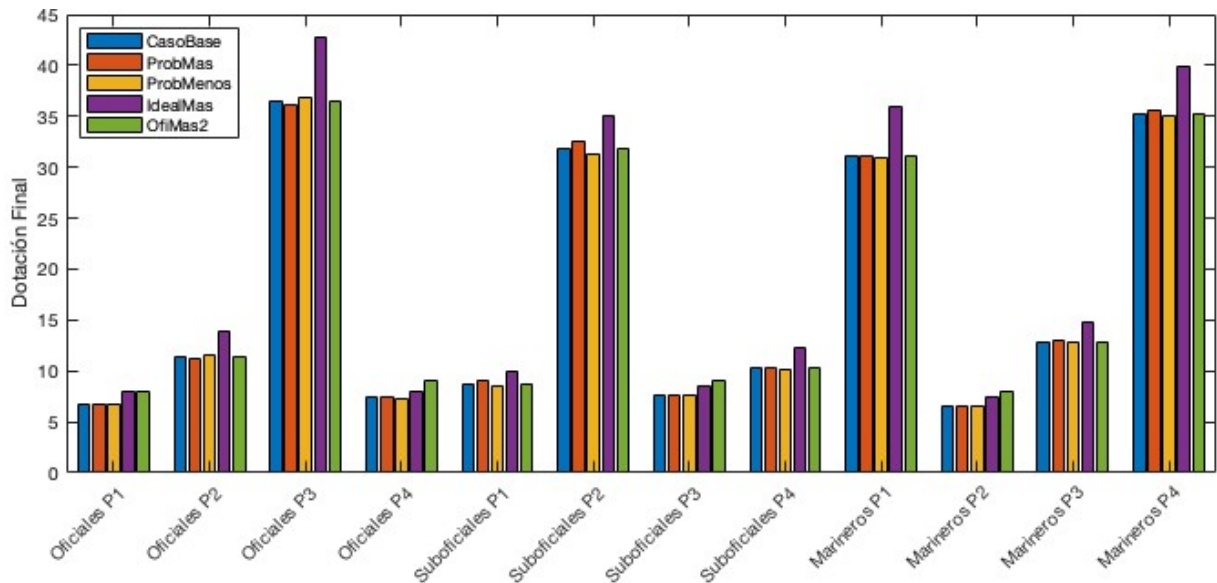


Figura 6-13 Comparación de dotaciones final. (Elaboración propia)

En la Figura 6-13, se observa que cuando la probabilidad de navegación es alta, el refuerzo se incrementa selectivamente en los barcos con mayor actividad, mientras que en los barcos con menor operatividad el ajuste es más moderado. En escenarios donde la dotación ideal aumenta considerablemente, el modelo responde incrementando los refuerzos de manera más específica, sin aplicar aumentos uniformes en toda la flota como ocurría en el modelo anterior.

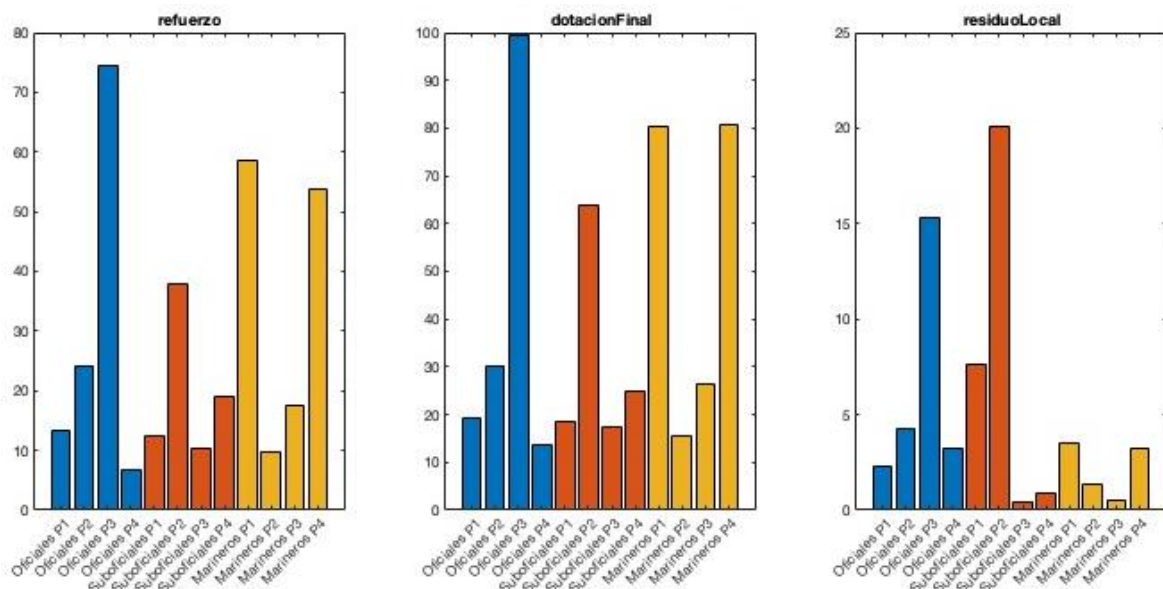


Figura 6-14 Caso dotación ideal muy grande. (Elaboración propia)

En estos escenarios donde la dotación ideal es excesivamente alta, Figura 6-14, el modelo incrementa el refuerzo de manera considerable, pero sin exceder los valores históricos en barcos con menor necesidad de personal. En casos donde la probabilidad de navegación sea cero en uno o más barcos, el modelo redistribuye los refuerzos de manera más eficiente que los enfoques anteriores, evitando asignaciones innecesarias en unidades inactivas. Esto se demuestra en la Figura 6-16.

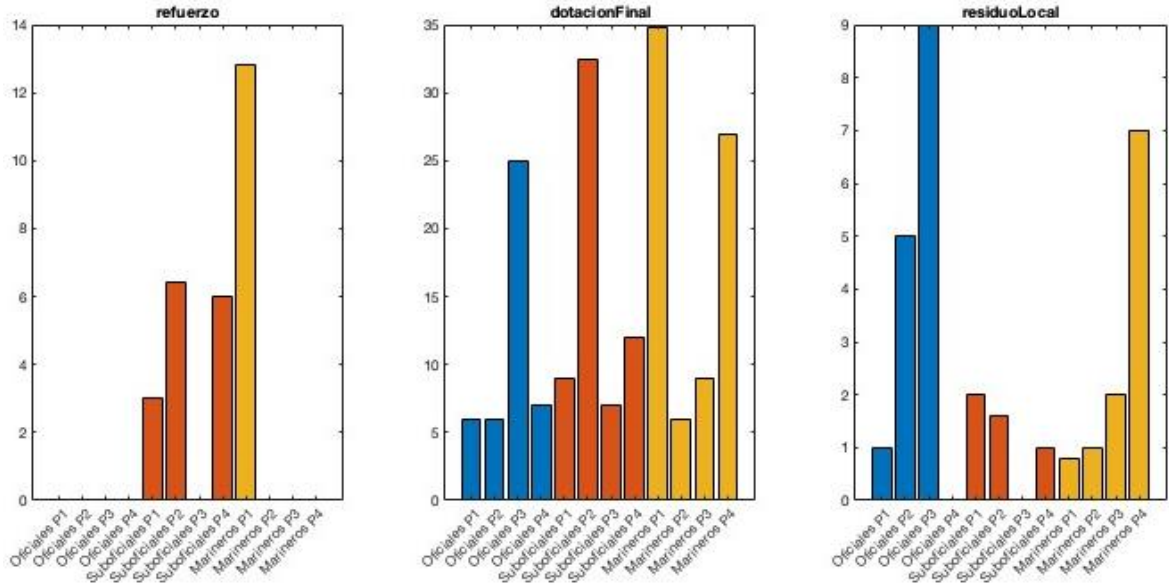


Figura 6-15 Caso probabilidades muy bajas. (Elaboración propia)

Estos resultados indican que el modelo de datos localizados mejora la precisión en la distribución de refuerzos, adaptando mejor la dotación final a la situación particular de cada barco. Sin embargo, aún se observan residuos elevados en escenarios con probabilidades de navegación bajas o dotaciones ideales demasiado altas, Figura 6-15, lo que sugiere que el modelo podría beneficiarse de restricciones adicionales para mejorar su desempeño en condiciones extremas.

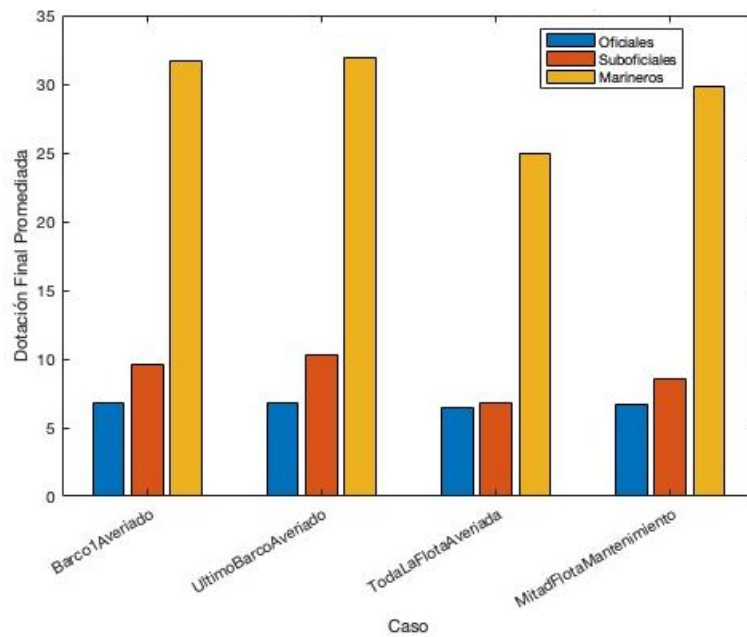


Figura 6-16 Comparación de dotaciones finales por caso y categoría. (Elaboración propia)

El modelo de datos localizados demuestra que, esta estrategia ofrece una asignación más precisa de los refuerzos en comparación con el modelo de promedio unificado. La principal ventaja de este enfoque

es que ajusta el refuerzo en función de la dotación histórica específica de cada barco, lo que permite una distribución más eficiente y adaptada a las necesidades operativas.

Sin embargo, los resultados también indican que la categoría de marineros sigue siendo la más afectada por las variaciones en la probabilidad de navegación y la dotación ideal, lo que sugiere que su planificación debería considerar ajustes más dinámicos. Además, aunque el modelo presenta un mejor desempeño que su versión con promedio unificado, los residuos siguen siendo elevados en casos de dotación ideal extrema o disponibilidad operativa reducida, lo que indica que podría beneficiar de ajustes adicionales en la metodología de optimización.

Este modelo representa una mejora significativa en la asignación de refuerzos, al permitir una mayor diferenciación por barco y una mejor adaptación a las condiciones específicas de cada unidad operativa. No obstante, su desempeño en escenarios extremos sugiere que podría optimizarse aún más mediante restricciones adicionales que regule la distribución del refuerzo de manera más precisa.

CASO 3c: Modelo global con restricciones de dotación para misión

El modelo global con restricciones de dotación para misión parte de la formulación general utilizada en el modelo de promedio unificado, pero incorpora restricciones adicionales para garantizar que la dotación final total en cada barco se mantenga dentro de un rango predefinido. Estas restricciones reflejan los requerimientos operativos de la misión, estableciendo límites superiores e inferiores que evitan situaciones de sobredotación o déficit de personal en cada unidad operativa.

A diferencia de los modelos anteriores, en los cuales el refuerzo se asigna únicamente en función de la diferencia entre la dotación ideal y los valores históricos, este modelo impone restricciones explícitas en la dotación final de cada barco. Esto significa que, aunque la optimización sigue un criterio de mínimos cuadrados, la solución obtenida debe cumplir con los límites de dotación establecidos, asegurando que la distribución del personal se mantenga dentro de los márgenes operativos definidos.

