Optimización de la Gestión de Activos y Mantenimiento en la Flota de Superficie de la Armada Nacional de Colombia mediante el Análisis Futurístico de KPI's[1] y CMD[2] para la Integración del SISCP-C[3].

José Luis Morales Diaz

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecanica, Universidad del Valle, Cali

Nota del autor

Este documento cuenta con la dirección de proyecto de tesis del Doctor Luis Alberto Mora Gutiérrez.

Trabajo de tesis para optar por el título de Magister en Gestión de Activos y Mantenimiento.

Agradezco a Dios, por darme la fortaleza y la sabiduría para culminar este proceso.

A mi familia, a mi compañera de vida Natalia y a mi sobrina Mariana, quienes han sido un pilar fuerte e inquebrantable en mi vida, acompañándome con amor, paciencia y apoyo incondicional.

---

[1] *KPI's* -Key Performance Indicator - *Indicador Clave de Desempeño.*
[2] CMD Confiabilidad Mantenibilidad Disponibilidad – En ingles RAM Reliability, Availability, Maintainability
[3] *(SISCP-C)- Sistema Integrado de Supervisión y Control de Plataforma Colombiano*

A las instituciones y docentes que me brindaron la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos, impulsando mi crecimiento personal y profesional.

E-mail: jose.morales.diaz@correounivalle.edu.co - Josemoralesdiaz10@gmail.com

Resumen

El trabajo titulado Optimización de la Gestión de Activos y Mantenimiento en la Flota de Superficie de la Armada Nacional de Colombia mediante el Análisis Futurístico de KPI's y CMD para la Integración del SISCP-C tiene como objetivo mejorar la eficiencia operativa de los sistemas de propulsión de las unidades tipo OPV, mediante el uso de modelos analíticos avanzados y la integración del Sistema Integrado de Supervisión y Control de Plataforma Colombiano (SISCP-C).

La Armada Nacional de Colombia, en el marco del Plan de Desarrollo Naval 2042, busca adoptar tecnologías avanzadas para optimizar procesos de mantenimiento, reducir costos operativos y mejorar la disponibilidad y confiabilidad de los activos estratégicos. Sin embargo, persisten desafíos en la calidad de los datos, la fragmentación de sistemas tecnológicos y un enfoque reactivo en el mantenimiento.

Este trabajo de profundización propone un enfoque analítico basado en KPI's y CMD, que incorpora procesos ETL y simulaciones Montecarlo para generar proyecciones predictivas y prescriptivas, alineándose con las normas ISO 55000, UNE 16646, UNE EN 14224 y los requisitos internacionales vigentes en gestión de activos y mantenimiento.

Los resultados esperados incluyen una base técnica para la integración del SISCP-C, lo cual permite promover una gestión eficiente y proactiva de los activos estratégicos y contribuir de manera significativa a la seguridad y operatividad de la Armada Nacional de Colombia.

Palabras clave: Gestión de activos, mantenimiento predictivo, análisis futurístico, KPI's, CMD, SISCP-C, eficiencia operativa, ciclo de vida de activos.

Abstract

The project titled Optimization of Asset and Maintenance Management in the Surface Fleet of the Colombian Navy through the Futuristic Analysis of KPIs and CMD for SISCP-C Integration aims to enhance the operational efficiency of propulsion systems in OPV-type units by employing advanced analytical models and integrating the Colombian Integrated Platform Monitoring and Control System (SISCP-C).

Within the framework of the Naval Development Plan 2042, the Colombian Navy seeks to adopt advanced technologies to optimize maintenance processes, reduce operational costs, and improve the availability and reliability of strategic assets. However, challenges remain in data quality, system fragmentation, and a reactive maintenance approach.

This project proposes an analytical approach based on KPIs and CMD, utilizing ETL processes and Monte Carlo simulations to generate predictive and prescriptive projections, in alignment with ISO 55000, UNE 16646, UNE EN 14224, and international standards for asset and maintenance management.

The expected outcomes include establishing a robust technical foundation for SISCP-C integration, promoting efficient and proactive management of strategic assets, and significantly contributing to the safety and operational readiness of the Colombian Navy. Additionally, this project aligns with the strategic objectives of the Naval Development Plan 2042, contributing to the strengthening of operational and technological capabilities.

Keywords: Asset management, predictive maintenance, futuristic analysis, KPIs, CMD, SISCP-C, operational efficiency, asset lifecycle.

Contenido

Introducción y Contexto Operacional ***11***
Planteamiento del problema u oportunidad ***13***
Límites del problema u oportunidad **15**
Justificación ***17***
Justificación teórica **17**
Justificación Metodológica **17**
Justificación Práctica **18**
Relevancia del Objeto de Estudio **18**
Objetivos ***21***
Objetivo general **22**
Objetivos específicos **22**
Marco teórico ***24***
Antecedentes de la investigación **28**
Evolución histórica y normativa de la gestión de activos físicos 28
Emergencia del mantenimiento digital y predictivo 31
Contexto aplicado en la Armada Nacional de Colombia 33
Estudios previos internacionales relevantes 36
Estado del arte **37**
Integración de sistemas SCADA, PLC, sensores y HMI 39
ETL, BI, Predictive y Prescriptive Analytics 41
Uso de CMD, MTBF, MTTR y disponibilidad) 43
Uso Aplicación de modelos RAM y metodologías como RCM y FMECA 45
Normativa internacional y marcos de referencia 46
Casos de implementación en defensa y entorno naval 48
Marco metodológico ***50***
Enfoque de la investigación **50**
Tipo de estudio **51**
Diseño metodológico **51**
Población **52**
Tipo de muestreo **53**
Técnicas e instrumentos de recolección de datos **54**
Fuentes primarias y secundarias **54**
Procedimiento (por objetivo específico en fases) **55**
Consideraciones éticas y técnicas **56**
Desarrollo ***59***
Objetivo 1 - Marco Normativo **59**
Introducción al enfoque normativo y operativo 59
Visión doctrinal de la Armada Nacional sobre gestión de activos 60
Alineación estratégica 64
Mapa estratégico de mantenimiento 66
Portafolio de activos físicos y planes maestros 69
Análisis comparativo con el modelo IAM actualizado 70
Diagnóstico Armada Nacional en el proceso de mantenimiento 72
Aporte de las normas ISO 55000 al modelo de gestión de activos 75
Norma ISO 55001 78
Norma ISO 55002 80
Norma UNE-EN 16646 81
Objetivo 2 - Caracterización de Equipos **85**
Norma BS EN ISO 14224: Jerarquía funcional y estructural de activos 86

Jerarquía técnica en la Armada Nacional 88
Fundamento de la criticidad 92
Enfoque metodológico aplicado en la Armada 93
Categorización estructural por sistemas funcionales 97
Aplicación operativa de la categorización 98
Aplicación referencial de OREDA, EsReDA y EIREDA en el análisis de equipos .. 99
Integración de enfoques sistémicos con jerarquías técnicas en mantenimiento ... 101
Objetivo 3 - ETL y Analítica Predictiva 107
Generación de valor en la gestión de mantenimiento mediante Analytics. 109
Arquitectura metodológica basada en Business Analytics 110
Evolución de la data de lo descriptivo a lo cognitivo 112
Disponibilidad Alcanzada 114
Interpretación analítica del ciclo de vida del activo: curvas de Davies 116
Recolección de la data 119
Consolidación, limpieza y estructuración de la base de datos CMD 120
Análisis descriptivo y diagnóstico 122
Objetivo 4 - Conclusiones e Integración del SISCP-C. 138
Conclusión Objetivo 1 – Marco normativo 138
Conclusión Objetivo 2 – Caracterización de equipos críticos 139
Conclusión Objetivo 3 – ETL y Analítica Predictiva 140
Descripción de cómo se alcanza el logro de objetivos 150
UNO - Marco Normativo 150
DOS - Caracterización de Equipos 151
TRES - ETL y Analítica Predictiva 152
CUATRO - Conclusiones e Integración del SISCP-C 153
Referencias 154
Glosario de Definiciones técnicas 169

Figuras

Figura 1 - Jerarquía taxonómica de los objetivos..... 21
Figura 2 - Línea de tiempo evolución de la GA..... 30
Figura 3 - Integración DT–IoT en mantenimiento naval..... 41
Figura 4 - Caracterización estándar CMD..... 43
Figura 5 - Comparación del MTTF y la confiabilidad en intercambiadores..... 44
Figura 6 - Organigrama Armada Nacional..... 61
Figura 7- Modelo conceptual del SGA de la ARC..... 62
Figura 8 - Alienación estratégica JEMAT..... 65
Figura 9 - Mapa estratégico de mantenimiento ARC..... 67
Figura 10 - Indicadores y metas 2024-2017 JEMAT..... 68
Figura 11 - IAM 10-box Capability Model..... 71
Figura 12 - Alineación organizacional para el logro de objetivos estratégicos..... 76
Figura 13 - Estructura jerárquica documental del Sistema de Gestión de Activos..... 77
Figura 14 - Representación UNE-EN 16646 en SGA..... 82
Figura 15 - Relacion de procesos de mantenimiento UNE-EN 16646..... 83
Figura 16 - Gestión de activos ARC..... 84
Figura 17 - Jerarquía funcional y estructural de activos según la norma ISO 14224..... 86
Figura 18 - Estructura de datos para mantenimiento y fallas..... 87
Figura 19 - Descomposición técnica de activos en unidades navales..... 89
Figura 20 - Determinación del nivel de criticidad para activos ARC..... 93
Figura 21 - Clasificación de criticidad en una OPV..... 96
Figura 22 - Distribucion de equipos criticos por grupo costructivo..... 97
Figura 23 - Enfoque sistémico Kantiano..... 102
Figura 24 - Escenarios Futuros Empresariales - Grant..... 103
Figura 25 - Enfoque Global Kant & Grant & Wilson..... 104
Figura 26 - Dimenciones de Wilson con modelo negocio de Grant..... 105
Figura 27 - Objetivos Estratégicos Específicos Jefatura de Material..... 107
Figura 28 - Generación de valor de analytics bajo GOMAP..... 109
Figura 29 - Proceso central Business Analytical..... 111
Figura 30 - Analytics con cinco estadios..... 113
Figura 31 -Tiempos de series con cola inicial a la baja o a la suba..... 117
Figura 32 - Estrategias exitosas basadas en Curva de Davies o de la Bañera..... 118
Figura 33 - Recopilación de datos..... 120
Figura 34 - Transformación de la data..... 120
Figura 35 - Aplicacion el criterio de conservación de tendencia..... 121
Figura 36 - Digitacion de Data en formato Free excel..... 122
Figura 37 – Verificacion de estadistica del modelo..... 124
Figura 38 - Estimación de pronósticos..... 125
Figura 39 - Comportamiento de β no planeados: MTBMc y MTTR..... 126
Figura 40 - Evaluación de los β de MTBMp y MP..... 127
Figura 41 - Análisis integral de β..... 128
Figura 42 - Comportamiento comparado de los β técnicos por métrica CMD..... 129
Figura 43 - Análisis comparativo de Etas específicos y globales por métrica CMD..... 130
Figura 44 - Análisis de Etas integrales..... 131
Figura 45 - Informe real 7 βetas VOTORANTIM..... 132
Figura 46 - Cálculos CMD en meses VOTORANTIM de βeta y Eta..... 133
Figura 47 - Tiempos de mantenimiento y reparación MTTR y MP..... 134
Figura 48 - Tiempos útiles MTBMc y MTBMp..... 135
Figura 49 - Disponibilidad técnica alcanzada..... 136