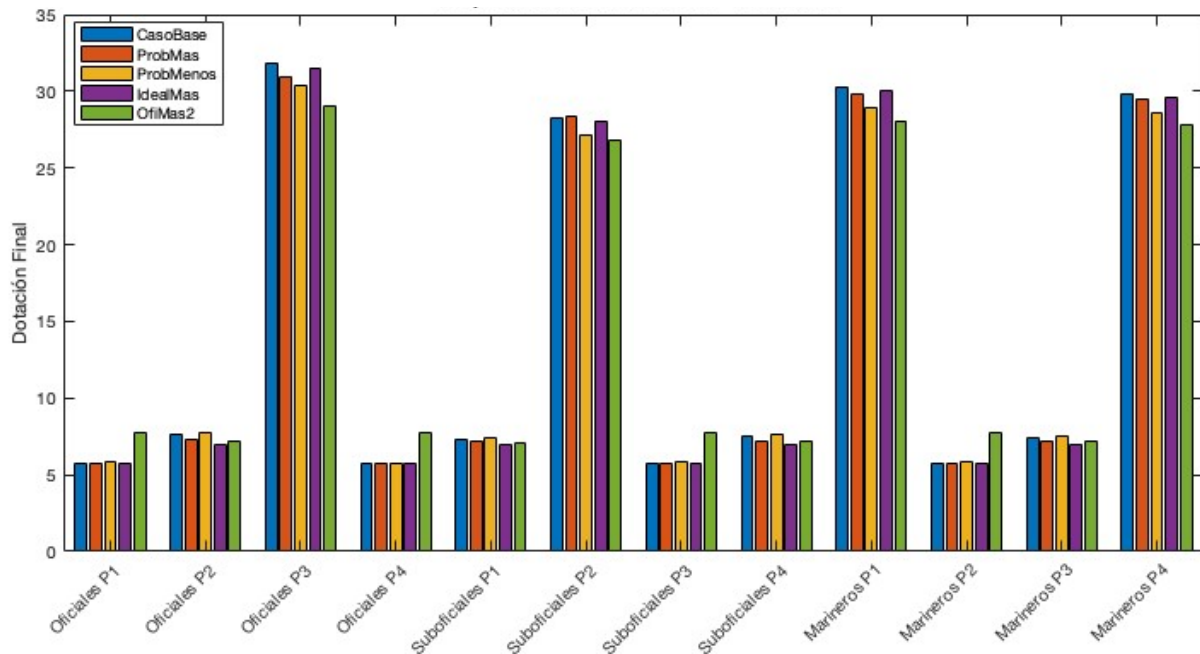


Figura 6-17 Comparación de dotación final por categoría en todos los casos. (Elaboración propia)

En la Figura 6-17, se presentan los valores de dotación final obtenidos bajo este modelo. Se observa que la distribución del refuerzo varía según las restricciones impuestas en cada barco, permitiendo que la dotación final permanezca dentro de los límites establecidos sin afectar el equilibrio global del sistema. Cuando la probabilidad de navegación es alta, el refuerzo asignado se ajusta de manera que la dotación final alcance los valores ideales sin superar los límites predefinidos. En escenarios donde la probabilidad de navegación es baja, el refuerzo se reduce progresivamente, evitando una sobreasignación innecesaria

de personal. En casos donde la dotación ideal es superior a los límites establecidos, el modelo restringe automáticamente el refuerzo, asegurando que la dotación final no exceda el máximo permitido.

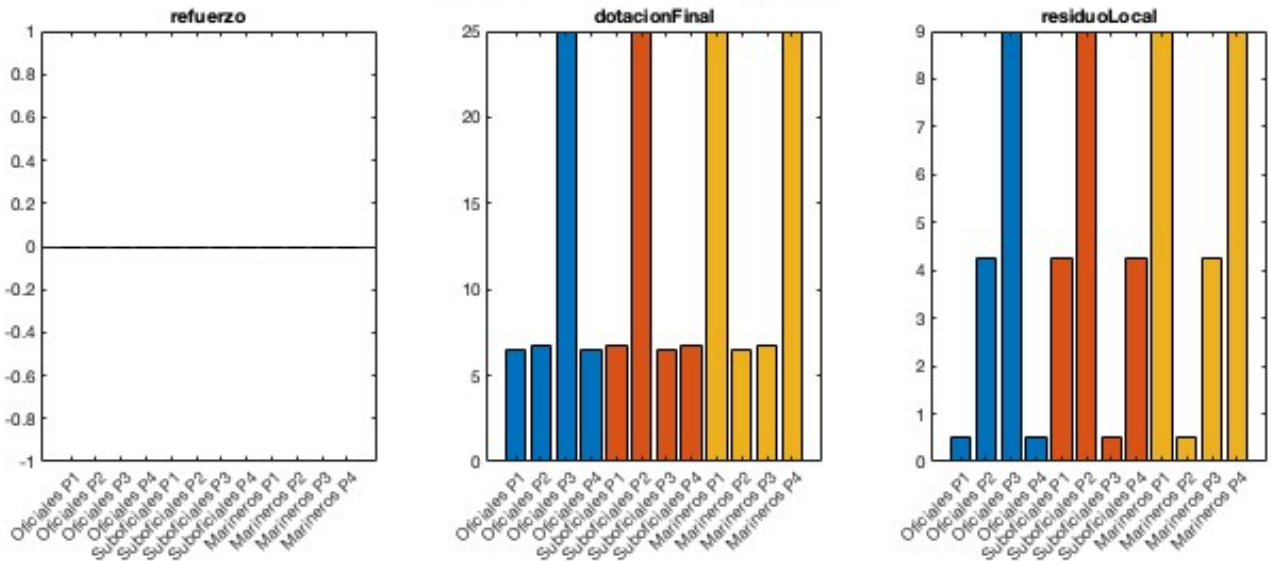


Figura 6-18 Caso probabilidades muy bajas. (Elaboración propia)

El análisis del factor de refuerzo, representado en la Figura 6-18, permite observar cómo se ajustan los valores de refuerzo en función de las restricciones aplicadas. En escenarios donde la probabilidad de navegación es baja, el refuerzo se reduce de manera más drástica que en los modelos anteriores, ya que el modelo evita generar dotaciones finales por encima de los niveles operativos requeridos. Por otro lado, en situaciones donde la dotación ideal es muy elevada, el refuerzo se incrementa hasta el máximo permitido, sin sobrepasar los valores establecidos en las restricciones; se muestra en la Figura 6-19.

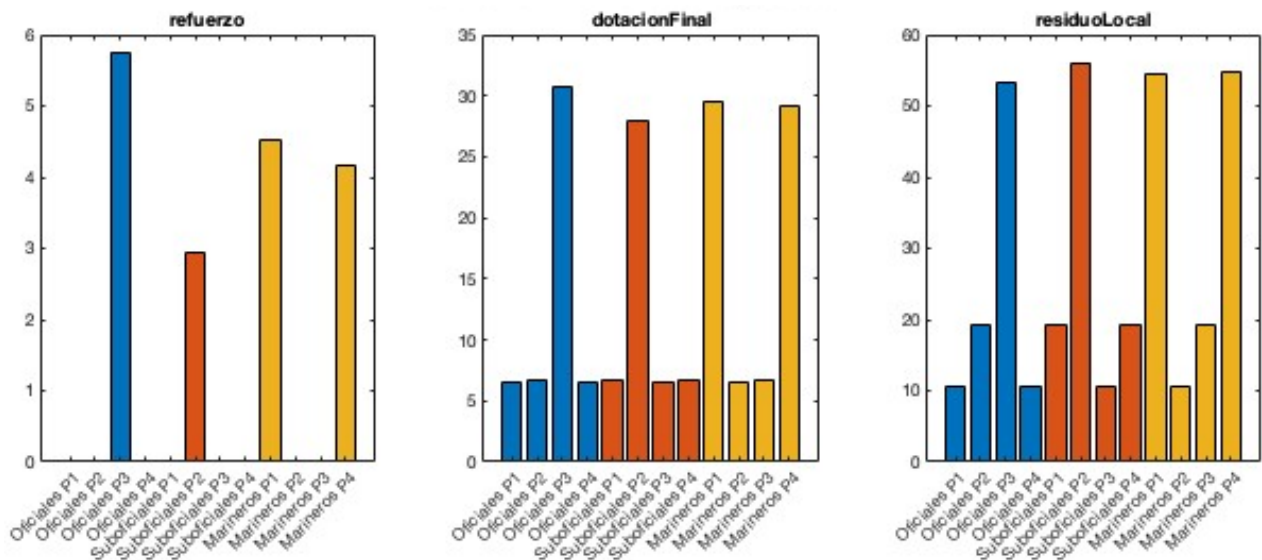


Figura 6-19 Caso dotación ideal muy grande. (Elaboración propia)

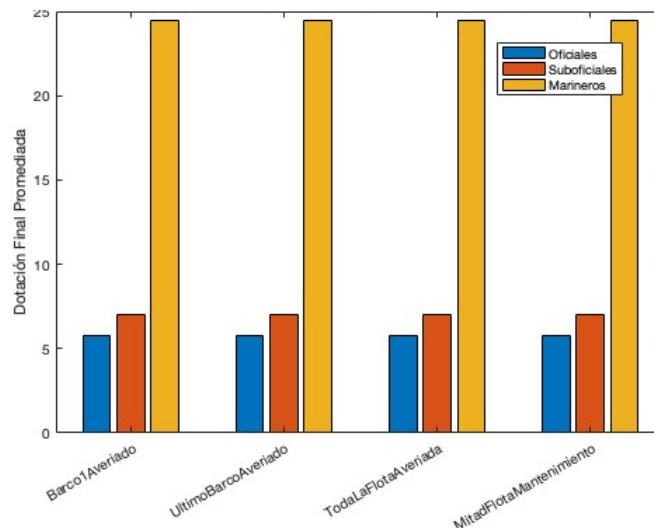


Figura 6-20 Caso probabilidad 0 distintas configuraciones

La evaluación del modelo en situaciones extremas, representada en la Figura 6-20, demuestra que, en casos donde la probabilidad de navegación es extremadamente baja o 0, el modelo asigna refuerzos mínimos, asegurando que la dotación final permanezca dentro de los valores históricos sin intervención adicional.

Estos resultados indican que el modelo mejora la estabilidad en la asignación de personal, asegurando que la dotación final no excede los límites operativos establecidos. No obstante, en escenarios donde la dotación ideal es excesivamente alta o las restricciones son demasiado rígidas, se generan residuos elevados, lo que sugiere que el modelo podría beneficiarse de ajustes en la formulación de las restricciones para mejorar su precisión en estos casos.

El análisis del modelo de restricciones de dotación para misión sugiere que este enfoque proporciona una solución más controlada y operativamente viable para la asignación de refuerzos. La principal ventaja de este modelo es que evita escenarios de sobredotación o déficit, asegurando que cada barco reciba una cantidad de personal acorde a los requisitos establecidos.

Sin embargo, los resultados también indican que cuando las restricciones son demasiado rígidas, la asignación de refuerzos se vuelve menos flexible, lo que puede generar residuos más elevados en ciertos escenarios. Además, la categoría de marineros sigue presentando la mayor variabilidad, lo que refuerza la necesidad de aplicar estrategias específicas para su asignación.

En términos generales, el modelo global con restricciones de dotación para misión representa una mejora significativa en comparación con los modelos anteriores, al garantizar una distribución más estable del personal. No obstante, su desempeño en escenarios de alta demanda o restricciones demasiado estrictas podría optimizarse mediante ajustes adicionales en los criterios de limitación de la dotación final.

7 CONCLUSIONES

El presente estudio ha abordado el problema de la determinación óptima de la dotación de refuerzo en los BAM de la Armada, aplicando modelos matemáticos basados en mínimos cuadrados con restricciones. A lo largo del desarrollo del trabajo, se han explorado diferentes metodologías para evaluar y aproximar la asignación del personal en función de la disponibilidad operativa y las necesidades de misión. A través de la simulación de escenarios y el análisis cuantitativo de los resultados obtenidos, se han podido identificar tendencias y patrones que podrían mejorar la planificación de la dotación de los buques en distintos contextos.

Los hallazgos obtenidos podrían aportar conocimiento teórico sobre la aplicación de modelos de optimización en la gestión de personal, y también evidenciar la importancia de considerar múltiples factores en la planificación de estas dotaciones. Si bien este estudio tiene un carácter exploratorio, sus resultados podrían servir como base para futuras investigaciones, proporcionando una herramienta para un análisis general y optimización de la asignación de efectivos en unidades navales.

7.1 Aportaciones del estudio

Este trabajo ha supuesto una primera y básica contribución en el ámbito de la optimización de recursos humanos en la Armada, abordando un problema recurrente en la gestión de la dotación a bordo de los buques. En primer lugar, se ha desarrollado un modelo matemático basado en mínimos cuadrados con restricciones que permite estimar de manera aproximada la cantidad óptima de personal adicional requerido en función de la probabilidad de navegación y la disponibilidad real de efectivos.

Además, se han explorado distintos enfoques de optimización, desde la resolución independiente por categoría hasta modelos globales con restricciones operativas, evaluando la efectividad de cada método en diferentes escenarios de navegación. El análisis comparativo entre estos enfoques ha permitido identificar cuáles son más adecuados en función de las condiciones operativas y la disponibilidad de datos históricos.

Otro de los aportes de este estudio ha sido que la probabilidad de navegación influye directamente en la asignación de efectivos, optimizando la distribución del personal disponible en función de la actividad real de cada buque.

Finalmente, el estudio ha puesto en manifiesto la necesidad de contar con una base de datos más amplia y precisa para mejorar la eficacia de los modelos de optimización. La disponibilidad de registros detallados sobre la dotación y la operatividad de los buques permitiría refinar los cálculos y mejorar la calidad de las estimaciones en la planificación operativa.

7.2 Resumen de hallazgos

Los resultados obtenidos han permitido extraer una serie de conclusiones de sobre la gestión de la dotación de refuerzo en los BAM, el principal buque objeto de estudio. En primer lugar, se ha determinado que el modelo de optimización responde de manera adecuada a variaciones en la probabilidad de navegación, ajustando la cantidad de refuerzos asignados a cada buque en función de su actividad operativa. No obstante, en escenarios donde la probabilidad de navegación es extremadamente baja, el modelo tiende a reducir el refuerzo en exceso, lo que podría afectar, en un entorno real, a la capacidad operativa de ciertos buques.

Por otro lado, el análisis de la dotación ideal demandante ha mostrado que los modelos, ante un incremento significativo, genera una necesidad adicional de refuerzos, lo que, en numerosos casos, deriva en soluciones que superan la capacidad disponible de personal y, en términos de habitabilidad, de espacio físico en buques. Esto, demuestra la importancia de establecer umbrales realistas de dotación ideal, evitando generar demandas imposibles de satisfacer.

Otro aspecto para tener en cuenta es la sensibilidad del modelo a la calidad de los datos históricos. Se ha comprobado que pequeñas variaciones en los datos de entrada pueden modificar significativamente la asignación de refuerzos, lo que muestra la necesidad de contar con registros cuanto más precisos y actualizados. La ausencia de datos históricos completos limita la capacidad del modelo para ofrecer soluciones reales en los escenarios que desarrollan su actividad los buques.

Por último, tras comparar los distintos modelos desarrollados, se concluye que el modelo global con restricciones de misión es el más realista. A pesar de que el resto de los modelos independientes o globales sin restricciones cuantifican de manera general una dotación de refuerzo prácticamente igual a la del modelo global con restricciones de misión, la imposición de esos límites definidos garantiza que la dotación final se mantenga dentro de los márgenes operativos requeridos. Esto, se ajusta a las necesidades reales del buque sin sobredimensionar el refuerzo y sin sobrepasar los límites de habitabilidad existentes.

7.3 Líneas futuras

Este Trabajo Fin de Grado ha propuesto un modelo matemático de optimización para calcular la dotación de refuerzo en buques de la Armada, centrado en los BAM. A partir de esta base, se identifican varias líneas futuras que permitirían ampliar, perfeccionar y aplicar con mayor profundidad el modelo desarrollado:

- **Mejora y expansión del modelo actual**

Una de las principales áreas de mejora radica en la integración de un mayor número de variables que influyen en la necesidad real de refuerzo. Actualmente, el modelo se apoya en la probabilidad de navegación y en la diferencia entre dotación ideal y real, pero podría enriquecerse incorporando factores como la rotación esperada de personal, la duración de las misiones, la diferenciación de destinos dentro de un buque o la carga de trabajo por puesto. Del mismo modo, se podrían incluir restricciones adicionales sobre la proporción mínima de efectivo por categoría para asegurar una distribución operativamente viable.

- **Incorporación de aspectos económicos**

El modelo podría evolucionar hacia un sistema de optimización multiobjetivo que no solo minimice el desfase entre dotación ideal y real, sino también el coste asociado a los refuerzos. Esto permitiría ponderar los beneficios operativos frente a los recursos económicos disponibles, y ofrecer soluciones que equilibren seguridad, eficiencia y sostenibilidad presupuestaria.

- **Desarrollo de un sistema semidinámico de planificación**

Aunque la realidad operativa de la Armada no permite modificar la dotación con total flexibilidad, sí sería viable implementar una versión semidinámica del modelo que se actualice periódicamente, por ejemplo, de forma trimestral, integrando datos nuevos sobre disponibilidad de personal y planificación de misiones. Esto permitiría una adaptación progresiva del refuerzo a lo largo del año, sin requerir un sistema de ajuste continuo.

- **Aplicación del modelo a otras unidades navales**

El modelo, aunque validado con datos de la clase Meteoro, es adaptable a otros buques de la Armada. Una línea de trabajo futura consistiría en recopilar información operativa de diferentes clases de unidades para evaluar su viabilidad y ajustar el modelo a las características propias de cada una.

- **Análisis empírico del impacto del refuerzo sobre la operatividad**

Una línea de investigación complementaria sería analizar cómo influyen diferentes niveles de refuerzo en indicadores reales de rendimiento operacional, como número de misiones completadas, incidencias, niveles de fatiga, etc. Esto permitiría validar el modelo no solo desde una perspectiva matemática, sino también desde su impacto real en la eficacia de la unidad.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Seguí Gómez de Olea, «El futuro de las dotaciones en los buques de la armada: STATU QUO, optimización o dotaciones múltiples», *Rev. Gen. Mar.*, vol. 279, n.º 5, pp. 989-996, 2020.
- [2] J. L. Labat, «VOX presenta el Proyecto Fénix para especializar a pilotos aéreos en emergencias y “relanzar el aeropuerto de Huesca”», VOX. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.voxespana.es/noticias/vox-presenta-el-proyecto-fenix-para-especializar-a-pilotos-aereos-en-emergencias-y-relanzar-el-aeropuerto-de-huesca-20241127?provincia=huesca-teruel-zaragoza>
- [3] «From Minimal to Optimal | Proceedings - July 2011 Vol. 137/7/1,301». Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2011/july/minimal-optimal>
- [4] «Features». Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.usff.navy.mil/Press-Room/News-Stories/Features/>
- [5] E. L. R. S.A.S, «Investigadores chinos desarrollan modelo IA para uso militar usando Llama de Meta», *Diario La República*. Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/globoeconomia/investigadores-chinos-desarrollan-modelo-ia-para-uso-militar-usando-llama-de-meta-3990085>
- [6] E. McLaren, «FDRA - Fuerza Naval: US Navy vs Armada del ELP: Cómo pueden enfrentar la amenaza china», *FDRA - Fuerza Naval*. Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://fdra-naval.blogspot.com/2020/12/us-navy-vs-armada-del-elp-como-pueden.html>
- [7] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, *Real Decreto 285/2002, de 22 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1561/1995, de 21 de septiembre, sobre jornadas especiales de trabajo, en lo relativo al trabajo en la mar*, vol. BOE-A-2002-6472. 2002, pp. 13007-13015. Accedido: 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2002/03/22/285>
- [8] Ministerio de Comercio, *Orden de 14 de julio de 1964 por la que se fija el cuadro indicador de tripulaciones mínimas para buques mercantes y de pesca*, vol. BOE-A-1964-12700. 1964, pp. 9178-9181. Accedido: 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.boe.es/eli/es/o/1964/07/14/\(1\)](https://www.boe.es/eli/es/o/1964/07/14/(1))
- [9] I. B. Lamarca, «ANÁLISIS DE LA REGULACIÓN ACTUAL EN LA MARINA MERCANTE ESPAÑOLA».
- [10] «Patrulleros-Historia de los BAM - Patrulleros», Navantia. Accedido: 2 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.navantia.es/es/lineas-de-negocio/patrulleros/historia-bam/>
- [11] A. Palacios, «Un buque español de acción marítima vigilará la costa occidental de África», *El Debate*. Accedido: 23 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.eldebate.com/espana/defensa/20240902/buque-espanol-accion-maritima-vigilara-costa-occidental-africa_223921.html

- [12] D. del Hierro López, P. Carrasco Pena (advisor), y G. Conzález-Cela Echevarría, «Buques de acción marítima (BAM): análisis de mejoras contra amenazas asimétricas, en operaciones SAR de grupo naval de flota», abr. 2022, Accedido: 2 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/644>
- [13] «Transporte marítimo - Atlas Nacional de España». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://atlasnacional.ign.es/wane/Transporte_mar%C3%ADtimo
- [14] «EL IMPACTO ECONÓMICO DEL SECTOR MARÍTIMO ESPAÑOL. PRODUCCIÓN EFECTIVA, VALOR AÑADIDO Y EMPLEO».
- [15] «Transporte y autopistas del mar en la Unión Europea», AECR. Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aecr.org/es/transporte-y-autopistas-del-mar-en-la-union-europea/>
- [16] «Delincuencia marítima». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.interpol.int/es/Delitos/Delincuencia-maritima>
- [17] «Zona económica exclusiva de España», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 5 de marzo de 2025. Accedido: 23 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Zona_econ%C3%B3mica_exclusiva_de_Espa%C3%B1a&oldid=165870941
- [18] «Navantia bota el Buque de Acción Marítima Audaz para la Armada Española», Navantia. Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.navantia.es/es/actualidad/notas-prensa/navantia-bota-el-buque-de-accion-maritima-audaz-para-la-armada-espanola/>
- [19] «Zona económica exclusiva de España», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 14 de enero de 2025. Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Zona_econ%C3%B3mica_exclusiva_de_Espa%C3%B1a&oldid=164769787
- [20] «Golfo de Guinea: una misión estratégica de la Armada», ABC Blogs. Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://abcblogs.abc.es/tierra-mar-aire/espana/golfo-de-guinea-una-mision-estrategica-de-la-armada.html>
- [21] «Diplomacia de la Defensa y Seguridad Cooperativa - Ministerio de Defensa de España». Accedido: 3 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://working.mde.es/misiones/en_exterior/actuales/listado/diplomacia-defensa.html
- [22] «Metodologia_de_Cuarteles_de_la_PDI.pdf». Accedido: 4 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://sni.gob.cl/storage/docs/Metodologia_de_Cuarteles_de_la_PDI.pdf
- [23] «optimizacion-bajo-incertidumbre-universidad-pontificia-comillas-cap-muestra-pdf.pdf». Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://tienda.comillas.edu/pub/media/catalog/product/optimizacion-bajo-incertidumbre-universidad-pontificia-comillas-cap-muestra-pdf.pdf?srsltid=AfmBOoplbnCNO7bCqXd0Z19o_elwuSBx9-qaMC8K7kj32fbLNsmhD5J
- [24] «163210_El_factor_humano_en_la_gestion_operacional_del_buque.pdf». Accedido: 4 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/355615/163210_El_factor_humano_en_la_gestion_operacional_del_buque.pdf?sequence=1
- [25] S. P. Soler, «LA ARMADA HACIA EL FUTURO: IDEAS PARA UNA SINGLADURA».

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El desarrollo e implementación del modelo de optimización propuesto no solo tiene implicaciones técnicas, sino que también repercute en ámbitos sociales, económicos y ambientales. Desde el punto de vista social, la adecuada determinación de la dotación de refuerzo en los buques puede favorecer un entorno de trabajo más equilibrado. La distribución óptima del personal contribuye a reducir la sobrecarga laboral, la fatiga y el estrés entre la tripulación, lo que se traduce en una mayor seguridad operativa y en un mejor bienestar de los efectivos [24]. Una dotación que se ajuste de manera precisa a las necesidades operativas posibilita que se asignen tareas de forma equilibrada, minimizando la posibilidad de errores humanos y favoreciendo la cohesión y la moral del equipo.

En cuanto a las implicaciones económicas, el modelo contribuye a optimizar el uso de los recursos humanos. Al evitar tanto que la dotación este por debajo de los mínimos, que puede comprometer la eficacia de la operación y aumentar los riesgos asociados a la seguridad, como el sobredimensionamiento, que genera costos salariales, de formación y logísticos innecesarios, se logra un aprovechamiento más eficiente del presupuesto destinado a la gestión de personal [7], [8], [25]. Esta racionalización de los recursos se traduce en una reducción de gastos operativos y en una asignación más adecuada de las partidas presupuestarias, lo que es esencial en entornos donde la contención de costos es un requisito estratégico.

Por último, aunque las implicaciones ambientales pueden considerarse indirectas, la optimización de los procesos operativos también incide en la sostenibilidad ambiental. Una tripulación que opera de manera coordinada y con niveles de personal ajustados a las necesidades reales permite implementar protocolos operativos que, entre otros beneficios, favorecen el ahorro energético. Por ejemplo, en situaciones de baja actividad, la correcta asignación de personal puede facilitar la activación de modos de operación de bajo consumo, reduciendo el desgaste de los sistemas y minimizando emisiones innecesarias [1]. Además, la mejora en la eficiencia operativa contribuye a optimizar el uso de insumos y recursos, lo que se alinea con políticas de sostenibilidad y responsabilidad medioambiental.

En conclusión, la aplicación del modelo de optimización y simulación en la determinación de dotaciones de refuerzo no solo mejora la operatividad de los buques, sino que también aporta beneficios en términos sociales, al promover un ambiente de trabajo más seguro y equilibrado; económicos, al racionalizar los recursos y evitar gastos superfluos; y ambientales, al favorecer el uso eficiente de la energía y otros recursos.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La aplicación de modelos matemáticos para optimizar la dotación de refuerzo en los buques de la Armada puede mejorar la eficiencia operativa, pero también plantea cuestiones éticas y sociales que es importante abordar de manera clara y sencilla [24].

Por un lado, es fundamental recordar que la automatización en la asignación de personal debe servir de apoyo a la toma de decisiones humanas, no sustituirla. Los algoritmos pueden procesar datos y sugerir ajustes, pero el juicio y la experiencia del personal son esenciales para entender situaciones complejas y atípicas [24].

Del mismo modo, la presión para reducir costos y maximizar la eficiencia puede llevar a decisiones que afecten el bienestar de la tripulación. Una dotación demasiado ajustada podría implicar jornadas de trabajo más intensas o condiciones que pongan en riesgo la seguridad y la salud de los efectivos. Por ello, es necesario encontrar un equilibrio en el que se optimicen los recursos sin sacrificar la calidad de vida ni la seguridad de quienes operan a bordo [7], [8] [25].

Finalmente, la transparencia en el proceso de optimización es clave. Las decisiones basadas en datos deben ser comprensibles y estar abiertas a revisión, permitiendo que todos los involucrados conozcan los criterios utilizados para asignar los refuerzos [23]. La participación de expertos y de la propia tripulación en la evaluación de estos métodos contribuye a que se tengan en cuenta aspectos humanos y éticos esenciales [24].