Figura 50 - Resultados integrales 142

Ecuaciones

Ecuación 1 – Disponibilidad 115
Ecuación 2 – MTBM 115
Ecuación 3 – Mmean 115
Ecuación 4 – Disponibilidad Alcanzada 116
Ecuación 5 – Función de confiabilidad Weibull 125

Tablas

Tabla 1 - Normas y marcos internacionales aplicables en GA y mantto. 47
Tabla 3 - Unidades de Superficie y Submarinas 69
Tabla 4 - Resultados de evaluacion de madures de GA ARC..... 74
Tabla 4 - Jerarquía técnica de activos en la Armada Nacional 88
Tabla 5 - Jerarquía funcional de unidad Tipo OPV..... 91
Tabla 6 - Valores de β 118
Tabla 7 - Matriz de integración del SISCP-C..... 146

Introducción y Contexto Operacional

La gestión eficiente de activos y mantenimiento en la Armada Nacional de Colombia es fundamental para garantizar la disponibilidad y operatividad de su flota de superficie, especialmente en los sistemas de propulsión de las unidades tipo OPV.

El Plan de Desarrollo Naval 2042 establece la necesidad de adoptar tecnologías avanzadas y mejorar los procesos de mantenimiento para reducir costos operativos y maximizar la eficiencia de los activos estratégicos (Armada Nacional, 2021).

En este contexto, el Sistema Integrado de Supervisión y Control de Plataforma Colombiano (SISCP-C) surge como una solución innovadora para la supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) en las plataformas navales (Pedraza & Guerrero, 2022).

A pesar de las iniciativas en marcha, la flota de superficie enfrenta desafíos, como la fragmentación de sistemas tecnológicos, la falta de integración de datos y un enfoque predominantemente reactivo en las estrategias de mantenimiento.

Estos problemas afectan directamente la calidad de los datos, la confiabilidad operativa y la capacidad para realizar un mantenimiento predictivo y proactivo (Kant & Gurung, 2024). Además, el uso de múltiples plataformas de monitoreo sin una estandarización adecuada limita la efectividad de los indicadores de rendimiento, como los KPI's y CMD.

El proyecto propone un enfoque analítico basado en métodos futurísticos para el análisis y pronóstico de indicadores clave (KPI's) y CMD, que incorpora técnicas avanzadas como series temporales y simulaciones Montecarlo para obtener proyecciones predictivas que faciliten decisiones estratégicas y prescriptivas (Mora, 2009).

Esto se alinea con las mejores prácticas internacionales establecidas en las normas ISO 55000, UNE 16646 y UNE EN 14224, lo que permite consolidar una gestión eficiente de los activos y alineada con los objetivos estratégicos de la Armada Nacional. La integración del SISCP-C permitirá centralizar la información operativa, facilitar la toma de decisiones y

optimizar los procesos de mantenimiento, con el fin de incrementar la disponibilidad operativa y disminuir los tiempos de inactividad (Kant & Gurung, 2024).

En resumen, el proyecto busca mejorar la eficiencia operativa de los sistemas de propulsión de las unidades OPV y establecer las bases técnicas para la futura implementación del SISCP-C como una herramienta clave en la gestión eficiente de los activos estratégicos, alineándose con el marco de desarrollo tecnológico planteado en el Plan de Desarrollo Naval 2042.

Planteamiento del problema u oportunidad

La Constitución Política de Colombia de 1991, en su capítulo 7 de la fuerza pública, establece en el Artículo 217 que la Nación tendrá para su defensa unas Fuerzas Militares permanentes constituidas por el Ejército, la Armada y la Fuerza Aérea, las cuales tienen como finalidad primordial la defensa de la soberanía, la independencia, la integridad del territorio nacional y el orden constitucional.

En este contexto, la Armada Nacional de Colombia desarrolla operaciones navales con el objetivo de contribuir al cumplimiento de esta misión, apoyándose en una visión de ser una fuerza de proyección e influencia regional, con tecnología avanzada y capacidades operacionales robustas. Así mismo, estableció seis objetivos estratégicos, enfocado al desarrollo tecnológico e implementación de tecnologías avanzadas para el análisis de datos de operación, mantenimiento y comunicaciones, esto, con el propósito de mejorar la confiabilidad de los sistemas (Armada Nacional, 2020).

Es importante mencionar que el SISCP-C es un proyecto financiado por el Fondo Francisco José de Caldas (FFJC) que busca crear una arquitectura tecnológica avanzada para integrar las áreas operativas de los buques mediante un Sistema de Control Industrial (ICS), que buscan habilitar capacidades de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) (Guerrero & Pedraza, 2022).

A pesar de los avances tecnológicos implementados, la flota de superficie de la Armada Nacional de Colombia continúa enfrentando limitaciones estructurales en su gestión de activos físicos, particularmente en la articulación de procesos de mantenimiento con el ciclo de vida operativo de los sistemas críticos. Tal como indica Lemerande (2020), la gestión de activos navales requiere una integración efectiva de datos, competencias profesionales certificadas y procesos de decisión basados en criterios técnicos estructurados. En el entorno colombiano, la falta de estandarización de plataformas tecnológicas y la segmentación de fuentes de

información impiden establecer un enfoque sistemático de mantenimiento predictivo y prescriptivo.

Este fenómeno, según Ukato et al. (2024), deriva en deficiencias de trazabilidad, subutilización de sensores e ineficiencia en la captura de indicadores clave como los KPI y los parámetros CMD, afectando negativamente la disponibilidad operativa. Además, el mantenimiento basado en esquemas reactivos sigue predominando, caracterizado por altos MTTR y bajos niveles de disponibilidad, lo que refleja la necesidad de una planificación dinámica apoyada en modelos analíticos avanzados.

El uso de estrategias sustentadas en inteligencia artificial y gemelos digitales, según lo propuesto por Ahmed y Asamoah (2024), permite transitar hacia modelos de mantenimiento más eficientes, donde las decisiones son respaldadas por análisis predictivos en tiempo real, basados en sensores IoT y simulaciones multivariables. En este contexto, es imperativo que la Armada Nacional consolide un sistema de gestión de mantenimiento orientado por datos y sustentado en marcos internacionales, para garantizar la confiabilidad técnica de sus unidades estratégicas.

Considerando este contexto de retos estructurales y necesidad de transformación digital en la gestión de mantenimiento naval, la implementación del Sistema de Información para el SISCP-C se configura como una respuesta estratégica orientada a superar las limitaciones previamente identificadas.

Su integración con modelos de análisis futurísticos predictivo y prescriptivo, como lo proponen Kant y Gurung (2024), ofrece un marco metodológico para transitar desde esquemas reactivos hacia una gestión basada en la anticipación de fallos, optimización de los recursos y alineación con estándares internacionales. No obstante, al encontrarse en fase de desarrollo, resulta indispensable establecer criterios técnicos claros sobre la interoperabilidad de sus componentes analíticos, así como definir metodologías que garanticen su operatividad en entornos reales de la Armada Nacional de Colombia. A través del análisis sistemático de KPI’s

y CMD, y con el respaldo de herramientas tecnológicas avanzadas, el SISCP-C tiene el potencial de consolidarse como un habilitador clave del Plan de Desarrollo Naval 2042, promoviendo decisiones orientadas al ciclo de vida y una gestión de activos alineada con los lineamientos de normas como ISO 55000 e ISO 14224.

Límites del problema u oportunidad

El presente análisis se centra exclusivamente en los sistemas de propulsión de los buques tipo Ocean Patrol Vessel (OPV) pertenecientes a la flota de superficie de la Armada Nacional de Colombia. Esta delimitación responde a la criticidad de dichos sistemas en términos de impacto sobre la disponibilidad operativa y su representatividad dentro del conjunto de activos estratégicos. Según Aremu et al. (2020), una focalización precisa permite desarrollar modelos de mantenimiento predictivo robustos, siempre que exista una caracterización adecuada del comportamiento funcional del activo. Aunque circunscrito a un solo sistema, el enfoque metodológico propuesto busca establecer lineamientos replicables a otros sistemas complejos abordo, alineados con prácticas internacionales de estandarización técnica.

Uno de los principales desafíos técnicos del estudio reside en la accesibilidad y calidad de los datos operativos disponibles, ya que la información se encuentra dispersa entre registros SAP PM y documentación física de mantenimiento. Esta fragmentación condiciona la capacidad para construir modelos analíticos de predicción y prescripción fiables. Özcan y Kutbay (2024) demostraron que, en entornos con limitaciones de datos históricos, técnicas como el aprendizaje por transferencia permiten mitigar la pérdida de precisión, pero requieren una calibración contextual específica. En consecuencia, la ausencia de un flujo de datos continuo y estructurado puede comprometer la trazabilidad de fallas y limitar la generación de indicadores fiables para el ciclo de vida de los activos.

Pese a las restricciones mencionadas, el proyecto representa una oportunidad para fortalecer la integración funcional del Sistema Integrado de Supervisión y Control de Plataforma

Colombiano (SISCP-C). Este sistema puede consolidarse como núcleo tecnológico para la gestión proactiva de activos, mediante la incorporación de análisis basados en KPI y parámetros CMD. Según Kant y Gurung (2024), los sistemas de mantenimiento inteligente deben incorporar modelos predictivos normalizados que se alineen con marcos como ISO 55000 e ISO 14224 para maximizar la eficiencia operativa.

Justificación

La transformación digital en las fuerzas navales modernas requiere de una gestión de activos alineada con estándares internacionales, que permita asegurar la disponibilidad técnica, eficiencia operativa y sostenibilidad del ciclo de vida de los sistemas críticos a bordo. En el contexto de la Armada Nacional de Colombia, estas necesidades se intensifican ante los desafíos logísticos y estratégicos propios del entorno marítimo operacional. En este marco, la justificación del presente estudio se estructura desde tres dimensiones complementarias: teórica, metodológica y práctica. Véase:

Justificación teórica

La gestión de activos físicos en el ámbito naval ha evolucionado hacia un modelo sistémico que integra conceptos de ciclo de vida, confiabilidad y disponibilidad, enmarcados en normativas internacionales como ISO 55000, ISO 14224 y UNE 16646. Estos marcos normativos proponen una transición desde modelos tradicionales de mantenimiento hacia enfoques basados en riesgos y evidencia cuantitativa. Según Da Silva y De Souza (2021), la aplicación coherente de los principios de la serie ISO 55000 permite alinear los procesos operativos con objetivos estratégicos institucionales, favoreciendo una gobernanza técnica más transparente y eficiente. En este contexto, la Armada Nacional de Colombia ha adoptado el Plan de Desarrollo Naval 2042 como hoja de ruta para modernizar la gestión de sus activos estratégicos, exigiendo un modelo que articule sostenibilidad operativa, trazabilidad técnica y análisis predictivo en tiempo real (Armada Nacional, 2021).

Justificación Metodológica

La necesidad de integrar herramientas de análisis predictivo y prescriptivo en los procesos de mantenimiento exige metodologías que combinen modelado estadístico,

inteligencia artificial y visualización dinámica de datos. Tal como indican Sepe et al. (2022), los modelos de predicción del riesgo de fallo permiten redefinir esquemas de mantenimiento, anticipar eventos críticos y optimizar recursos técnicos. En este proyecto, se plantea una metodología híbrida que combina extracción, transformación y carga (ETL) de datos desde SAP PM, integración con Power BI Desktop para análisis visual, y simulaciones Montecarlo para estimación de probabilidades de fallo. Esta propuesta metodológica se fundamenta en la aplicabilidad directa de los marcos definidos por la norma UNE 20654:2015 y en las recomendaciones de la norma IEC 60300-3-3 para el análisis del ciclo de vida de los costes (LCC).

Justificación Práctica

Desde el punto de vista operativo, los sistemas de propulsión representan activos críticos cuya indisponibilidad afecta de forma directa la capacidad de respuesta de las unidades de superficie. En este sentido, Ihemegbulem y Baglee (2020) sostienen que la ausencia de información estructurada, combinada con un enfoque predominantemente reactivo del mantenimiento, genera condiciones propicias para fallos no planificados, incremento de costos y reducción de disponibilidad. Por tanto, este proyecto responde a la necesidad práctica de transformar un proceso técnico fragmentado en un sistema de gestión integrado, basado en datos, orientado al ciclo de vida del activo y alineado con la doctrina operativa de la Armada Nacional de Colombia.

Relevancia del Objeto de Estudio

El enfoque en unidades tipo OPV y sus sistemas de propulsión responde a criterios de criticidad técnica, representatividad operativa y potencial de replicabilidad metodológica. Según Parra et al. (2020), iniciar procesos de estandarización metodológica en sistemas críticos con datos parcialmente disponibles permite validar modelos de predicción en condiciones reales,

adaptándolos posteriormente a contextos más complejos. Esta estrategia permite implementar mejoras incrementales sin comprometer la operatividad de la flota, generando al mismo tiempo información estructurada útil para el análisis global de desempeño.

Uno de los principales aportes del proyecto consiste en habilitar una gestión basada en datos (Data-Driven Management) mediante la consolidación de registros dispersos, su tratamiento analítico y su integración en una plataforma de visualización dinámica. Antonenko (2023) señala que los entornos navales deben migrar hacia modelos de decisión automatizados y soportados en sistemas SCADA e ICS para lograr eficiencia operativa y trazabilidad del mantenimiento. La integración del SISCP-C como núcleo tecnológico para estos fines representa una oportunidad concreta para materializar esta transición, especialmente si se basa en estándares internacionales de interoperabilidad de datos y gobernanza técnica.

Así mismo, la gestión predictiva de activos estratégicos tiene un impacto directo sobre indicadores como el tiempo medio entre fallos (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR) y el porcentaje de disponibilidad técnica. De acuerdo con Kant y Gurung (2024), la implementación de modelos híbridos de mantenimiento predictivo-prescriptivo basados en inteligencia artificial permite reducir los costos operativos y aumentar la confiabilidad de los sistemas, incluso en contextos donde los datos disponibles son limitados o fragmentados. En este caso, el uso combinado de simulaciones Montecarlo y sistemas SCADA permitirá establecer correlaciones entre eventos técnicos y condiciones operativas, lo que habilita intervenciones planificadas con base en evidencia cuantitativa.

Ahora bien, la transformación digital de la Armada no se limita a la adquisición de tecnologías, sino a la construcción de un ecosistema donde los activos, los datos y las decisiones estén interconectados. Este proyecto propone una arquitectura técnica que permite, mediante el SISCP-C, integrar datos provenientes de diferentes fuentes y convertirlos en conocimiento operativo útil. Según Aremu et al. (2020), un enfoque de mantenimiento predictivo apoyado en gestión del conocimiento técnico incrementa el valor de los activos al reducir su

deterioro acelerado, optimizar sus intervenciones y extender su ciclo de vida. Esto es coherente con los objetivos estratégicos definidos en el Plan de Desarrollo Naval 2042.

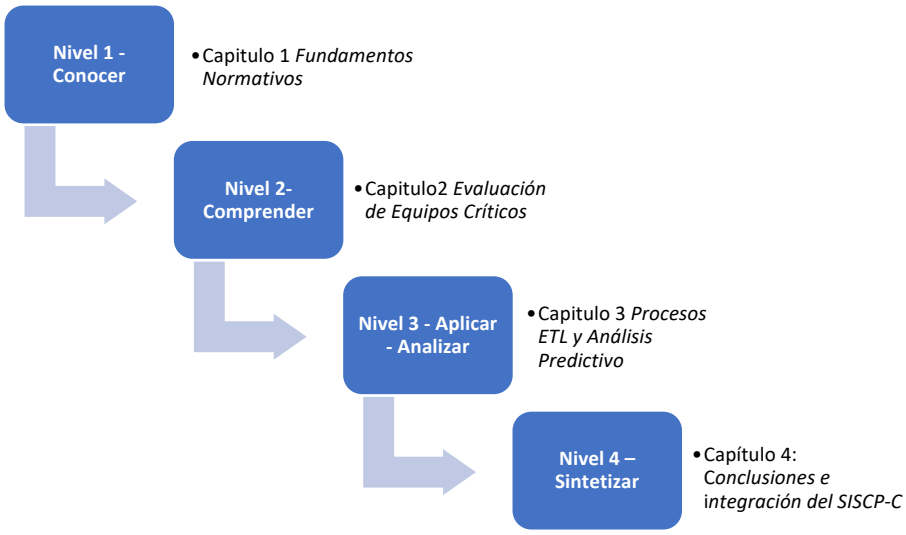
Finalmente, y aunque el alcance inicial se limita a una unidad OPV, el enfoque ha sido diseñado con criterios de replicabilidad. Como destacan Da Silva y Souza (2021), una arquitectura de mantenimiento basada en estándares ISO no solo permite la estandarización de procesos técnicos, sino que facilita su adopción progresiva por otros sistemas de a bordo. La estandarización metodológica y técnica del SISCP-C sentará las bases para una futura política institucional de mantenimiento basada en confiabilidad, fortaleciendo no solo la disponibilidad de las unidades, sino también la seguridad y operatividad global de la Armada Nacional de Colombia.

Objetivos

La estructura y la secuencia lógica de los objetivos establecidos usan el modelo de Bloom, Garret-Briggs y Gagné[4] con taxonomía jerárquica, donde como se observa en la figura 1, se asume que el aprendizaje a niveles superiores depende de la adquisición de habilidades en niveles inferiores, lo cual favorece un enfoque holístico en el proceso de educativo (Peña et al., 2018; Mora & Orozco, 2021; Loreto, 2019).

Figura 1

Jerarquía taxonómica de los objetivos



Nota. Secuencia lógica, niveles y relación de objetivos del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

La metodología utilizada para la estructuración de los objetivos facilita al lector identificar la secuencia de los conceptos revisados en el presente trabajo y una mejor comprensión y articulación de estos.

[4] Benjamín Bloom, Robert Gagné, psicólogos norteamericanos destacados por sus publicaciones en el área de aprendizaje

Objetivo general

Optimizar la eficiencia del sistema de gestión de activos y mantenimiento en la flota de superficie de la Armada de Colombia, con base a los sistemas de propulsión de una unidad tipo OPV, mediante el análisis futurístico de KPI's y CMD; y establecer lineamientos para la integración del SISCP-C como una herramienta clave en la gestión eficiente de los activos estratégicos.

Objetivos específicos

Describir las influencias factibles de las Normas 55001, 55001, 55002 y UNE EN 16646 en la gestión de activos y de mantenimiento, en la flotilla de superficie de la Armada de Colombia, a la luz de la administración del CMD y del LCC.

Nivel 1 - Conocer - Escala de Bloom & Gagné.

Caracterizar los equipos críticos susceptibles de mediciones CMD y KPI's a la luz de las jerarquías de la norma BS EN ISO 14224 y de las metodologías OREDA, EsReda y Eireda, bajo el enfoque sistémico Kantiano, Grantiano. Maslow y de Wilson de mantenimiento y gestión de activos.

Nivel 2 - Comprender - Escala de Bloom & Gagné.

Aplicar procesos ETL[5] sobre los datos actuales para desarrollar análisis bajo enfoques predictive y prescriptive, mediante el uso de inteligencia artificial, Power BI y simulaciones Montecarlo, con el fin de estimar valores futuros de CMD y KPI, y así optimizar el ciclo de vida de los activos estratégicos.