Aunque la optimización de la dotación puede aportar grandes beneficios en términos de eficiencia, es fundamental reflexionar sobre sus implicaciones éticas y sociales. Un enfoque equilibrado combina la tecnología con la experiencia humana, asegurando que las mejoras operativas se alcancen sin comprometer el bienestar y la seguridad de quienes hacen posible la misión [7], [24].

ANEXO III: CÓDIGOS MATLAB

Código Resolución independiente

%% 1. Parámetros y Datos Históricos

```

% Dotación histórica por barco para cada categoría (4 barcos).
dotacionOficiales = [5; 6; 7; 5];      % N° Oficiales
dotacionSuboficiales = [6; 7; 9; 6];  % N° Suboficiales
dotacionMarineros = [22; 25; 27; 24]; % N° Marineros
% Calculamos los promedios de dotación para cada categoría.
promedioOficiales = mean(dotacionOficiales);
promedioSuboficiales = mean(dotacionSuboficiales);
promedioMarineros = mean(dotacionMarineros);
% Usamos los promedios para calcular la diferencia necesaria en cada categoría, comparando la dotación ideal
demandante con el promedio actual, sin tener que manejar tres variables separadas. Es un vector columna.
promedios = [promedioOficiales; promedioSuboficiales; promedioMarineros];
% Dotación ideal demandante máxima para escenarios.
dotacionIdealDemandante = [7; 11; 34];
% Mínimos necesarios para navegar con seguridad; vector columna con Oficiales, Suboficiales y Marineros.
minimosNavegacion = [5; 6; 22];
% Calculamos el porcentaje de distribución del refuerzo para cada categoría; será una ponderación que
utilizaremos posteriormente.
porcentaje = (dotacionIdealDemandante - minimosNavegacion) / sum(dotacionIdealDemandante -
minimosNavegacion);
% Aseguramos que es un vector columna (3x1)
porcentaje = porcentaje(:);
% Vector de probabilidad de navegación por barco (4 barcos)
probabilidadNavegacion = [0.47; 0.24; 0.37; 0.34];
%% 2. Optimización por Categoría (individualmente)
MEDIA + PONDERACION (C) * X – OBJETIVO(Diferencia ideal)(d), es decir:
dotFin=prom + [(porcentaje*probnaveg)*x] se aproxime a difNecesaria
% Para cada categoría i se define:
% vectorPonderacion_i = porcentaje(i) * probabilidadNavegacion (vector 4x1) [NUESTRO C]
% vectorObjetivo_i = diferenciaNecesaria(i) * ones(4,1) [NUESTRO d]
% Se resuelve el problema: %  $\min_{\{x_i \geq 0\}}$ 
|| vectorPonderacion_i * xi - vectorObjetivo_i ||^2
% Inicializamos vectores para almacenar el factor de refuerzo y el refuerzo promedio:
xOptimo = zeros(3,1);
% Cada elemento de este vector representará el factor de refuerzo (la solución escalada) que se obtendrá para
cada categoría.
refuerzoPromedio = zeros(3,1);
% Vector que almacenará, para cada categoría, el valor promedio del refuerzo aplicado a los 4 barcos.
dotacionFinal = zeros(3,1); % Dotación final (promedio + refuerzo) por categoría.
residuo = zeros(3,1); % Residuo (norma del error) para cada categoría
% INICIALIZAMOS BUCLE PARA CADA CATEGORÍA
for i = 1:3
    % Diferencia necesaria en la categoría i
    diferenciaNecesaria = dotacionIdealDemandante(i) - promedios(i);
    % Vector de ponderación: multiplicamos el valor escalar de porcentaje(i) por cada elemento del vector de
    probabilidad de navegación.
    vectorPonderacion = porcentaje(i) * probabilidadNavegacion;
    % Vector 4x1 [NUESTRO C]

```

% Se toma el valor de porcentaje(i), que es un escalar que indica la ponderación asignado a la categoría, y se multiplica por cada elemento del vector probabilidadNavegacion (que tiene 4 elementos, uno por cada barco). El resultado es un vector columna (4x1) donde cada elemento refleja la ponderación que se aplicará en ese barco para la categoría.

% Vector objetivo: replicamos la diferencia necesaria en 4 elementos.

```
vectorObjetivo = diferenciaNecesaria * ones(4,1); % [NUESTRO d]
```

%La variable diferenciaNecesaria es un escalar que representa cuánto se necesita aumentar la dotación en la categoría i. Se multiplica por

un vector columna de 4 elementos (todos unos) para replicar ese valor en cada posición. Así se obtiene un vector de 4x1 donde cada elemento

es la diferencia necesaria; este será el vector que se intenta alcanzar mediante el refuerzo en cada barco.

% Resolvemos el problema de mínimos cuadrados para hallar xi

% Se impone la restricción: $x_i \geq 0$

```
xOptimo(i) = lsqmin(vectorPonderacion, vectorObjetivo, [], [], [], [], 0, Inf); %Solo está definido cota sup e inf
```

%Se busca el valor escalar xi que minimice la diferencia entre vectorPonderacion * xi y vectorObjetivo.

% Calculamos el residuo como la norma de (vectorPonderacion * xOptimo(i) - vectorObjetivo)

```
residuo(i) = norm(vectorPonderacion * xOptimo(i) - vectorObjetivo);
```

%norm, para un vector, devuelve la norma 2 (norma Euclidiana), que es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de sus elementos.

% Calculamos el refuerzo para cada barco en la categoría i:

% Cada elemento: (porcentaje(i) * probabilidadNavegacion(j)) * xOptimo(i)

```
refuerzoPorBarco = vectorPonderacion * xOptimo(i); % Vector 4x1
```

%Esto significa que para cada barco j se asigna un refuerzo diferente, dependiendo de su probabilidad de navegación.

% Promediamos el refuerzo de los 4 barcos para obtener un valor representativo

```
refuerzoPromedio(i) = mean(refuerzoPorBarco);
```

% Dotación final para la categoría i

```
dotacionFinal(i) = promedios(i) + refuerzoPromedio(i);
```

end

%% 3. Mostrar Resultados

```
fprintf('--- Resultados por Categoría ---\n');
```

% Encabezado con columnas alineadas

```
fprintf('%-14s %12s %20s %20s %18s %16s\n', ...
```

```
'Categoría', 'Promedio', 'Ideal Demandante', 'Refuerzo Promedio', 'Dotación Final', 'Residuo Aprox' );
```

```
categorias = {'Oficiales','Suboficiales','Marineros'};
```

```
for i = 1:3
```

```
    fprintf('%-14s %8.0f %16.0f %19.2f %21.0f %18.4f\n', ...
```

```
        categorias{i}, ...
```

```
        round(promedios(i)), ...
```

```
        round(dotacionIdealDemandante(i)), ...
```

```
        refuerzoPromedio(i), ...
```

```
        round(dotacionFinal(i)), ...
```

```
        residuo(i));
```

end

Código Resolución independiente localizado

%% 1. Parámetros y Datos

% Generamos datos aleatorios enteros para cada categoría en 4 barcos. (Usamos randi para obtener números enteros en rangos).

randi genera una matriz (vector columna) de 4 filas.

```
datosOficiales = randi([5, 7], 4, 1); % N° Oficiales entre 5 y 7
```

```

datosSuboficiales = randi([6, 9], 4, 1); % N° Suboficiales entre 6 y 9
datosMarineros = randi([22, 27], 4, 1); % N° Marineros entre 22 y 27
% Se agrupan los promedios en una matriz de 3x4:
% filas: categorías (1: Oficiales, 2: Suboficiales, 3: Marineros)
% columnas: Barco (Barco 1, Barco 2, Barco 3, Barco 4)
promedios = [datosOficiales'; datosSuboficiales'; datosMarineros'];
% Dotación ideal demandante máxima para escenarios.
dotacionIdealDemandante = [7; 11; 34];
% Mínimos necesarios para navegar con seguridad (Oficiales, Suboficiales, Marineros)
minimosNavegacion = [5; 6; 22];
% Calculamos el porcentaje de distribución del refuerzo para cada categoría
porcentaje = (dotacionIdealDemandante - minimosNavegacion) / sum(dotacionIdealDemandante -
minimosNavegacion);
porcentaje = porcentaje(:); % Aseguramos que es un vector columna (3x1)
% Vector de probabilidad de navegación por barco (4 barcos)
probabilidadNavegacion = [0.47; 0.24; 0.37; 0.34];
%% 2. Optimización por Categoría y barco
% Se calculará, para cada categoría y para cada uno de los 4 barco,
un factor de refuerzo x que al aplicarse permita cubrir la diferencia necesaria:
% Para cada categoría i y barco j:
    diferenciaNecesaria = dotacionIdealDemandante(i) - promedio(i,j)
% Se define:
vectorPonderacion_i = porcentaje(i) * probabilidadNavegacion (vector 4x1)
% vectorObjetivo_i = diferenciaNecesaria * ones(4,1) (vector 4x1)
%Dado que diferenciaNecesaria se recalcula en cada iteración del bucle j, el valor del vectorObjetivo variará de
un barco a otro, pero dentro de cada barco, los 4 elementos serán iguales.
% Se resuelve el problema:
    min_{x_i,j} {x_i,j >= 0}
|| vectorPonderacion_i * x_i,j - vectorObjetivo_i ||^2
% Los resultados se almacenan en matrices de dimensión 3x4.
% Inicializamos matrices para almacenar resultados
xOptimo = zeros(3,4); % Factor de refuerzo óptimo para cada categoría y barco
refuerzoPromedio = zeros(3,4); % Refuerzo promedio para cada categoría y barco
dotacionFinal = zeros(3,4); % Dotación final para cada categoría y barco
residuo = zeros(3,4); % Residuo para cada categoría y barco
%INICIALIZAMOS BUCLE PARA CADA CATEGORÍA
for i = 1:3 % Para cada categoría
    for j = 1:4 % Para cada uno de los 4 barco
        % Calculamos la diferencia necesaria en la categoría i, barco j:
        diferenciaNecesaria = dotacionIdealDemandante(i) - promedios(i,j);
% Vector de ponderación: multiplicamos porcentaje(i) por el vector de probabilidad
        vectorPonderacion = porcentaje(i) * probabilidadNavegacion;
% Vector 4x1
% Vector objetivo: replicamos la diferencia necesaria en 4 elementos
        vectorObjetivo = diferenciaNecesaria * ones(4,1);
% Resolvemos el problema de mínimos cuadrados:
        xOptimo(i,j) = lsqin(vectorPonderacion, vectorObjetivo, [], [], [], 0, Inf);
% Calculamos el refuerzo para cada barco:
        refuerzoPorBarco = vectorPonderacion * xOptimo(i,j); % Vector 4x1
% Sacamos promedio del refuerzo para obtener un valor de ponderación
        refuerzoPromedio(i,j) = mean(refuerzoPorBarco);
% Calculamos la dotación final
        dotacionFinal(i,j) = promedios(i,j) + refuerzoPromedio(i,j);

```

```

% Calculamos el residuo para la categoría i y barco j
    residuo(i,j) = norm(vectorPonderacion * xOptimo(i,j) - vectorObjetivo);
end
end
%% 3. Mostrar Resultados
fprintf('--- Resultados por Categoría y Barco ---\n');
fprintf('Categoría   Barco   Promedio   Ideal Demandante   Refuerzo Promedio   Dotación Final
Residuo\n');
categorias = {'Oficiales','Suboficiales','Marineros'};
for i = 1:3
    for j = 1:4
        fprintf('%-14s %d %4d %8d %6.2f %6.0f %2.4f\n', ...
            categorias{i}, j, promedios(i,j), dotacionIdealDemandante(i), refuerzoPromedio(i,j), dotacionFinal(i,j),
            residuo(i,j));
        end
        fprintf('\n');
    end
end

```

Código Modelo global con promedio unificado

```

%% 1. Parámetros y Datos Históricos
% Datos históricos para cada categoría (un solo promedio calculado)
dotacionOficiales = [5; 6; 7; 5];
dotacionSuboficiales = [6; 7; 9; 6];
dotacionMarineros = [22; 25; 27; 24];
promedioOficiales = mean(dotacionOficiales);
promedioSuboficiales = mean(dotacionSuboficiales);
promedioMarineros = mean(dotacionMarineros);
% Vector de promedios (3x1)
promedios = [promedioOficiales; promedioSuboficiales; promedioMarineros];
% Dotación ideal y mínimos
dotacionIdealDemandante = [7; 11; 34];
minimosNavegacion = [5; 6; 22];
% Calculamos porcentaje de refuerzo para cada categoría (3x1)
porcentaje = (dotacionIdealDemandante - minimosNavegacion) / sum(dotacionIdealDemandante -
minimosNavegacion);
% Probabilidad de navegación (4 barcos)
probabilidadNavegacion = [0.47; 0.24; 0.37; 0.34]; % (4x1)
%% 2. Construimos el Sistema Global (3 categorías x 4 barcos = 12 ecuaciones)
nCategorias = 3;
nBarcos = 4;
C = zeros(nCategorias* nBarcos , nCategorias);
%C: Es una matriz de coeficientes de dimensiones 12x3. Cada una de las 12 filas representa una ecuación
(una para cada combinación de categoría y barco) y cada una de las 3 columnas corresponde a la variable de
refuerzo asociada a cada categoría.
d = zeros(nCategorias* nBarcos , 1);
%d: Es un vector columna de dimensión 12x1 que contendrá, para cada una de las 12 ecuaciones, el término
independiente (o la diferencia necesaria) correspondiente a la dotación ideal menos el promedio para esa
categoría.
fila = 0;
for i = 1:nCategorias
    % Diferencia necesaria para la categoría i (valor único)