Nivel 3 - Aplicar - Escala de Bloom & Gagné.

[5] Extract, Transform, Load (Extracción, Transformación y Carga). Es un proceso fundamental en ingeniería de datos y analítica, especialmente útil en mantenimiento basado en datos y gestión de activos.

Concluir los principales resultados técnicos y académicos del trabajo, resaltar su impacto en la gestión de activos de la Armada Nacional de Colombia y generar insumos que respalden la integración del SISCP-C como una herramienta para la gestión eficiente de los activos navales de alto valor de la organización.

Nivel 4 - Sintetizar - Escala de Bloom & Gagné.

Marco teórico

La gestión de activos físicos en entornos navales se enmarca en la familia de normas ISO 55000, que establece principios y requisitos para la alineación estratégica de los activos con los objetivos de la organización. Esta normativa propone un enfoque basado en el ciclo de vida del activo (LCC) que considera desde la adquisición hasta la disposición final, integrando procesos de mantenimiento, monitoreo, mejora y disposición. En el caso de las unidades de superficie de la Armada Nacional de Colombia, dicha alineación requiere integrar la planificación táctica con herramientas de diagnóstico avanzado, como el análisis de datos históricos y en tiempo real proveniente de sistemas SCADA y PLC. Según Szatkowski et al., (2022), el uso de redes SCADA reconfigurables mediante software-defined networking (SDN) permite aumentar la resiliencia, escalabilidad y seguridad operativa, especialmente en contextos críticos como los buques de guerra.

Los sistemas de mantenimiento predictivo y prescriptivo en la industria naval requieren el uso de indicadores clave de desempeño (KPIs) normalizados, como los propuestos en la norma UNE-EN 15341. Estos indicadores permiten evaluar la eficacia de los sistemas de gestión del mantenimiento (SGM) mediante métricas como el Mean Time Between Failures (MTBF), el Mean Time To Repair (MTTR) y la tasa de disponibilidad operacional (A_0). La implementación de CMD (Cuadros de Mando de Mantenimiento) en plataformas navales como herramienta analítica facilita la toma de decisiones operativas y logísticas al integrar datos en tiempo real y modelos de pronóstico. En esta línea, Cubides et al., (2024) destacan que el uso de plataformas de navegación no tripulada en la Armada colombiana se basa en la analítica predictiva para optimizar el rendimiento operativo bajo condiciones dinámicas.

El uso de modelos RAM (Reliability, Availability, Maintainability) en la gestión de flotas navales permite cuantificar la fiabilidad operacional de los sistemas críticos. Estos modelos, complementados con las guías de recopilación de datos de fallas y mantenimientos correctivos

definidos por la norma ISO 14224, constituyen una base para implementar estrategias de mantenimiento basado en condición (CBM) y en confiabilidad (RCM). El modelado matemático de la tasa de fallas λ(t) como variable estocástica dependiente del tiempo operacional facilita la estimación de intervalos óptimos de mantenimiento. Rotta (2023), al analizar la estrategia pentagonal de la Armada Nacional, señala que estos esquemas técnicos deben integrarse en una gobernanza orientada al aprovechamiento sostenible de las capacidades oceánicas, lo que exige una visión holística del activo naval como nodo estratégico.

Desde el punto de vista de arquitectura de sistemas, la integración de SCADA, sensores IoT y modelos de gemelos digitales (digital twins) permite representar en tiempo real el estado físico y funcional de los equipos a bordo. Esta representación virtual está siendo empleada para la simulación de escenarios de falla y la evaluación proactiva de riesgos. En plataformas navales, esta capacidad se articula con indicadores de criticidad (Kc) que priorizan la atención sobre subsistemas vitales.

De acuerdo con Szatkowski et al. (2022), el uso de redes SCADA con topología modular permite implementar escenarios de conexión parcial para asegurar la operatividad en condiciones de daño estructural, lo cual resulta esencial en operaciones tácticas de combate.

El mantenimiento prescriptivo, que evoluciona a partir del predictivo, incorpora algoritmos de inteligencia artificial, aprendizaje automático y análisis prescriptivo para recomendar acciones de mantenimiento específicas antes de que ocurra una falla. Este enfoque está alineado con el concepto de mantenimiento 5.0, que combina datos históricos, simulaciones, costos y restricciones operativas.

Las plataformas de apoyo logístico naval deben incorporar estos algoritmos dentro de sus sistemas de control para generar recomendaciones operativas y ajustar dinámicamente sus planes de mantenimiento. Cubides et al., (2024) enfatizan que las futuras plataformas navales de Colombia, como los vehículos de superficie no tripulados (USV), integrarán estos sistemas para aumentar la autonomía funcional y la eficiencia energética.

La Doctrina de Material Naval (DOMANA) de la Armada Nacional de Colombia establece lineamientos técnicos para la gestión integral del ciclo de vida de los sistemas de armas, propulsión, control y energía. Esta doctrina, cuando se articula con marcos normativos internacionales como ISO 55000 e ISO 14224, permite diseñar un sistema robusto de gestión de mantenimiento que garantice la disponibilidad estratégica de los activos en entornos de alta incertidumbre operacional. Como lo muestra la revisión de Garzón et al., (2024), el desarrollo nacional de capacidades navales exige un sistema de gestión de activos interoperable, capaz de integrar sensores, protocolos de mantenimiento, KPIs, modelos de costo-beneficio y planificación estratégica con enfoque en resiliencia.

En el ámbito de la gestión moderna de mantenimiento en entornos navales, los sistemas de gemelos digitales (Digital Twins, DT) han permitido optimizar la fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad de los activos críticos. Gomaa (2022) argumenta que la integración de DT con algoritmos de mantenimiento predictivo fortalece la capacidad de identificar condiciones operativas de equipos en tiempo real, facilitando la predicción anticipada de fallas. Esta capacidad se ve reforzada por plataformas que modelan digitalmente el comportamiento físico, lo que permite adaptar estrategias de mantenimiento según las dinámicas operativas. Van Dinter et al. (2022) complementan este planteamiento al resaltar cómo los modelos de abstracción progresiva y arquitecturas por capas permiten superar desafíos de interoperabilidad y carga computacional en ambientes operativos complejos como el naval.

La aplicación sistemática de los lineamientos de la norma ISO 14224 en sistemas navales ha demostrado su efectividad para estructurar y estandarizar la recopilación de datos de confiabilidad y mantenibilidad. Ciliberti et al. (2019) destacan que esta norma permite establecer correlaciones entre parámetros operativos y modos de falla, lo cual posibilita la construcción de bases de datos robustas para análisis RAM y modelos de mantenimiento basado en riesgo. En conjunto con sistemas SCADA y plataformas CMMS, se logra representar

relacionalmente la información operativa y de mantenimiento, facilitando la visualización de tendencias de degradación. Guillarme et al. (2024) señalan que un enfoque digital centrado en datos puede reducir drásticamente los tiempos de recolección, aumentando la capacidad de respuesta ante eventos no programados.

En el entorno operativo de la Armada Nacional de Colombia, el uso integrado de indicadores clave de desempeño (KPIs) y matrices de criticidad (CMD) para la toma de decisiones ha adquirido mayor relevancia con el soporte de tecnologías digitales. Svadkovsky (2024) sostiene que los DT permiten simular escenarios de fallas múltiples, analizar su impacto logístico y ajustar dinámicamente las estrategias de mantenimiento a las restricciones operativas reales. Indicadores como MTBF, MTTR y RAM son procesados en tiempo real para emitir alertas tempranas, permitiendo intervenciones proactivas que se alinean con la disponibilidad logística de la Flotilla de Superficie.

El mantenimiento prescriptivo incorpora herramientas analíticas que no solo anticipan fallas, sino que también recomiendan intervenciones específicas considerando el contexto operativo y económico. Mohanraj et al. (2024) explican que esta estrategia reduce significativamente el impacto de fallas críticas al optimizar la programación de reemplazos en función de la vida útil proyectada del componente. En el contexto naval, los sensores HMI conectados a sistemas SCADA permiten la captura granular de variables operativas, cuyos patrones son interpretados por modelos de inteligencia artificial para orientar la toma de decisiones técnica en condiciones dinámicas.

Una herramienta clave en la transición hacia el mantenimiento inteligente es el análisis multicriterio (MCDA), aplicado a procesos de priorización de activos y benchmarking. Cunha et al. (2021) proponen una metodología basada en riesgo percibido que permite jerarquizar activos en función de criticidad, disponibilidad logística y tasa de falla esperada. Este tipo de modelos contribuye directamente a la toma de decisiones estratégicas en entornos restrictivos,

como bases navales o astilleros, donde los recursos deben asignarse de manera óptima en función del valor estratégico del activo.

La integración de estas herramientas requiere un entorno organizacional orientado al ciclo de vida completo del activo (Asset Life Cycle Management), conforme a los lineamientos de la ISO 55000. Gomaa (2024) enfatiza que este enfoque permite conectar la planificación estratégica con la disponibilidad operativa mediante políticas de mantenimiento centradas en el desempeño técnico y económico del activo. Para la Armada Nacional, esta visión implica el desarrollo de una infraestructura interoperable que combine SCADA, PLC y SISCP-C, y que respalde una gestión técnica basada en confiabilidad, utilizando estándares nacionales como la UNE 16646 y la UNE 17007, con el objetivo de extender la vida útil de los sistemas críticos mediante decisiones informadas y oportunas.

Antecedentes de la investigación

Este capítulo presenta una revisión crítica de la evolución conceptual, normativa y tecnológica de la gestión de activos físicos y del mantenimiento predictivo y prescriptivo. Se abordan los avances globales y nacionales en la aplicación de estándares como ISO 55000 e ISO 14224, así como la integración de tecnologías como SCADA, IoT y analítica de datos. Además, se identifican vacíos de conocimiento relevantes en contextos complejos como el naval, con énfasis en la Armada Nacional de Colombia.

Evolución histórica y normativa de la gestión de activos físicos

La evolución de la gestión de activos físicos ha transitado desde enfoques operacionales centrados en la ejecución táctica del mantenimiento, hacia modelos sistémicos con fundamento en principios estratégicos, de valor y riesgo. Esta transformación ha sido consolidada mediante normativas internacionales como la familia ISO 55000, que establece lineamientos para integrar la operación, el mantenimiento y el análisis financiero de los activos

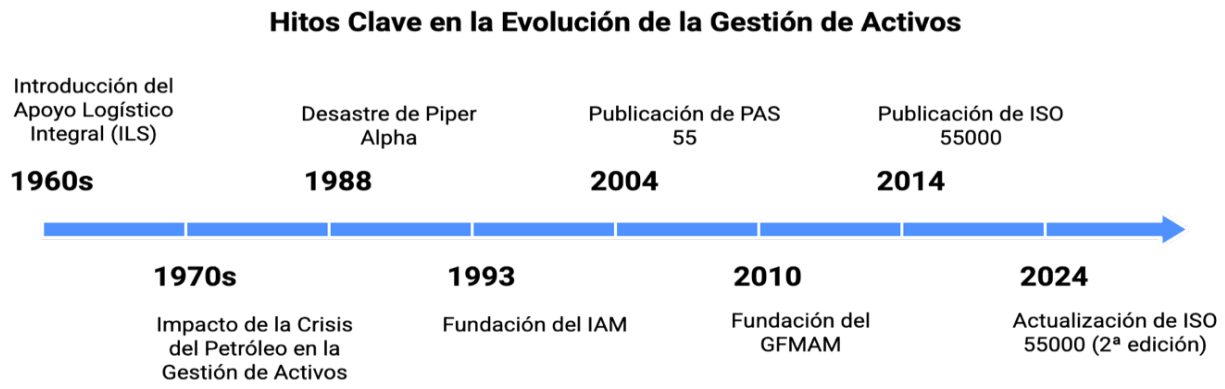
a lo largo de su ciclo de vida. La aplicación de este marco normativo en sectores industriales ha demostrado una mejora en la toma de decisiones técnicas y económicas, así como una reducción significativa de costos operacionales, como señalan Da Silva y De Souza (2021) y Antonenko (2023). Dichas mejoras se logran mediante la estandarización de procesos y la adopción de prácticas que permiten alinear los activos con los objetivos institucionales a través de indicadores cuantificables.

Este proceso de madurez normativa tuvo su génesis en modelos previos como el Apoyo Logístico Integrado (ILS) y la norma PAS 55, que permitieron formalizar una visión centrada en la mantenibilidad y el desempeño de los activos desde su fase de diseño. Investigaciones recientes han reafirmado el valor de estos enfoques al demostrar que la implementación efectiva de modelos de gestión de mantenimiento puede cumplir los requisitos de la ISO 55000 y mejorar la rentabilidad del negocio, como lo evidencian Parra et al. (2020) y Polimac & Polimac (2016). En el contexto colombiano, estas directrices han sido progresivamente adoptadas por sectores estratégicos como defensa y energía, aunque persisten brechas en su implementación efectiva.

Esta evolución histórica y normativa se sintetiza en la Figura 2, la cual presenta de manera cronológica los hitos clave que marcaron la transformación de la gestión de activos físicos desde enfoques logísticos hasta modelos integrales de valor, riesgo y desempeño.

Figura 2

Línea de tiempo evolución de la gestión de activos



Nota. Elaboración propia mediante IA con la herramienta Napkin. Representa la jerarquía taxonómica de objetivos en la gestión de activos.

La incorporación de metodologías estructuradas de mantenimiento ha evolucionado desde prácticas reactivas hacia modelos proactivos y predictivos. En particular, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) ha sido ampliamente validado como una metodología efectiva para priorizar tareas de mantenimiento con base en la función del activo y las consecuencias de sus fallas. La literatura reciente ha destacado que la integración del RCM con normativas como ISO 55000 permite articular una gobernanza técnica sólida basada en datos confiables (Ihemegbulem & Baglee, 2020). Esta evolución conceptual se articula con tecnologías emergentes como SCADA, IoT y sistemas de analítica avanzada, que permiten la captura continua de variables críticas.

Con el advenimiento de la Cuarta Revolución Industrial, ha emergido un nuevo paradigma conocido como Mantenimiento 4.0, el cual integra sensores IoT, inteligencia artificial y sistemas ciberfísicos para habilitar procesos predictivos en tiempo real. Este enfoque se ha materializado en la industria naval mediante el uso de gemelos digitales y arquitecturas distribuidas SCADA/PLC, que facilitan una representación continua del comportamiento de los activos. Estudios recientes han documentado aplicaciones exitosas en sistemas de control de

centros eléctricos, donde se emplean indicadores integrados en tiempo real para gestionar de forma proactiva el mantenimiento de infraestructuras críticas (Valencia & Pinzón, 2021; Sepe et al., 2022).

Emergencia del mantenimiento digital y predictivo

Paralelamente, el mantenimiento prescriptivo ha comenzado a consolidarse como una estrategia que no solo predice fallos, sino que sugiere acciones específicas a ejecutar antes de que ocurran, considerando múltiples restricciones (Sala et al., 2022). Este modelo se apoya en procesos ETL, inteligencia de negocios (BI) y técnicas como Monte Carlo y machine learning, que permiten desarrollar capas analíticas de tipo descriptivo, diagnóstica, predictiva y prescriptiva. Investigaciones aplicadas en el ámbito industrial han demostrado que estos modelos optimizan la planificación del mantenimiento y reducen la incertidumbre operativa, particularmente cuando se alinean con marcos como ISO 55001 e ISO 14224 (Sepe et al., 2022; Silva et al., 2024).

No obstante, la integración efectiva de estos enfoques en organizaciones complejas como las fuerzas navales continúa enfrentando barreras técnicas y organizativas. Una de las principales limitaciones identificadas en la literatura es la fragmentación de datos entre plataformas como SAP PM, hojas de cálculo y sistemas SCADA, lo cual limita la trazabilidad y la calidad del análisis. Esta situación ha sido agravada por factores como la baja calidad de registros, silos de información y ausencia de procesos estructurados de análisis, especialmente en entornos con alta criticidad operativa como el naval (Villamil, 2021). Por su parte, Antonenko (2023); Ihemegbulem & Baglee (2020) y Suryadarma & Ai (2020), coinciden en que la implementación de la ISO 55000 requiere, además de políticas claras, un rediseño de la arquitectura de datos y una transformación de los procesos de mantenimiento, orientados hacia una cultura institucional basada en el valor y la confiabilidad técnica.

La transición hacia enfoques de mantenimiento predictivo y prescriptivo ha sido catalizada por el desarrollo de arquitecturas analíticas capaces de procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real. Esta transformación ha sido posible gracias a la proliferación de tecnologías como sistemas SCADA, sensores IoT, controladores lógicos programables (PLC), plataformas CMMS y sistemas ERP como SAP PM, que generan continuamente datos críticos sobre el comportamiento y desempeño de los activos (Mora-Gutiérrez, 2022). Estas arquitecturas se estructuran mediante procesos ETL (extracción, transformación y carga), motores de inteligencia de negocios (BI) y capas analíticas que abarcan desde la descripción hasta la prescripción del comportamiento de los activos. En este entorno, la trazabilidad de datos adquiere un rol central para garantizar la confiabilidad de las decisiones técnicas. Estudios recientes han demostrado que la incorporación de modelos de aprendizaje automático y simulaciones estocásticas permite anticipar modos de falla y optimizar las tareas de mantenimiento, fortaleciendo así la sostenibilidad operativa de las organizaciones industriales (Sepe et al., 2022; Maherdianta et al., 2019).

En el ámbito industrial, la adopción de sistemas SCADA y sensores IoT ha posibilitado la supervisión remota y en tiempo real del estado de los activos. Estos datos, al ser procesados mediante algoritmos cognitivos, permiten construir modelos dinámicos de predicción, como los gemelos digitales, que simulan el comportamiento físico y funcional de los sistemas. La integración de estas tecnologías ha mejorado los índices de disponibilidad y confiabilidad, al reducir eventos de parada no programada y maximizar la vida útil de los equipos. La literatura destaca que el uso de gemelos digitales híbridos, apoyados en plataformas SCADA y PLC, optimiza la precisión diagnóstica y permite la adaptación continua del mantenimiento a condiciones operativas variables (Unal et al., 2022).

La incorporación de la norma ISO 55000 ha redefinido las estrategias de mantenimiento desde una perspectiva sistémica, orientada al valor y al riesgo. Su implementación exige la integración de prácticas como el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), la gestión

de la información de activos (AIM) y la planificación basada en ciclos de vida. Investigaciones realizadas en plantas industriales y empresas públicas han evidenciado que la adopción estructurada de esta norma mejora la eficiencia operativa y la toma de decisiones estratégicas, al proporcionar un marco común para la alineación entre mantenimiento, finanzas y operaciones (Parra et al., 2020; Antonenko, 2023). No obstante, persisten barreras relacionadas con la interoperabilidad de datos y la madurez organizacional en la gestión por procesos.

Contexto aplicado en la Armada Nacional de Colombia

En el contexto naval, y específicamente en organizaciones como la Armada Nacional de Colombia, se ha avanzado en la formalización doctrinal del mantenimiento mediante manuales y directrices alineadas con los principios de la ISO 55000. El modelo de referencia MRS (Mantenimiento, Reparación y Suministro) ha sido históricamente adoptado para conservar la operatividad de unidades estratégicas, como fragatas misileras, y ha sido replicado en diversas plataformas navales como marco metodológico predominante (Armada Nacional, 2022).

Sin embargo, la aplicación práctica de estos lineamientos enfrenta retos asociados a la fragmentación entre sistemas de información como SAP PM y hojas de cálculo independientes. Esta desconexión limita la trazabilidad y dificulta la consolidación de una arquitectura de datos que soporte decisiones basadas en evidencia. Estudios de caso en sectores logísticos y educativos confirman que los obstáculos más frecuentes para implementar ISO 55000 son la calidad de los datos, la cultura organizacional y la falta de metodologías claras para traducir los requisitos normativos en acciones concretas (Ihemegbulem & Baglee, 2020; Albalghouni et al., 2017).