```

```

d_i = dotacionIdealDemandante(i) - promedios(i);
%Representa la diferencia necesaria entre el valor ideal y el valor promedio. Es decir, cuánto debe ajustarse
cada categoría para alcanzar el objetivo.
%d_i representa la diferencia entre el valor ideal y el valor actual de cada categoría. Esta diferencia se usa en
el vector d(fila), que se repite en cada período para que el modelo de mínimos cuadrados intente minimizar esa
diferencia.
for j = 1: nBarcos
    fila = fila + 1;
% En cada ecuación, la única columna con valor es la de la categoría i, con esto cada ecuación representa
únicamente la relación para una categoría específica y no involucra a las otras categorías.
%En la fila 'fila', solo la columna i tiene valor:
    C(fila, i) = probabilidadNavegacion(j) * porcentaje(i);
    % Cada ecuación tiene como objetivo la diferencia necesaria
    d(fila) = d_i;
end
end

```

%% 3. Resolvemos el Problema de Mínimos Cuadrados Conjunto

```

% Resolver:  $\min || C*x - d ||^2$  con  $x \geq 0$ 
lb = [0; 0; 0]; % Restricción:  $x_1, x_2, x_3 \geq 0$ 
x = lsqlin(C, d, [], [], [], [], lb, []);
residuoGlobal = norm(C*x - d);
fprintf('Residuo de mínimos cuadrados global: %.4f\n', residuoGlobal);

```

%% 4. Calculamos Refuerzo, Dotación Final y Residuo Local por Categoría y Barco

```

% Para presentar los resultados con 4 barcos, se replican los promedios e ideales.
promediosRepetidos = repmat(promedios, 1, nBarcos); %3x4
idealRepetidos = repmat(dotacionIdealDemandante, 1, nBarcos);
% 3x4
%Se usa la función repmat para replicar el vector promedios a lo largo de las columnas. Dado que promedios
es un vector columna 3x1 y nBarcos es 4, esta línea genera una matriz de dimensión 3x4 en la que cada
columna es una copia del vector promedios.
% Esto se utiliza para poder mostrar o trabajar con los promedios como si fueran valores distintos para cada
uno de los 4 barcos, aunque en realidad el promedio de cada categoría es único.
% Inicializamos matrices para refuerzo, dotación final y residuo local
refuerzoGlobal = zeros(nCategorias, nBarcos);
dotacionFinalGlobal = zeros(nCategorias, nBarcos);
residuoLocal = zeros(nCategorias, nBarcos);
for i = 1:nCategorias
    % Diferencia necesaria para la categoría i
    d_i = dotacionIdealDemandante(i) - promedios(i);
    for j = 1: nBarcos
        % Calculamos el refuerzo para cada barco:
        % refuerzo = (probabilidadNavegacion(j) * porcentaje(i)) * x(i)
        refuerzoGlobal(i,j) = (probabilidadNavegacion(j) * porcentaje(i)) * x(i);
        % Dotación final = promedio + refuerzo
        dotacionFinalGlobal(i,j) = promediosRepetidos(i,j) + refuerzoGlobal(i,j);
    % Calculamos el residuo local como la diferencia (valor absoluto)entre el refuerzo calculado y la diferencia
necesaria d_i
        residuoLocal(i,j) = abs(refuerzoGlobal(i,j) - d_i);
    end
end

```

%% 5. Mostramos Resultados

```

fprintf('\n--- Dotacion Final por Categoría y Barco ---\n');

```

```
fprintf('Categoría Barco Promedio Ideal Demandante Refuerzo Dotacion Final Residuo\n');
nombresCategorias = {'Oficiales','Suboficiales','Marineros'};
for i = 1:nCategorias
    for j = 1:nBarcos
        fprintf('%-14s %2d %2.0f %10.0f %5.2f %3.0f %8.4f\n', ...
            nombresCategorias{i}, ...
            j, ...
            round(promediosRepetidos(i,j)), ...
            idealRepetidos(i,j), ...
            refuerzoGlobal(i,j), ...
            round(dotacionFinalGlobal(i,j)), ...
            residuoLocal(i,j));
    end
end
fprintf('\n');
end
```

Código Modelo global con datos localizados

%% 1. Parámetros y Datos Históricos

```
% Generamos datos históricos aleatorios enteros para cada categoría en 4 barcos
datosOficiales = randi([5, 7], 4, 1); % N° Oficiales entre 5 y 7 (4 barcos)
datosSuboficiales = randi([6, 9], 4, 1); % N° Suboficiales entre 6 y 9 (4 barcos)
datosMarineros = randi([22, 27], 4, 1); % N° Marineros entre 22 y 27 (4 barcos)
% Agrupamos los datos en una matriz de 3x4:
% Filas: categorías (1: Oficiales, 2: Suboficiales, 3: Marineros)
% Columnas: Barcos (Barco 1,... )
promedios = [datosOficiales'; datosSuboficiales'; datosMarineros'];
% Dotación ideal demandante para escenarios (por ejemplo, Alta Seguridad)
dotacionIdealDemandante = [7; 11; 34];
% Mínimos necesarios para navegar con seguridad (Oficiales, Suboficiales, Marineros)
minimosNavegacion = [5; 6; 22];
% Calculamos el porcentaje de distribución del refuerzo para cada categoría:
% porcentaje = (dotacionIdealDemandante - minimosNavegacion) / sum(dotacionIdealDemandante -
minimosNavegacion)
porcentaje = (dotacionIdealDemandante - minimosNavegacion) / sum(dotacionIdealDemandante -
minimosNavegacion);
porcentaje = porcentaje(:); % Aseguramos que es un vector columna (3x1)
% Vector de probabilidad de navegación por barco (4 barcos)
probabilidadNavegacion = [0.47; 0.24; 0.37; 0.34];
```

%% 2. Construimos la Matriz de Diseño y el Vector Objetivo Global

```
% Se busca minimizar || MatrizDiseno*x - VectorObjetivoGlobal ||^2, donde x = [ x1; x2; x3 ] es el factor de
refuerzo para cada categoría.
% Cada una de las 3 categorías y cada uno de los 4 barcos aporta una ecuación, dando un total de 12
ecuaciones.
nCategorias = 3; % 1: Oficiales, 2: Suboficiales, 3: Marineros
nBarcos = 4; % 4 barcos
C = zeros(nCategorias*nBarcos, nCategorias); % 12x3
d = zeros(nCategorias*nBarcos, 1); % 12x1
fila = 0;
%Inicializamos la variable "fila" en 0. Esta variable se utiliza como contador para llevar la cuenta de las filas en
la construcción de la matriz de diseño y del vector objetivo.
for i = 1:nCategorias % Para cada categoría
```

```

    for j = 1: nBarcos      % Para cada barco
        fila = fila + 1;
% En cada ecuación, la única columna con valor es la de la categoría i, con esto cada ecuación representa
% únicamente la relación para una categoría específica y no involucra a las otras categorías.
%MatrizDiseno(fila, i) = probabilidadNavegacion(j) * porcentaje(i)
        C(fila, i) = probabilidadNavegacion(j) * porcentaje(i);
% Vector objetivo: la diferencia necesaria para esa categoría y barco:
        diferencia = dotacionIdealDemandante(i) - promedios(i,j)
        d(fila) = dotacionIdealDemandante(i) - promedios(i,j);
    end
end
%% 3. Resolvemos el Problema Global de Mínimos Cuadrados
% Se busca minimizar: || MatrizDiseno*x - VectorObjetivoGlobal ||^2 con la restricción: x >= 0
limInferior = [0; 0; 0]; % x1, x2, x3 >= 0
solucionX = lsqmin(C, d, [], [], [], [], limInferior, []);
% Calculamos el residuo global
residuoGlobal = norm(C * solucionX - d);
fprintf('Residuo de mínimos cuadrados global: %.4f\n', residuoGlobal);
%% 4. Calculamos la Dotacion Final, el Refuerzo y el Residuo Local para Cada categoría y Barco
%Refuerzo:refuerzo(i,j) =(probabilidadNavegacion(j)*porcentaje(i))*solucionX(i)
%Dotacion Final: dotacionFinal(i,j) = promedios(i,j) + refuerzo(i,j)
%Residuo local: residuo(i,j) = | refuerzo(i,j) - (dotacionIdealDemandante(i) - promedios(i,j)) |
dotacionFinalGlobal = zeros(nCategorias, nBarcos);
refuerzoGlobal = zeros(nCategorias, nBarcos);
residuoLocal = zeros(nCategorias, nBarcos);
for i = 1:nCategorias
    for j = 1: nBarcos
        % Calculamos refuerzo para la categoría i y barco j
        refuerzoGlobal(i,j) = (probabilidadNavegacion(j) * porcentaje(i)) * solucionX(i);
        % Calculamos dotacion final sumando el refuerzo al promedio
        dotacionFinalGlobal(i,j) = promedios(i,j) + refuerzoGlobal(i,j);
        % Diferencia necesaria para la categoría i y barco j
        d_ij = dotacionIdealDemandante(i) - promedios(i,j);
        % Residuo local: diferencia entre el refuerzo asignado y la diferencia necesaria
        residuoLocal(i,j) = abs(refuerzoGlobal(i,j) - d_ij);
    end
end
%% 5. Mostramos Resultados Finales
fprintf('\n--- Dotacion Final por Categoría y Barco ---\n');
fprintf('Categoría   Barco   Promedio   Ideal Demandante   Refuerzo   Dotacion Final   Residuo\n');
nombresCategorias = {'Oficiales','Suboficiales','Marineros'};
for i = 1:nCategorias
    for j = 1: nBarcos
        fprintf('%-14s %2d    %3.0f    %10.0f    %7.2f    %3.0f    %8.4f\n', ...
            nombresCategorias{i}, ...
            j, ...
            round(promedios(i,j)), ...
            dotacionIdealDemandante(i), ...
            refuerzoGlobal(i,j), ...
            round(dotacionFinalGlobal(i,j)), ...
            residuoLocal(i,j));
    end
end

```

```
fprintf('\n');
end
```

Código Modelo global con restricciones misión

%% 1. Parámetros y Datos Históricos

```
% Datos históricos para cada categoría (un solo promedio calculado)
dotacionOficiales = [5; 6; 7; 5];
dotacionSuboficiales = [6; 7; 9; 6];
dotacionMarineros = [22; 25; 27; 24];
promedioOficiales = mean(dotacionOficiales);
promedioSuboficiales = mean(dotacionSuboficiales);
promedioMarineros = mean(dotacionMarineros);
% Vector de promedios (3x1)
promedios = [promedioOficiales; promedioSuboficiales; promedioMarineros];
% Dotación ideal y mínimos
dotacionIdealDemandante = [7; 11; 34];
minimosNavegacion = [5; 6; 22];
% Calculamos de porcentaje de refuerzo para cada categoría (3x1)
porcentaje = (dotacionIdealDemandante - minimosNavegacion) / sum(dotacionIdealDemandante -
minimosNavegacion);
% Probabilidad de navegación (4 barcos)
probabilidadNavegacion = [0.47; 0.24; 0.37; 0.34]; % (4x1)
```

%% 2. Construimos el Sistema Global (3 categorías x 4 barcos = 12 ecuaciones)

```
nCategorias = 3;
nBarcos = 4;
% Matriz de coeficientes (12x3). Cada fila representa una ecuación para una combinación de categoría y barco.
C = zeros(nCategorias* nBarcos, nCategorias);
% Vector objetivo (12x1). Cada ecuación busca cubrir la diferencia (ideal - promedio) para la categoría.
d = zeros(nCategorias* nBarcos, 1);
fila = 0;
for i = 1:nCategorias
    % Diferencia necesaria para la categoría i (valor único)
    d_i = dotacionIdealDemandante(i) - promedios(i);
    for j = 1: nBarcos
        fila = fila + 1;
        % Cada ecuación solo tiene valor en la columna i:
        C(fila, i) = probabilidadNavegacion(j) * porcentaje(i);
        % La diferencia a cubrir es la misma para cada barco
        d(fila) = d_i;
    end
end
```