Diversos modelos de gestión del mantenimiento han intentado responder a estos desafíos mediante la integración de plataformas de gestión de activos empresariales (EAM), como SAP PM, con sistemas de análisis de desempeño de activos (APM). Esta convergencia

permite articular funciones como monitoreo de condición, análisis de criticidad y programación automática de intervenciones. La evidencia empírica muestra que esta sinergia mejora los indicadores de efectividad global de los equipos (OEE) y reduce la frecuencia de paradas no planificadas. En particular, se ha demostrado que la alineación entre EAM y APM bajo los lineamientos de ISO 55001 incrementa la madurez organizacional y la eficacia del mantenimiento proactivo (Maherdianta et al., 2019).

A pesar de estos avances, la aplicación de herramientas analíticas y marcos normativos sigue mostrando brechas significativas, especialmente en la consolidación de un ecosistema integrado de gestión de activos. La revisión de estudios realizados en empresas del sector ferroviario y energético revela que muchas organizaciones aún carecen de una estructura formal que permita traducir los requerimientos de la ISO 55000 en procesos operativos eficaces. Las principales debilidades identificadas incluyen la ausencia de indicadores clave de desempeño, la falta de gobernanza de datos y la resistencia al cambio en equipos operativos. Estas limitaciones dificultan el desarrollo de capacidades predictivas robustas y obstaculizan la evolución hacia un modelo de mantenimiento inteligente, interconectado y sostenible (Ali, 2021; Antonenko, 2024).

La transformación digital de los sistemas de mantenimiento en el sector naval implica más que la simple adopción de nuevas tecnologías: requiere una reconfiguración profunda de procesos, personas y modelos de gobernanza. Para lograr una implementación sostenible, deben superarse desafíos como la fragmentación de datos, la falta de interoperabilidad entre sistemas, como, por ejemplo: SCADA, SAP, hojas de cálculo; y la carencia de metodologías que alineen la digitalización con estándares internacionales como ISO 14224 e ISO 55000. Modelos recientes sugieren que una arquitectura basada en entornos integrados como el Unified NameSpace (UNS) puede facilitar el intercambio de datos en tiempo real, potenciando la toma de decisiones en todos los niveles organizacionales (Velandia, 2023; Fernández et al., 2025).

En particular, la norma ISO 14224 ha sido destacada por su utilidad en la estructuración y categorización de datos de mantenimiento, permitiendo una mayor confiabilidad en el análisis de fallas y riesgos. Su integración con plataformas de analítica avanzada y software ERP permite la construcción de indicadores agregados de riesgo operacional, fortaleciendo la seguridad y la rentabilidad de las operaciones industriales y navales (Ciliberti et al., 2019). No obstante, persisten brechas en la calidad de los datos y en la implementación sistemática de esta norma, especialmente cuando se trata de registrar y diferenciar causas humanas de fallo (Selvik & Bellamy, 2020).

En paralelo, las experiencias de transformación digital en organizaciones como la Royal Navy demuestran que el éxito de estos procesos depende de la creación de un ecosistema de soporte integrado, donde el personal técnico tenga acceso continuo a información relevante, actualizada y estructurada. El modelo MarSIX, por ejemplo, busca desarrollar un repositorio único y configurado de datos interrelacionados, cuyo propósito es empoderar a los mantenedores y aumentar la disponibilidad y seguridad de las plataformas navales (Bolton et al., 2018).

Los enfoques de ingeniería digital impulsados por el Departamento de Defensa de EE.UU. también ofrecen una hoja de ruta para integrar modelos digitales en todo el ciclo de vida de los activos, desde el diseño hasta su desecho. Esta estrategia busca consolidar una fuente autorizada de datos y modelos que permita una ingeniería colaborativa y decisiones más ágiles y fundamentadas (Zimmerman et al., 2019). Para que estos modelos sean efectivos, es necesario asegurar mecanismos sólidos de gobernanza de datos, incluyendo protocolos de interoperabilidad, auditorías de calidad de información y control sobre fuentes de datos primarias.

Estudios previos internacionales relevantes

El trabajo de Parra et al. (2020) tuvo como objetivo integrar el modelo de gestión de mantenimiento con los requisitos de la norma ISO 55000, demostrando que una adecuada implementación puede mejorar la toma de decisiones y reducir costos operativos. La metodología fue de tipo cualitativa, basada en revisión documental y análisis comparativo de estándares. Los autores concluyen que el enfoque propuesto permite alinear las operaciones con los objetivos estratégicos mediante una mejor estructuración de procesos y control de activos. Sin embargo, el estudio no aborda de manera específica cómo esta integración puede aplicarse en contextos operativos complejos como el sector naval.

Ihemegbulem y Baglee (2020) analizaron las barreras para la implementación de ISO 55000 en pequeñas y medianas empresas (PYMEs). El estudio se desarrolló mediante entrevistas semiestructuradas a gerentes de activos y personal de mantenimiento. Los resultados indican que, aunque la norma es beneficiosa, existen limitaciones significativas relacionadas con la falta de recursos, capacitación técnica y resistencia al cambio. El análisis reveló que no existe un enfoque adaptativo para contextos con infraestructuras críticas, como las del sector defensa, donde los activos deben mantenerse con alta confiabilidad operacional.

Sepe et al. (2022) propusieron un marco analítico para mantenimiento predictivo en turbomáquinas, combinando machine learning y modelos de riesgo. Utilizaron una metodología cuantitativa que incluyó el desarrollo de modelos de predicción del estado de salud de los activos en tiempo real. El estudio evidenció que la predicción de fallas basada en datos puede optimizar los intervalos de mantenimiento y maximizar la disponibilidad. No obstante, no se presenta una aplicación práctica de este enfoque en activos militares o navales, donde el entorno operativo añade restricciones particulares.

Da Silva y De Souza (2021) desarrollaron un marco de gestión de mantenimiento basado en las directrices de la serie ISO 55000, empleando modelado de procesos mediante notación BPMN. El diseño metodológico fue conceptual, con validación a través de

herramientas de apoyo a la implementación. El estudio ofrece un aporte metodológico valioso para la estructuración de procesos de mantenimiento. Sin embargo, el marco no considera explícitamente la integración de tecnologías digitales (como SCADA o gemelos digitales), fundamentales para sistemas modernos de mantenimiento basado en datos.

Ciliberti et al. (2019) exploraron la combinación de la norma ISO 14224 con análisis de big data y software ERP en industrias de alto riesgo, como petróleo y gas. A través de un enfoque de caso, los autores mostraron cómo el modelado relacional de datos de fallos permite construir una visión de riesgo operativo en tiempo real. Pese a su potencial, el estudio no aborda la interoperabilidad entre sistemas técnicos y logísticos en ambientes restringidos como el naval, donde las decisiones deben sustentarse con trazabilidad total de la información.

En conjunto, estos estudios demuestran avances importantes en la integración de estándares ISO con modelos de mantenimiento avanzado y herramientas digitales. Sin embargo, dejan sin resolver aspectos clave relacionados con la aplicación práctica en entornos militares o navales, donde la interoperabilidad entre plataformas (como SAP PM, SCADA y sensores IoT), la trazabilidad de la información y la sostenibilidad operacional presentan desafíos únicos. La presente tesis busca llenar este vacío, proponiendo un modelo estructurado y tecnológicamente integrado para la Armada Nacional de Colombia, alineado con las normativas ISO 55000 e ISO 14224, y habilitado por analítica de datos para la toma de decisiones en mantenimiento predictivo y prescriptivo.

Estado del arte

El presente estado del arte tiene como propósito examinar críticamente la producción científica reciente (2020–2025) sobre la integración de modelos predictivos y prescriptivos de mantenimiento en entornos industriales y navales. Se analizan enfoques que combinan normativas internacionales como ISO 55000 e ISO 14224 con tecnologías habilitadoras como sistemas SCADA, IoT, gemelos digitales y analítica avanzada. A través de una revisión

comparativa de estudios internacionales y nacionales, se identifican los objetivos, metodologías y resultados más relevantes, así como las limitaciones prácticas en la implementación de estos modelos en contextos complejos. Esta revisión proporciona las bases conceptuales y técnicas para justificar la necesidad de un modelo adaptado a las condiciones operativas de la Armada Nacional de Colombia.

En los últimos veinte años, la gestión del mantenimiento naval ha dejado atrás esquemas reactivos y programaciones rígidas para adoptar estrategias orientadas por datos, impulsadas por tecnologías emergentes. La incorporación de sensores IoT, sistemas SCADA/PLC y plataformas CMMS ha posibilitado la captura y procesamiento continuo de grandes volúmenes de datos operativos, lo cual redefine la manera en que se supervisa y mantiene la funcionalidad de los activos navales. Este tránsito no ha sido meramente tecnológico, sino estructural, al establecer un modelo de toma de decisiones fundamentado en evidencia cuantificable. En coherencia con la agenda Shipping 4.0, este cambio ha sido vinculado con mejoras en la confiabilidad, eficiencia y disponibilidad operativa de los buques. No obstante, Kalafatelis et al. (2025) advierten que esta transformación requiere no solo infraestructura tecnológica, sino también cambios organizacionales que garanticen interoperabilidad entre sistemas, gobernanza de datos y competencias técnicas en los equipos de mantenimiento.

Paralelamente al avance tecnológico, la adopción de marcos normativos internacionales como ISO 55000, ISO 14224 y UNE EN 15341 ha permitido estandarizar la recolección, clasificación y análisis de datos de desempeño en sistemas de mantenimiento. Esta estandarización ha sido fundamental para facilitar la convergencia entre la gestión de activos físicos y las estrategias de mantenimiento predictivo, al proporcionar un lenguaje común y criterios comparables para evaluar la condición de los equipos. Daya & Lazakis (2024) evidencian que esta alineación normativa adquiere mayor valor cuando se articula con enfoques híbridos que combinan modelos de confiabilidad como los árboles de fallos dinámicos

(DFTA) y las redes bayesianas con algoritmos de machine learning. Esta integración mejora la capacidad para detectar fallas tempranas o estimar la vida útil remanente de los activos, y permite clasificar la criticidad operativa de cada componente con mayor precisión, optimizando la asignación de recursos y consolidando decisiones de mantenimiento basadas en riesgo y evidencia cuantificable.

En el ámbito de defensa, la Armada Nacional de Colombia junto con la Corporación COTECMAR han propuesto una estrategia de transición hacia un modelo de Mantenimiento 5.0, fundamentado en la integración de analítica avanzada, gemelos digitales e infraestructura IoT. Esta visión busca no solo incrementar la disponibilidad operativa de las plataformas navales, sino también garantizar su sostenibilidad a largo plazo mediante decisiones informadas y técnicamente trazables. El estudio prospectivo desarrollado por el Grupo DIMA UIS y COTECMAR (Cuervo et al., 2025) identifica múltiples desafíos estructurales para esta transformación, incluyendo la necesidad de armonizar marcos normativos, superar barreras tecnológicas de interoperabilidad entre sistemas legados y formar competencias digitales especializadas en el personal técnico. Además, se plantea que esta transición abre un campo fértil de investigación aplicada para la academia, especialmente en áreas como arquitectura de datos, gobernanza digital y simulación de escenarios críticos para el mantenimiento naval.

Integración de sistemas SCADA, PLC, sensores y HMI

En escenarios operativos de alta complejidad como el sector naval, la supervisión y el control en tiempo real de los activos técnicos dependen de una arquitectura integrada compuesta por sistemas SCADA, controladores lógicos programables (PLC), sensores distribuidos e interfaces hombre-máquina (HMI). Esta infraestructura constituye el núcleo de los sistemas de automatización embarcados, permitiendo la adquisición continua y fiable de variables críticas como presión, temperatura, vibración y niveles de fluidos. Golovan et al. (2024) sostienen que la convergencia de estas tecnologías con plataformas IoT y gemelos

digitales representa un avance disruptivo en la modernización del mantenimiento naval, ya que permite no solo el monitoreo remoto en tiempo real, sino también la simulación de escenarios de falla y la centralización de datos tradicionalmente fragmentados. No obstante, su implementación efectiva exige resolver desafíos de interoperabilidad técnica, sincronización semántica entre sistemas heterogéneos y estandarización de protocolos de comunicación para garantizar una trazabilidad operativa robusta.

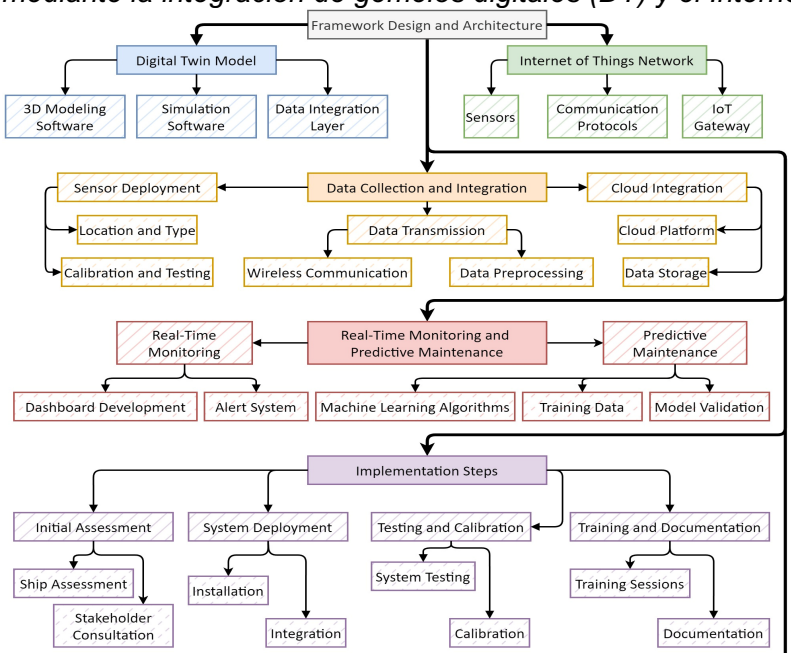
La adopción de sensores distribuidos, redes IoT y arquitecturas HMI embebidas ha permitido superar limitaciones históricas en los sistemas navales, como la desconexión entre subsistemas y la escasa interoperabilidad técnica. Estos elementos conforman una infraestructura distribuida que viabiliza la recopilación y transmisión continua de datos operativos clave. En este ecosistema, los controladores lógicos programables (PLC) funcionan como nodos de control autónomo, capaces de ejecutar rutinas de mantenimiento y operación en función de condiciones dinámicas, mientras que los sistemas SCADA centralizan la información capturada para su monitoreo y análisis. Mora-Gutiérrez (2024) destaca que esta arquitectura constituye la base tecnológica sobre la cual es posible construir capacidades de mantenimiento basado en condición, así como modelos predictivos más sofisticados mediante gemelos digitales, integrando así monitoreo físico con simulación funcional. Sin embargo, lograr esta integración requiere armonizar protocolos de comunicación, estandarizar ontologías de datos y asegurar mecanismos de sincronización entre sistemas físicos y virtuales.

La progresiva convergencia entre gemelos digitales e infraestructuras IoT ha generado nuevas arquitecturas funcionales para el mantenimiento predictivo en plataformas navales. Estas soluciones integradas permiten representar digitalmente el comportamiento dinámico de los sistemas físicos, mientras capturan, procesan y analizan datos operacionales en tiempo real mediante sensores, protocolos de comunicación y algoritmos de aprendizaje automático. En la Figura 3 se presenta un marco comprensivo que ilustra la interacción entre los componentes tecnológicos clave de este enfoque, desde el modelado digital y la recopilación de datos hasta

la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo basadas en monitoreo continuo y validación algorítmica.

Figura 3

Marco comprensivo para mejorar el intercambio de información en el mantenimiento naval mediante la integración de gemelos digitales (DT) y el Internet de las Cosas (IoT).



Nota. La ilustración muestra una arquitectura integrada donde los sistemas SCADA, los controladores PLC, los sensores y la interfaz HMI permiten una supervisión técnica distribuida, facilita el monitoreo en tiempo real y el mantenimiento basado en condición. Este enfoque mejora la interoperabilidad de los subsistemas, habilita el análisis predictivo y centraliza datos operativos históricamente fragmentados Fuente: Adaptado de Golovan, A., Sokolov, M., & Abramov, A. (2024). Digital twin concept and technologies: Applications in predictive maintenance of naval systems. Electronics, 12(1943), 1–18. https://doi.org/10.3390/computers13100261

ETL, BI, Predictive y Prescriptive Analytics

El enfoque Data-Driven Maintenance (DDM) ha es uno de los pilares de la transformación digital del mantenimiento industrial, más relevantes, porque se basa en la extracción sistemática de valor a partir de grandes volúmenes de datos generados por sistemas técnicos heterogéneos. Este paradigma requiere arquitecturas robustas de tratamiento de datos, fundamentadas en procesos ETL (extracción, transformación y carga), que permiten

estructurar, depurar y alinear la información capturada desde sensores, sistemas SCADA y plataformas CMMS para su posterior explotación mediante motores de inteligencia de negocios (Mora-Gutiérrez, 2024). La eficacia de este enfoque radica en su capacidad para convertir datos fragmentados en información operacionalmente útil, habilitando la automatización de decisiones de mantenimiento.

Southgate (2024) destaca que una arquitectura analítica madura debe contemplar no solo la analítica descriptiva y diagnóstica, sino también la analítica predictiva, basada en modelos de aprendizaje automático, lógica difusa y simulaciones estocásticas como Monte Carlo. Estos modelos permiten anticipar modos de falla y estimar la degradación progresiva de componentes críticos, mejorando la asignación de recursos y la programación de intervenciones. Por su parte, la analítica prescriptiva, al integrarse con modelos de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD), proporciona recomendaciones operativas que consideran restricciones técnicas, logísticas y financieras, y además permiten diseñar estrategias de mantenimiento adaptativas y contextualizadas.

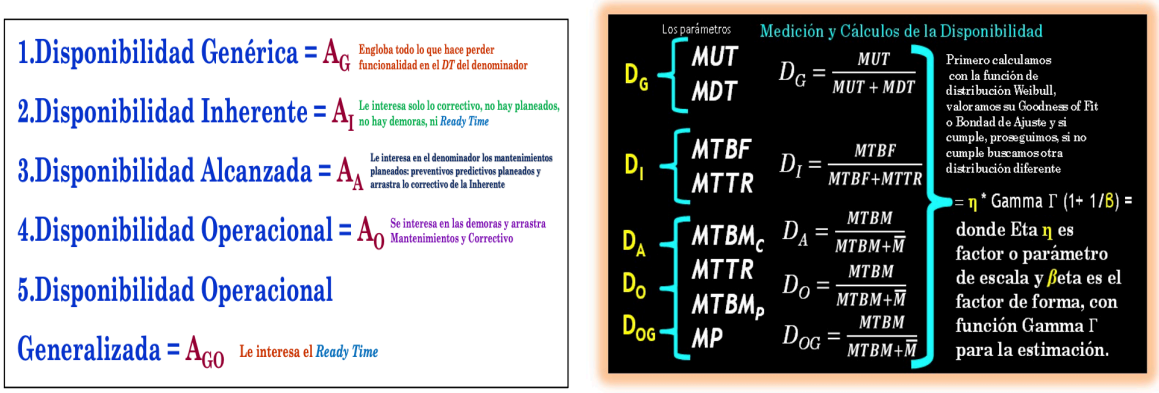
Esta evolución hacia un mantenimiento analítico redefine su papel dentro de las organizaciones, al pasar de una función operativa a un componente estratégico de alto valor. Golovan et al. (2024) subrayan que, en contextos como el naval, la analítica avanzada permite reducir los costos, tiempos de inactividad y también permite sustentar decisiones tácticas bajo condiciones de incertidumbre, incrementar la disponibilidad operativa y asegurar la alineación de los recursos de mantenimiento con los objetivos institucionales. No obstante, alcanzar estos beneficios implica superar retos asociados a la gobernanza del dato, la interoperabilidad entre sistemas, la capacitación técnica del personal encargado de implementar y operar estas soluciones.

Uso de CMD, MTBF, MTTR y disponibilidad)

El análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad se ha consolidado como uno de los pilares cuantitativos más robustos para evaluar y optimizar el desempeño de sistemas críticos embarcados, particularmente en el contexto naval. Indicadores como el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR) y la disponibilidad operativa (A_o) no solo permiten describir la eficiencia técnica en tiempo real, sino que también ofrecen insumos clave para predecir el comportamiento futuro del sistema y priorizar intervenciones correctivas. Gharib & Kovács (2024) han demostrado que el monitoreo continuo de estos indicadores en motores diésel marinos puede guiar ajustes tácticos en la planificación del mantenimiento, maximizando la confiabilidad bajo condiciones operativas exigentes.