%% 3. Incluimos Restricciones Adicionales en el Modelo Global

```
% Para cada barco, la dotación final total estará entre un mínimo y un máximo.
La dotación final en un barco j se calcula como:
%  $S_{final}(j) = S + probabilidadNavegacion(j) * (porcentaje * x)$ 
donde S es la suma de los promedios (dotación base total).
S = sum(promedios); % Dotación base total
% Definimos los totales objetivo mínimos y máximos para la misión en cada barco.
Por ejemplo, para MSO serequiere que la dotación final esté entre 42 y 44.
T_obj_min = 42; % Este valor se cambia según la misión o necesidades
T_obj_max = 46; % Este valor se cambia según la misión o necesidades
```

```

% Para cada barco j, se imponen dos restricciones:
% (a) probabilidadNavegacion(j)*(porcentaje * x) [T_obj_max - S] (Límite superior)
% (b) probabilidadNavegacion(j)*(porcentaje * x) [-(T_obj_min - S)] (Límite inferior)
Aineq = [];
bineq = [];
for j = 1: nBarcos
    % Restricción superior:
    Aineq = [Aineq; probabilidadNavegacion(j) * porcentaje];
    bineq = [bineq; T_obj_max - S];
    % Restricción inferior (multiplicamos por -1 para expresarla en forma A*x ≤ b):
    Aineq = [Aineq; - probabilidadNavegacion(j) * porcentaje];
    bineq = [bineq; -(T_obj_min - S)];
end
%% 4. Resolvemos el Problema de Mínimos Cuadrados Conjunto con Restricciones
% Se resuelve: min || C*x - d ||^2 con x ≥ 0 y con las restricciones:
% Aineq * x → bineq
lb = zeros(nCategorias, 1); % Restricción: x(i) ≥ 0
x = lsqlin(C, d, Aineq, bineq, [], [], lb, []);
fprintf('\n--- Solucion Global con Restricciones ---\n');
fprintf('x1 (Oficiales): %.2f\n', x(1));
fprintf('x2 (Suboficiales): %.2f\n', x(2));
fprintf('x3 (Marineros): %.2f\n', x(3));
residuoGlobal = norm(C*x - d);
fprintf('Residuo de minimos cuadrados global: %.4f\n', residuoGlobal);
%% 5. Calculamos Refuerzo, Dotación Final y Residuo Local por Categoría y barco
% Replicamos los promedios e ideales para 4 barcos (3x4)
promediosRepetidos = repmat(promedios, 1, nBarcos);
idealRepetidos = repmat(dotacionIdealDemandante, 1, nBarcos);
% Inicializamos matrices para resultados locales
refuerzoGlobal = zeros(nCategorias, nBarcos);
dotacionFinalGlobal = zeros(nCategorias, nBarcos);
residuoLocal = zeros(nCategorias, nBarcos);
for i = 1:nCategorias
    d_i = dotacionIdealDemandante(i) - promedios(i); % Diferencia necesaria para la categoría i
    for j = 1: nBarcos
        % Calculamos el refuerzo aplicado en el barco j para la categoria i:
        refuerzoGlobal(i,j) = (probabilidadNavegacion(j) * porcentaje(i)) * x(i);
        % Dotacion final: suma del promedio y el refuerzo
        dotacionFinalGlobal(i,j) = promediosRepetidos(i,j) + refuerzoGlobal(i,j);
        % Residuo local: diferencia entre el refuerzo asignado y la diferencia necesaria d_i
        residuoLocal(i,j) = abs(refuerzoGlobal(i,j) - d_i);
    end
end
%% 6. Mostramos Resultados en el Formato Solicitado
fprintf('\n--- Dotacion Final por Categoría y Barco ---\n');
fprintf('Categoría Barco Promedio Ideal Demandante Refuerzo Dotacion Final Residuo\n');
nombresCategorias = {'Oficiales','Suboficiales','Marineros'};
for i = 1:nCategorias
    for j = 1: nBarcos
        fprintf('%-14s %2d %2.0f %10.0f %5.2f %3.0f %8.4f\n', ...
            nombresCategorias{i}, ...
            j, ...

```

```
round(promediosRepetidos(i,j), ...  
idealRepetidos(i,j), ...  
refuerzoGlobal(i,j), ...  
round(dotacionFinalGlobal(i,j), ...  
residuoLocal(i,j));  
end  
fprintf('\n');  
end
```

ANEXO IV: DATOS OBTENIDOS MATLAB

Código Resolución independiente

Caso: CasoBase

Categoría	Promedio	Porcentaje	x_opt	RefuerzoPromedio	DotacionFinal	Residuo
{'Oficiales' }	5.75	0.10526	31.756	1.1867	6.9367	0.56269
{'Suboficiales'}	7	0.26316	40.648	3.7974	10.797	1.8006
{'Marineros' }	24.5	0.63158	40.224	9.0187	33.519	4.2764

Caso: AumentoProbTodos

Categoría	Promedio	Porcentaje	x_opt	RefuerzoPromedio	DotacionFinal	Residuo
{'Oficiales' }	5.75	0.10526	24.131	1.2066	6.9566	0.4661
{'Suboficiales'}	7	0.26316	30.888	3.861	10.861	1.4915
{'Marineros' }	24.5	0.63158	30.566	9.1698	33.67	3.5423

Caso: ReduccionProbTodos

Categoría	Promedio	Porcentaje	x_opt	RefuerzoPromedio	DotacionFinal	Residuo
{'Oficiales' }	5.75	0.10526	49.709	1.1773	6.9273	0.6028
{'Suboficiales'}	7	0.26316	63.628	3.7674	10.767	1.929
{'Marineros' }	24.5	0.63158	62.965	8.9477	33.448	4.5813

Caso: AumentoProbUnBarco

Categoría	Promedio	Porcentaje	x_opt	RefuerzoPromedio	DotacionFinal	Residuo
{'Oficiales' }	5.75	0.10526	23.173	1.1465	6.8965	0.71951
{'Suboficiales'}	7	0.26316	29.662	3.6687	10.669	2.3024
{'Marineros' }	24.5	0.63158	29.353	8.7131	33.213	5.4683

Caso: ReduccionProbUnBarco

Categoría	Promedio	Porcentaje	x_opt	RefuerzoPromedio	DotacionFinal	Residuo
{'Oficiales' }	5.75	0.10526	33.794	1.0227	6.7727	1.066

{'Suboficiales' }	7	0.26316	43.257	3.2727	10.273	3.4113
{'Marineros' }	24.5	0.63158	42.806	7.7727	32.273	8.1018

Caso: AumentoIdeal

Categoría	Promedio	Porcentaje	x_opt	RefuerzoPromedio	DotacionFinal	Residuo
{'Oficiales' }	5.75	0.11538	52.147	2.136	7.886	1.0128
{'Suboficiales' }	7	0.23077	57.941	4.7467	11.747	2.2508
{'Marineros' }	24.5	0.65385	59.304	13.765	38.265	6.5272

Caso: ReduccionIdeal

Categoría	Promedio	Porcentaje	x_opt	RefuerzoPromedio	DotacionFinal	Residuo
{'Oficiales' }	5.75	0.090909	7.354	0.23734	5.9873	0.11254
{'Suboficiales' }	7	0.27273	19.611	1.8987	8.8987	0.9003
{'Marineros' }	24.5	0.63636	18.91	4.272	28.772	2.0257

Caso: IdealMixta

Categoría	Promedio	Porcentaje	x_opt	RefuerzoPromedio	DotacionFinal	Residuo
{'Oficiales' }	5.75	0.17647	34.096	2.136	7.886	1.0128
{'Suboficiales' }	7	0.23529	34.096	2.848	9.848	1.3505
{'Marineros' }	24.5	0.58824	34.096	7.1201	31.62	3.3761

Caso: AumentoDatos

Categoría	Promedio	Porcentaje	x_opt	RefuerzoPromedio	DotacionFinal	Residuo
{'Oficiales' }	6.75	0.10526	6.3512	0.23734	6.9873	0.11254
{'Suboficiales' }	8	0.26316	30.486	2.848	10.848	1.3505
{'Marineros' }	25.5	0.63158	35.99	8.0694	33.569	3.8263

Caso: ReduccionDatos

Categoría	Promedio	Porcentaje	x_opt	RefuerzoPromedio	DotacionFinal	Residuo
{'Oficiales' }	4.75	0.10526	57.161	2.136	6.886	1.0128
{'Suboficiales' }	6	0.26316	50.81	4.7467	10.747	2.2508

{'Marineros' }	23.5	0.63158	44.459	9.9681	33.468	4.7266
----------------	------	---------	--------	--------	--------	--------

Caso: DatosContrapuestos

Categoría	Promedio	Porcentaje	x_opt	RefuerzoPromedio	DotacionFinal	Residuo
{'Oficiales' }	7.75	0.10526	0	0	7.75	1.5
{'Suboficiales'}	7	0.26316	40.648	3.7974	10.797	1.8006
{'Marineros' }	22.5	0.63158	48.693	10.917	33.417	5.1767

=== Resultados - Casos con Probabilidad 0 ===

	Barco1Averiado	UltimoBarcoAveriado	TodaLaFlotaAveriada	MitadFlotaMantenimiento
Oficiales	6.6595	6.6275	5.75	6.3739
Suboficiales	9.9104	9.8079	7	8.9964
Marineros	31.412	31.169	24.5	29.242

=== Resultados de Escenarios Extremos ===

Caso: ProbAltas

	x_opt	DotacionFinal	RefuerzoPromedio	Residuo
Oficiales	12.349	6.9979	1.2479	0.10244
Suboficiales	15.807	10.993	3.9933	0.32781
Marineros	15.642	33.984	9.484	0.77854

Caso: IdealMuyGrande

	x_opt	DotacionFinal	RefuerzoPromedio	Residuo
Oficiales	235.66	16.43	10.68	5.0642
Suboficiales	238.81	25.037	18.037	8.5529
Marineros	241.24	80.986	56.486	26.784

Caso: DatosMuyBajos

	x_opt	DotacionFinal	RefuerzoPromedio	Residuo
Oficiales	82.566	6.8354	3.0854	1.463
Suboficiales	60.972	10.696	5.696	2.7009
Marineros	61.395	33.265	13.765	6.5272

Código Resolución independiente localizado

Caso: CasoBase

	Refuerzo	DotacionFinal	Residuo
	-----	-----	-----
Oficiales P1	0.94934	6.9493	0.45015
Oficiales P2	0	7	0
Oficiales P3	0	7	0
Oficiales P4	0.94934	6.9493	0.45015
Suboficiales P1	4.7467	10.747	2.2508
Suboficiales P2	4.7467	10.747	2.2508
Suboficiales P3	4.7467	10.747	2.2508
Suboficiales P4	1.8987	10.899	0.9003
Marineros P1	7.5947	33.595	3.6012
Marineros P2	7.5947	33.595	3.6012
Marineros P3	11.392	33.392	5.4018
Marineros P4	5.696	33.696	2.7009

Caso: ProbMas

	Refuerzo	DotacionFinal	Residuo
	-----	-----	-----
Oficiales P1	0.94934	6.9493	0.45015
Oficiales P2	0	7	0
Oficiales P3	0	7	0
Oficiales P4	0.94934	6.9493	0.45015
Suboficiales P1	4.7467	10.747	2.2508
Suboficiales P2	4.7467	10.747	2.2508
Suboficiales P3	4.7467	10.747	2.2508
Suboficiales P4	1.8987	10.899	0.9003
Marineros P1	7.5947	33.595	3.6012
Marineros P2	7.5947	33.595	3.6012
Marineros P3	11.392	33.392	5.4018
Marineros P4	5.696	33.696	2.7009

Caso: ProbMenos

	Refuerzo	DotacionFinal	Residuo
--	----------	---------------	---------

Oficiales P1	0.93258	6.9326	0.5193
Oficiales P2	0	7	0
Oficiales P3	0	7	0
Oficiales P4	0.93258	6.9326	0.5193
Suboficiales P1	4.6629	10.663	2.5965
Suboficiales P2	4.6629	10.663	2.5965
Suboficiales P3	4.6629	10.663	2.5965
Suboficiales P4	1.8652	10.865	1.0386
Marineros P1	7.4607	33.461	4.1544
Marineros P2	7.4607	33.461	4.1544
Marineros P3	11.191	33.191	6.2316
Marineros P4	5.5955	33.595	3.1158

Caso: IdealMas

	Refuerzo	DotacionFinal	Residuo
Oficiales P1	1.8987	7.8987	0.9003
Oficiales P2	0.94934	7.9493	0.45015
Oficiales P3	0.94934	7.9493	0.45015
Oficiales P4	1.8987	7.8987	0.9003
Suboficiales P1	6.6454	12.645	3.1511
Suboficiales P2	6.6454	12.645	3.1511
Suboficiales P3	6.6454	12.645	3.1511
Suboficiales P4	3.7974	12.797	1.8006
Marineros P1	12.341	38.341	5.852
Marineros P2	12.341	38.341	5.852
Marineros P3	16.139	38.139	7.6526
Marineros P4	10.443	38.443	4.9517

Caso: OfiMas2

	Refuerzo	DotacionFinal	Residuo
Oficiales P1	0	8	2
Oficiales P2	0	9	4
Oficiales P3	0	9	4

Oficiales P4	0	8	2
Suboficiales P1	4.7467	10.747	2.2508
Suboficiales P2	4.7467	10.747	2.2508
Suboficiales P3	4.7467	10.747	2.2508
Suboficiales P4	1.8987	10.899	0.9003
Marineros P1	7.5947	33.595	3.6012
Marineros P2	7.5947	33.595	3.6012
Marineros P3	11.392	33.392	5.4018
Marineros P4	5.696	33.696	2.7009

==== **Resultados - Casos con Probabilidad 0** ====

	Barco1Averiado	UltimoBarcoAveriado	TodaLaFlotaAveriado	MitadFlotaMantenimiento
Oficiales	8.8422	8.7334	5.75	7.8712
Suboficiales	12.821	12.616	7	10.993
Marineros	35.778	35.381	24.5	32.236

--- **Resultados por Caso Extremo** ---

Caso: CasoBase

Categoría	Periodo	xOpt	RefuerzoProm	DotacionFinal	Residuo
Oficiales	1	25.40	0.95	6.95	0.4502
Oficiales	2	0.00	0.00	7.00	0.0000
Oficiales	3	0.00	0.00	7.00	0.0000
Oficiales	4	25.40	0.95	6.95	0.4502
Suboficiales	1	50.81	4.75	10.75	2.2508
Suboficiales	2	50.81	4.75	10.75	2.2508
Suboficiales	3	50.81	4.75	10.75	2.2508
Suboficiales	4	20.32	1.90	10.90	0.9003
Marineros	1	33.87	7.59	33.59	3.6012
Marineros	2	33.87	7.59	33.59	3.6012
Marineros	3	50.81	11.39	33.39	5.4018
Marineros	4	25.40	5.70	33.70	2.7009

Caso: ProbAltas

Categoría.	Periodo	xOpt	RefuerzoProm	DotacionFinal	Residuo
------------	---------	------	--------------	---------------	---------

Oficiales	1	9.88	1.00	7.00	0.0820
Oficiales	2	0.00	0.00	7.00	0.0000
Oficiales	3	0.00	0.00	7.00	0.0000
Oficiales	4	9.88	1.00	7.00	0.0820
Suboficiales	1	19.76	4.99	10.99	0.4098
Suboficiales	2	19.76	4.99	10.99	0.4098
Suboficiales	3	19.76	4.99	10.99	0.4098
Suboficiales	4	7.90	2.00	11.00	0.1639
Marineros	1	13.17	7.99	33.99	0.6556
Marineros	2	13.17	7.99	33.99	0.6556
Marineros	3	19.76	11.98	33.98	0.9834
Marineros	4	9.88	5.99	33.99	0.4917

Caso: IdealMuyGrande

Categoría.	Periodo	xOpt	RefuerzoProm	DotacionFinal	Residuo
Oficiales	1	230.43	10.44	16.44	4.9517
Oficiales	2	209.48	9.49	16.49	4.5015
Oficiales	3	209.48	9.49	16.49	4.5015
Oficiales	4	230.43	10.44	16.44	4.9517
Suboficiales	1	251.37	18.99	24.99	9.0030
Suboficiales	2	251.37	18.99	24.99	9.0030
Suboficiales	3	251.37	18.99	24.99	9.0030
Suboficiales	4	213.67	16.14	25.14	7.6526
Marineros	1	235.16	55.06	81.06	26.1088
Marineros	2	235.16	55.06	81.06	26.1088
Marineros	3	251.37	58.86	80.86	27.9094
Marineros	4	227.05	53.16	81.16	25.2085

Caso: HistMuyAltos

Categoría.	Periodo	xOpt	RefuerzoProm	DotacionFinal	Residuo
Oficiales	1	0.00	0.00	8.00	2.0000
Oficiales	2	0.00	0.00	9.00	4.0000
Oficiales	3	0.00	0.00	9.00	4.0000
Oficiales	4	0.00	0.00	8.00	2.0000
Suboficiales	1	20.32	1.90	10.90	0.9003
Suboficiales	2	20.32	1.90	10.90	0.9003

Suboficiales	3	20.32	1.90	10.90	0.9003
Suboficiales	4	0.00	0.00	12.00	2.0000
Marineros	1	12.70	2.85	33.85	1.3505
Marineros	2	12.70	2.85	33.85	1.3505
Marineros	3	29.64	6.65	33.65	3.1511
Marineros	4	4.23	0.95	33.95	0.4502

Código Modelo global con promedio unificado

=== **Resultados - Código 3 (Casos de Estudio Generales)** ===

Caso: CasoBase

	Refuerzo	Dotación Final	Residuo Local
Oficiales P1	1.5711	7.3211	0.32109
Oficiales P2	5.0275	12.027	1.0275
Oficiales P3	11.94	36.44	2.4403
Oficiales P4	0.80226	6.5523	0.44774
Suboficiales P1	2.5672	9.5672	1.4328
Suboficiales P2	6.0972	30.597	3.4028
Suboficiales P3	1.2368	6.9868	0.013183
Suboficiales P4	3.9578	10.958	0.042185
Marineros P1	9.3998	33.9	0.10019
Marineros P2	1.1365	6.8865	0.11347
Marineros P3	3.6369	10.637	0.36309
Marineros P4	8.6377	33.138	0.86234

Caso: ProbMas

	Refuerzo	Dotación Final	Residuo Local
Oficiales P1	1.5167	7.2667	0.26667
Oficiales P2	4.8533	11.853	0.85333
Oficiales P3	11.527	36.027	2.0267
Oficiales P4	0.90468	6.6547	0.34532
Suboficiales P1	2.895	9.895	1.105
Suboficiales P2	6.8756	31.376	2.6244
Suboficiales P3	1.2506	7.0006	0.0005848

Suboficiales P4	4.0019	11.002	0.0018713
Marineros P1	9.5044	34.004	0.0044444
Marineros P2	1.1708	6.9208	0.07924
Marineros P3	3.7464	10.746	0.25357
Marineros P4	8.8978	33.398	0.60222

Caso: ProbMenos

	Refuerzo	Dotación Final	Residuo Local
	-----	-----	-----
Oficiales P1	1.6053	7.3553	0.35526
Oficiales P2	5.1368	12.137	1.1368
Oficiales P3	12.2	36.7	2.7
Oficiales P4	0.72619	6.4762	0.52381
Suboficiales P1	2.3238	9.3238	1.6762
Suboficiales P2	5.519	30.019	3.981
Suboficiales P3	1.2231	6.9731	0.026942
Suboficiales P4	3.9138	10.914	0.086216
Marineros P1	9.2952	33.795	0.20476
Marineros P2	1.1084	6.8584	0.1416
Marineros P3	3.5469	10.547	0.45313
Marineros P4	8.4238	32.924	1.0762

Caso: IdealMas

	Refuerzo	Dotación Final	Residuo Local
	-----	-----	-----
Oficiales P1	2.828	8.578	0.57797
Oficiales P2	7.5412	14.541	1.5412
Oficiales P3	18.225	42.725	3.7247
Oficiales P4	1.4441	7.1941	0.80593
Suboficiales P1	3.8508	10.851	2.1492
Suboficiales P2	9.3062	33.806	5.1938
Suboficiales P3	2.2263	7.9763	0.023729
Suboficiales P4	5.9367	12.937	0.063277
Marineros P1	14.347	38.847	0.15292
Marineros P2	2.0458	7.7958	0.20424
Marineros P3	5.4554	12.455	0.54463

Marineros P4 13.184 37.684 1.3162

Caso: OfiMas2

	Refuerzo	Dotación Final	Residuo Local
Oficiales P1	0	7.75	0.75
Oficiales P2	5.0275	12.027	1.0275
Oficiales P3	11.94	36.44	2.4403
Oficiales P4	0	7.75	0.75
Suboficiales P1	2.5672	9.5672	1.4328
Suboficiales P2	6.0972	30.597	3.4028
Suboficiales P3	0	7.75	0.75
Suboficiales P4	3.9578	10.958	0.042185
Marineros P1	9.3998	33.9	0.10019
Marineros P2	0	7.75	0.75
Marineros P3	3.6369	10.637	0.36309
Marineros P4	8.6377	33.138	0.86234

=== Resultados - Casos con Probabilidad 0 ===

	Barco1Averiado	UltimoBarcoAveriado	TodaLaFlotaAveriado	MitadFlotaMantenimiento
Oficiales	6.6595	6.6275	5.75	6.3739
Suboficiales	9.9104	9.8079	7	8.9964
Marineros	31.412	31.169	24.5	29.242

=== Detalle de Escenarios Extremos ===

Caso: CasoBase

	Refuerzo	DotacionFinal	Residuo Local
Oficiales P1	1.5711	7.3211	0.32109
Oficiales P2	5.0275	12.027	1.0275
Oficiales P3	11.94	36.44	2.4403
Oficiales P4	0.80226	6.5523	0.44774
Suboficiales P1	2.5672	9.5672	1.4328
Suboficiales P2	6.0972	30.597	3.4028

Suboficiales P3	1.2368	6.9868	0.013183
Suboficiales P4	3.9578	10.958	0.042185
Marineros P1	9.3998	33.9	0.10019
Marineros P2	1.1365	6.8865	0.11347
Marineros P3	3.6369	10.637	0.36309
Marineros P4	8.6377	33.138	0.86234

Caso: ProbMuyBajas

	Refuerzo	DotacionFinal	Residuo Local
	-----	-----	-----
Oficiales P1	0	5.75	1.25
Oficiales P2	0	7	4
Oficiales P3	0	24.5	9.5
Oficiales P4	0.75	6.5	0.5
Suboficiales P1	2.4	9.4	1.6
Suboficiales P2	5.7	30.2	3.8
Suboficiales P3	1.5	7.25	0.25
Suboficiales P4	4.8	11.8	0.8
Marineros P1	11.4	35.9	1.9
Marineros P2	0	5.75	1.25
Marineros P3	0	7	4
Marineros P4	0	24.5	9.5

Caso: IdealMuyGrande

	Refuerzo	DotacionFinal	Residuo Local
	-----	-----	-----
Oficiales P1	14.14	19.89	2.8898
Oficiales P2	23.881	30.881	4.8806
Oficiales P3	74.784	99.284	15.284
Oficiales P4	7.2203	12.97	4.0297
Suboficiales P1	12.194	19.194	6.8056
Suboficiales P2	38.188	62.688	21.312
Suboficiales P3	11.131	16.881	0.11864
Suboficiales P4	18.8	25.8	0.20038
Marineros P1	58.873	83.373	0.6275
Marineros P2	10.229	15.979	1.0212

Marineros P3	17.275	24.275	1.7247
Marineros P4	54.099	78.599	5.4009

Caso: SuboMas5

	Refuerzo	DotacionFinal	Residuo Local
Oficiales P1	1.5711	7.3211	0.32109
Oficiales P2	0	12	1
Oficiales P3	11.94	36.44	2.4403
Oficiales P4	0.80226	6.5523	0.44774
Suboficiales P1	0	12	1
Suboficiales P2	6.0972	30.597	3.4028
Suboficiales P3	1.2368	6.9868	0.013183
Suboficiales P4	0	12	1
Marineros P1	9.3998	33.9	0.10019
Marineros P2	1.1365	6.8865	0.11347
Marineros P3	0	12	1
Marineros P4	8.6377	33.138	0.86234

Código Modelo global con datos localizados

=== Resultados de Casos Generales ===

Caso: CasoBase

Categoría	Périodo	Prom.	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	6	7	0.72	7	0.2831
Oficiales	2	7	7	0.37	7	0.3661
Oficiales	3	7	7	0.56	8	0.5644
Oficiales	4	6	7	0.52	7	0.4814
Suboficiales	1	6	11	5.38	11	0.3815
Suboficiales	2	6	11	2.75	9	2.2520
Suboficiales	3	6	11	4.24	10	0.7635
Suboficiales	4	9	11	3.89	13	1.8930
Marineros	1	25	34	11.48	36	2.4800
Marineros	2	26	34	5.86	32	2.1379
Marineros	3	22	34	9.04	31	2.9625
Marineros	4	27	34	8.30	35	1.3047

Caso: ProbMas

Categoría	Périodo	Prom.	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	6	7	0.67	7	0.3267
Oficiales	2	7	7	0.40	7	0.4016
Oficiales	3	7	7	0.56	8	0.5552
Oficiales	4	6	7	0.52	7	0.4802
Suboficiales	1	6	11	5.19	11	0.1867
Suboficiales	2	6	11	3.09	9	1.9062
Suboficiales	3	6	11	4.28	10	0.7233
Suboficiales	4	9	11	4.00	13	2.0037
Marineros	1	25	34	11.05	36	2.0467
Marineros	2	26	34	6.59	33	1.4108
Marineros	3	22	34	9.11	31	2.8913
Marineros	4	27	34	8.53	36	1.5273

Caso: ProbMenos

Categoría	Périodo	Prom.	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	6	7	0.75	7	0.2526
Oficiales	2	7	7	0.34	7	0.3381
Oficiales	3	7	7	0.57	8	0.5694
Oficiales	4	6	7	0.52	7	0.4840
Suboficiales	1	6	11	5.51	12	0.5053
Suboficiales	2	6	11	2.49	8	2.5095
Suboficiales	3	6	11	4.19	10	0.8055
Suboficiales	4	9	11	3.80	13	1.8013
Marineros	1	25	34	11.76	37	2.7579
Marineros	2	26	34	5.32	31	2.6810
Marineros	3	22	34	8.96	31	3.0416
Marineros	4	27	34	8.12	35	1.1185

Caso: IdealMas

Categoría	Périodo	Prom.	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	6	7	1.97	8	0.0262
Oficiales	2	7	7	1.01	8	0.0079
Oficiales	3	7	7	1.55	9	0.5539

Oficiales	4	6	7	1.43	7	0.5721
Suboficiales	1	6	11	7.90	14	0.8953
Suboficiales	2	6	11	4.03	10	2.9684
Suboficiales	3	6	11	6.22	12	0.7846
Suboficiales	4	9	11	5.71	15	1.7115
Marineros	1	25	34	17.76	43	3.7644
Marineros	2	26	34	9.07	35	3.9288
Marineros	3	22	34	13.98	36	3.0153
Marineros	4	27	34	12.85	40	0.8508

Caso: OfiMas2

Categoría	Périodo	Prom. Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo	
Oficiales	1	6	7	0.00	8	1.0000
Oficiales	2	7	7	0.00	9	2.0000
Oficiales	3	7	7	0.00	9	2.0000
Oficiales	4	6	7	0.00	8	1.0000
Suboficiales	1	6	11	5.38	11	0.3815
Suboficiales	2	6	11	2.75	9	2.2520
Suboficiales	3	6	11	4.24	10	0.7635
Suboficiales	4	9	11	3.89	13	1.8930
Marineros	1	25	34	11.48	36	2.4800
Marineros	2	26	34	5.86	32	2.1379
Marineros	3	22	34	9.04	31	2.9625
Marineros	4	27	34	8.30	35	1.3047

=== Resultados - Casos con Probabilidad 0 ===

	Barco1Averiado	UltimoBarcoAveriado	TodaLaFlotaAveruada	MitadFlotaMantenimiento
Oficiales	6.7604	6.8055	6.5	6.739
Suboficiales	9.6067	10.26	6.75	8.5285
Marineros	31.694	31.883	25	29.794

=== Resultados de Casos Extremos ===

Caso: CasoBase

Categoría	Périodo	Prom. Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
-----------	---------	------------------------	----------	----------------	---------

Oficiales	1	6	7	0.72	7	0.2831
Oficiales	2	7	7	0.37	7	0.3661
Oficiales	3	7	7	0.56	8	0.5644
Oficiales	4	6	7	0.52	7	0.4814
Suboficiales	1	6	11	5.38	11	0.3815
Suboficiales	2	6	11	2.75	9	2.2520
Suboficiales	3	6	11	4.24	10	0.7635
Suboficiales	4	9	11	3.89	13	1.8930
Marineros	1	25	34	11.48	36	2.4800
Marineros	2	26	34	5.86	32	2.1379
Marineros	3	22	34	9.04	31	2.9625
Marineros	4	27	34	8.30	35	1.3047

Caso: ProbMuyBajas

Categoría	Périodo	Prom.	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	6	7	0.00	6	1.0000
Oficiales	2	7	7	0.00	7	0.0000
Oficiales	3	7	7	0.00	7	0.0001
Oficiales	4	6	7	0.00	6	1.0000
Suboficiales	1	6	11	0.00	6	5.0000
Suboficiales	2	6	11	3.00	9	2.0000
Suboficiales	3	6	11	6.00	12	1.0000
Suboficiales	4	9	11	0.00	9	2.0000
Marineros	1	25	34	0.00	25	9.0000
Marineros	2	26	34	6.40	32	1.6000
Marineros	3	22	34	12.80	35	0.8000
Marineros	4	27	34	0.00	27	7.0000

Caso: IdealMuyGrande

Categoría	Périodo	Prom.	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	6	7	13.29	19	2.2857
Oficiales	2	7	7	6.78	14	3.2158
Oficiales	3	7	7	10.46	17	0.4589
Oficiales	4	6	7	9.61	16	1.3891
Suboficiales	1	6	11	24.23	30	4.2347
Suboficiales	2	6	11	12.38	18	7.6249

Suboficiales	3	6	11	19.08	25	0.9217
Suboficiales	4	9	11	17.53	27	0.5315
Marineros	1	25	34	74.32	99	15.3237
Marineros	2	26	34	37.95	64	20.0475
Marineros	3	22	34	58.51	81	3.4898
Marineros	4	27	34	53.77	81	3.2339

Caso: SuboMas5

Categoría	Périodo	Prom.	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	6	7	0.72	7	0.2831
Oficiales	2	7	7	0.37	7	0.3661
Oficiales	3	7	7	0.56	8	0.5644
Oficiales	4	6	7	0.52	7	0.4814
Suboficiales	1	6	11	0.00	11	0.0000
Suboficiales	2	6	11	0.00	11	0.0000
Suboficiales	3	6	11	0.00	11	0.0000
Suboficiales	4	9	11	0.00	14	3.0000
Marineros	1	25	34	11.48	36	2.4800
Marineros	2	26	34	5.86	32	2.1379
Marineros	3	22	34	9.04	31	2.9625
Marineros	4	27	34	8.30	35	1.3047

Código Modelo global con restricciones misión

=== Resultados de Casos Generales MSO ===

Caso: CasoBase

Categoría	Periodo	Promedio	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	5.75	7.00	0.00	5.75	1.2500
Oficiales	2	5.75	7.00	0.00	5.75	1.2500
Oficiales	3	5.75	7.00	0.00	5.75	1.2500
Oficiales	4	5.75	7.00	0.00	5.75	1.2500
Suboficiales	1	7.00	11.00	0.62	7.62	3.3848
Suboficiales	2	7.00	11.00	0.31	7.31	3.6859
Suboficiales	3	7.00	11.00	0.48	7.48	3.5157
Suboficiales	4	7.00	11.00	0.45	7.45	3.5550
Marineros	1	24.50	34.00	7.27	31.77	2.2265

Marineros	2	24.50	34.00	3.71	28.21	5.7859
Marineros	3	24.50	34.00	5.73	30.23	3.7740
Marineros	4	24.50	34.00	5.26	29.76	4.2383

Residuo Global: 11.2663

Caso: ProbMas

Categoría	Periodo	Promedio	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	5.75	7.00	0.00	5.75	1.2482
Oficiales	2	5.75	7.00	0.00	5.75	1.2489
Oficiales	3	5.75	7.00	0.00	5.75	1.2485
Oficiales	4	5.75	7.00	0.00	5.75	1.2486
Suboficiales	1	7.00	11.00	0.27	7.27	3.7297
Suboficiales	2	7.00	11.00	0.16	7.16	3.8388
Suboficiales	3	7.00	11.00	0.22	7.22	3.7771
Suboficiales	4	7.00	11.00	0.21	7.21	3.7913
Marineros	1	24.50	34.00	6.48	30.98	3.0222
Marineros	2	24.50	34.00	3.86	28.36	5.6361
Marineros	3	24.50	34.00	5.34	29.84	4.1587
Marineros	4	24.50	34.00	5.00	29.50	4.4996

Residuo Global: 11.9148

Caso: ProbMenos

Categoría	Periodo	Promedio	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	5.75	7.00	0.08	5.83	1.1669
Oficiales	2	5.75	7.00	0.04	5.79	1.2124
Oficiales	3	5.75	7.00	0.06	5.81	1.1867
Oficiales	4	5.75	7.00	0.06	5.81	1.1926
Suboficiales	1	7.00	11.00	0.79	7.79	3.2051
Suboficiales	2	7.00	11.00	0.36	7.36	3.6404
Suboficiales	3	7.00	11.00	0.61	7.61	3.3944
Suboficiales	4	7.00	11.00	0.55	7.55	3.4512
Marineros	1	24.50	34.00	5.87	30.37	3.6279
Marineros	2	24.50	34.00	2.66	27.16	6.8436
Marineros	3	24.50	34.00	4.47	28.97	5.0260
Marineros	4	24.50	34.00	4.05	28.55	5.4455

Residuo Global: 12.9434

Caso: IdealMas

Categoría	Periodo	Promedio	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	5.75	7.00	0.00	5.75	2.2500
Oficiales	2	5.75	7.00	0.00	5.75	2.2500
Oficiales	3	5.75	7.00	0.00	5.75	2.2500
Oficiales	4	5.75	7.00	0.00	5.75	2.2500
Suboficiales	1	7.00	11.00	0.00	7.00	6.0000
Suboficiales	2	7.00	11.00	0.00	7.00	6.0000
Suboficiales	3	7.00	11.00	0.00	7.00	6.0000
Suboficiales	4	7.00	11.00	0.00	7.00	6.0000
Marineros	1	24.50	34.00	7.01	31.51	7.4946
Marineros	2	24.50	34.00	3.58	28.08	10.9228
Marineros	3	24.50	34.00	5.51	30.01	8.9851
Marineros	4	24.50	34.00	5.07	29.57	9.4322

Residuo Global: 22.5704

Caso: OfiMas2

Categoría	Periodo	Promedio	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	5.75	7.00	0.02	7.77	0.7717
Oficiales	2	5.75	7.00	0.01	7.76	0.7611
Oficiales	3	5.75	7.00	0.02	7.77	0.7671
Oficiales	4	5.75	7.00	0.02	7.77	0.7657
Suboficiales	1	7.00	11.00	0.19	7.19	3.8104
Suboficiales	2	7.00	11.00	0.10	7.10	3.9032
Suboficiales	3	7.00	11.00	0.15	7.15	3.8507
Suboficiales	4	7.00	11.00	0.14	7.14	3.8628
Marineros	1	24.50	34.00	4.54	29.04	4.9613
Marineros	2	24.50	34.00	2.32	26.82	7.1824
Marineros	3	24.50	34.00	3.57	28.07	5.9270
Marineros	4	24.50	34.00	3.28	27.78	6.2167

Residuo Global: 14.5544

=== Dotación Final Promediada por Categoría ===

Barco1Averiado UltimoBarcoAveriado TodaLaFlotaAveriativa MitadFlotaMantenimiento

Oficiales	5.75	5.75	5.75	5.75
Suboficiales	7	7	7	7
Marineros	24.5	24.5	24.5	24.5

==== **Resultados de Casos Extremos MSO** ====

Caso: CasoBase

Categoría	Periodo	Promedio	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	6.50	7.00	0.00	6.50	0.5000
Oficiales	2	6.50	7.00	0.00	6.50	0.5000
Oficiales	3	6.50	7.00	0.00	6.50	0.5000
Oficiales	4	6.50	7.00	0.00	6.50	0.5000
Suboficiales	1	6.75	11.00	0.04	6.79	4.2086
Suboficiales	2	6.75	11.00	0.02	6.77	4.2289
Suboficiales	3	6.75	11.00	0.03	6.78	4.2174
Suboficiales	4	6.75	11.00	0.03	6.78	4.2201
Marineros	1	25.00	34.00	5.71	30.71	3.2914
Marineros	2	25.00	34.00	2.92	27.92	6.0849
Marineros	3	25.00	34.00	4.49	29.49	4.5060
Marineros	4	25.00	34.00	4.13	29.13	4.8703

Residuo Global: 12.8092

Caso: ProbMuyBajas

Categoría	Periodo	Promedio	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	6.50	7.00	0.00	6.50	0.5000
Oficiales	2	6.50	7.00	0.00	6.50	0.5000
Oficiales	3	6.50	7.00	0.00	6.50	0.5000
Oficiales	4	6.50	7.00	0.00	6.50	0.5000
Suboficiales	1	6.75	11.00	0.00	6.75	4.2500
Suboficiales	2	6.75	11.00	0.00	6.75	4.2500
Suboficiales	3	6.75	11.00	0.00	6.75	4.2500
Suboficiales	4	6.75	11.00	0.00	6.75	4.2500
Marineros	1	25.00	34.00	0.00	25.00	9.0000
Marineros	2	25.00	34.00	0.00	25.00	9.0000
Marineros	3	25.00	34.00	0.00	25.00	9.0000
Marineros	4	25.00	34.00	0.00	25.00	9.0000

Residuo Global: 19.9311

Caso: IdealMuyGrande

Categoría	Periodo	Promedio	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	6.50	7.00	0.00	6.50	10.4998
Oficiales	2	6.50	7.00	0.00	6.50	10.4999
Oficiales	3	6.50	7.00	0.00	6.50	10.4998
Oficiales	4	6.50	7.00	0.00	6.50	10.4998
Suboficiales	1	6.75	11.00	0.00	6.75	19.2497
Suboficiales	2	6.75	11.00	0.00	6.75	19.2499
Suboficiales	3	6.75	11.00	0.00	6.75	19.2498
Suboficiales	4	6.75	11.00	0.00	6.75	19.2498
Marineros	1	25.00	34.00	5.75	30.75	53.2505
Marineros	2	25.00	34.00	2.94	27.94	56.0641
Marineros	3	25.00	34.00	4.53	29.53	54.4738
Marineros	4	25.00	34.00	4.16	29.16	54.8408

Residuo Global: 117.8003

Caso: SuboMas5

Categoría	Periodo	Promedio	Ideal Demandante	Refuerzo	Dotación Final	Residuo
Oficiales	1	6.50	7.00	0.00	6.50	0.5000
Oficiales	2	6.50	7.00	0.00	6.50	0.5000
Oficiales	3	6.50	7.00	0.00	6.50	0.5000
Oficiales	4	6.50	7.00	0.00	6.50	0.5000
Suboficiales	1	6.75	11.00	0.00	11.75	0.7500
Suboficiales	2	6.75	11.00	0.00	11.75	0.7500
Suboficiales	3	6.75	11.00	0.00	11.75	0.7500
Suboficiales	4	6.75	11.00	0.00	11.75	0.7500
Marineros	1	25.00	34.00	0.75	25.75	8.2500
Marineros	2	25.00	34.00	0.38	25.38	8.6170
Marineros	3	25.00	34.00	0.59	25.59	8.4096
Marineros	4	25.00	34.00	0.54	25.54	8.4574

Residuo Global: 16.9651