Figura 4

Caracterización estándar del análisis CMD aplicado a disponibilidad técnica



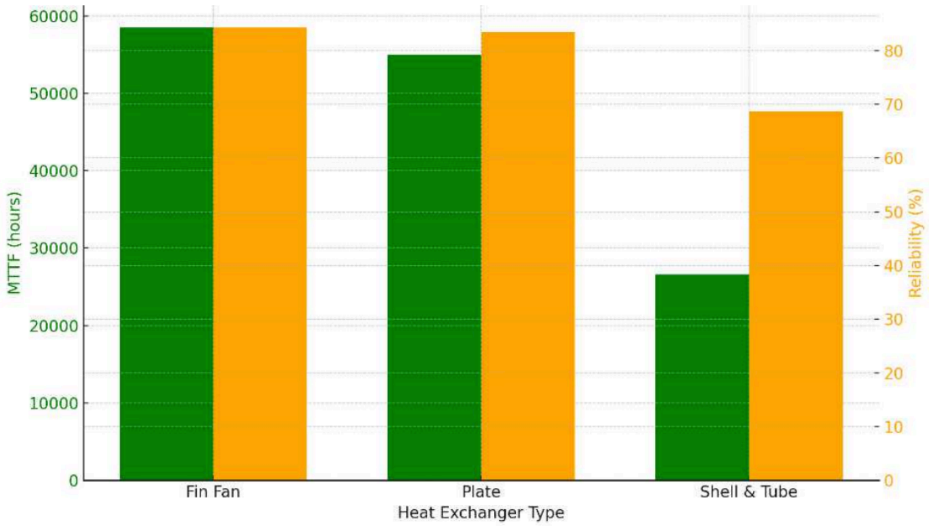
Nota. La figura presenta las fórmulas utilizadas para calcular los distintos niveles de disponibilidad (genérica, inherente, alcanzada, operacional y generalizada), incorporando parámetros como MUT, MDT, MTBF y MTTR. Estas métricas permiten modelar comportamientos de falla con funciones estadísticas como Weibull o Gamma, y proporcionan la base para decisiones de mantenimiento fundamentadas en evidencia. Fuente: Adaptado de Villamil (2022).

El uso contemporáneo de indicadores CMD ha superado el enfoque estático tradicional, integrando estos datos en plataformas digitales que permiten su visualización dinámica en tableros de control y modelos de gemelos digitales. Esta evolución ha convertido al MTBF y al

MTTR en variables activas dentro de sistemas predictivos, donde los datos se recogen en tiempo real desde sensores, SCADA y PLC, y son procesados mediante algoritmos que reajustan continuamente los planes de mantenimiento. Según el Reliability & Maintainability Engineering Guidebook del SECNAV (Glenn et al., 2022), estos indicadores deben ser enlazados con análisis de sensibilidad, criticidad y riesgo, con el fin de capturar incertidumbres, priorizar inversiones y mejorar la confiabilidad a lo largo del ciclo de vida del activo.

Figura 5

Comparación de MTTF y fiabilidad (%) para tres tipos de intercambiadores de calor (Fin fan, Plate y Shell & Tube) empleados en motores diésel marinos.



Nota. Esta figura muestra cómo los indicadores CMD, como el MTTF y la confiabilidad, permiten evaluar el comportamiento operativo de distintos diseños de intercambiadores de calor. Este tipo de análisis contribuye a optimizar decisiones de mantenimiento basado en condición cuando se integran en plataformas digitales como SCADA, tableros de control y gemelos digitales. Fuente: Adaptado de Gharib & Kovács (2024, Fig. 4).

La adopción sistemática de métricas CMD en combinación con herramientas de análisis de riesgo y cuadros de mando de mantenimiento ha demostrado resultados concretos en entornos navales. Estudios recientes confirman que este enfoque mejora significativamente la planificación logística de repuestos, reduce el tiempo de inactividad no programada y fortalece la disponibilidad de plataformas estratégicas, incluso en escenarios operativos severos (Gharib

& Kovács, 2024). Esta evidencia respalda la necesidad de articular modelos analíticos con fuentes confiables de datos técnicos, asegurando que las decisiones de mantenimiento estén alineadas con la realidad operacional y los objetivos institucionales.

Uso Aplicación de modelos RAM y metodologías como RCM y FMECA

Los modelos de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM) permiten representar de forma estructurada el comportamiento técnico de los sistemas, considerando aspectos como la degradación progresiva, las interdependencias funcionales y los modos de falla asociados. En el ámbito naval, la aplicación del Análisis de Modo y Efecto de Falla con Evaluación de Criticidad (FMECA) ha sido particularmente útil para priorizar fallos en sistemas críticos como los motores principales, mediante el uso de técnicas de monitoreo de condición combinadas con lógica difusa y redes neuronales artificiales. Zaman et al. (2021) demostraron que la integración de FMECA con análisis predictivo basado en aprendizaje automático permite diagnosticar el estado del motor y anticipar desviaciones en variables operativas clave, como la temperatura de gases de escape, lo cual facilita una planificación preventiva precisa y validada empíricamente.

Complementariamente, el enfoque de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) ha ganado relevancia como herramienta analítica para la selección de estrategias óptimas, al considerar la función del activo, la severidad de sus fallas y las consecuencias operacionales derivadas. Tripathi & Hari Prasad (2024) muestran que la combinación de RCM con algoritmos genéticos y técnicas de modelado estocástico, como las cadenas de Markov, permite optimizar la programación del mantenimiento en motores diésel marinos, incrementando la disponibilidad y reduciendo los costos operativos de manera cuantificable de ahí, que surge la necesidad de vincular modelos RAM con capacidades analíticas avanzadas que integren simulación, optimización y gobernanza del riesgo en una misma arquitectura digital de mantenimiento.

Normativa internacional y marcos de referencia.

El uso de marcos normativos internacionales más que un respaldo documental es un componente estructural que garantiza la coherencia, comparabilidad y aplicabilidad de las propuestas metodológicas en el ámbito del mantenimiento avanzado. En esta investigación, el marco regulatorio desempeña tres funciones fundamentales: primero, otorga rigor conceptual al anclar los indicadores clave (MTBF, MTTR, disponibilidad, OEE) en definiciones universalmente aceptadas; segundo, permite transferir los hallazgos más allá del dominio naval, ya que normas como ISO 55000 o UNE 16646 son empleadas en sectores tan diversos como la energía, la minería o la manufactura; y tercero, actúa como puente operativo entre la investigación académica y la práctica organizacional, facilitando que las soluciones propuestas sean comprendidas, evaluadas e implementadas por actores técnicos, auditores y responsables regulatorios.

La Tabla 1 sintetiza las principales normas y marcos internacionales que sustentan esta investigación, agrupando sus características por alcance, aporte al mantenimiento y conceptos técnicos involucrados. Destacan, por ejemplo, la norma ISO 55000:2024, que redefine el ciclo de vida de los activos en clave de valor, riesgo y desempeño; y la ISO 14224, que proporciona una taxonomía rigurosa para el análisis de confiabilidad y mantenimiento basada en registros de fallas jerarquizados. Junto a estas, marcos como GFMAM Landscape o el estándar IAM Anatomy incorporan dimensiones institucionales, humanas y decisionales necesarias para lograr una madurez organizacional en la gestión de activos.

A diferencia de los enfoques exclusivamente operativos, esta estructura normativa promueve una gobernanza sistémica que trasciende la ejecución técnica del mantenimiento. Por ejemplo, la UNE EN 15341 clasifica indicadores según niveles estratégico, táctico y operativo, integrando métricas económicas y organizativas con variables de desempeño técnico. Asimismo, marcos como el SMRP y la UNE 16646 enfatizan la necesidad de integrar la gestión del mantenimiento dentro de la planificación de activos, priorizando la toma de

decisiones basada en riesgo y evidencias, alineando la ejecución con los objetivos organizacionales.

Este andamiaje normativo también fortalece la trazabilidad metodológica del estudio, al asegurar que los procesos analíticos (como los modelos de criticidad, los algoritmos de predicción y las capas de analítica prescriptiva) se alineen con buenas prácticas reconocidas internacionalmente. Lo anterior, mejora la validez interna del trabajo y permite la reproducción de resultados y la comparación entre organizaciones o sectores con estructuras similares de mantenimiento.

Tabla 1

Normas y marcos internacionales aplicables a la gestión de activos y mantenimiento

Norma / Marco	Ámbito y alcance	Aporte principal a la gestión de activos y mantenimiento	Indicadores / conceptos clave
ISO 55000 / 55002 (2024)	Todas las industrias; gestión integral de activos físicos, digitales y humanos	Define principios, terminología y guía de implementación (55002); integra estrategia, riesgo, desempeño	Valor del activo, ciclo PDCA, alineación estratégica
ISO 14224 (2016)	Datos de confiabilidad y mantenimiento en petróleo y gas; extrapolable a sector naval	Taxonomía jerárquica de activos, fallas y datos operativos	MTBF, MTTR, tasa de falla, modos de falla, criticidad
ISO/IEC 17007 (2020)	Normalización metaconceptual	Coherencia terminológica entre estándares	Definiciones unificadas de confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad
UNE 16646 (2015)	Integración del mantenimiento en la gestión de activos	Ciclo de vida y gobernanza del mantenimiento basada en riesgo	Planes de ciclo de vida, criticidad, competencias
UNE EN 15341 (2008)	Indicadores KPI de mantenimiento	Clasifica KPIs en niveles estratégico, táctico y operativo	MTBF, MTTR, OEE, coste de mantenimiento, backlog

GFMAM Asset Management Landscape (2014)	Marco global de autoevaluación institucional	39 áreas temáticas organizadas en 6 grupos clave	Madurez organizacional, estrategia, valor, activos e información
IAM Asset Management: An Anatomy (2015)	Guía práctica enfocada en valor y riesgo	Descompone la gestión de activos en procesos clave alineados con ISO 55000	Valor vs. riesgo, line of sight, alineación táctica-operativa
SMRP 5 Pillars Framework (2021)	Industria de mantenimiento y confiabilidad	Marco operativo en cinco pilares que enlazan desempeño técnico y gestión de activos	Desempeño, fiabilidad, gestión de inventarios, salud y seguridad

Nota. Elaboración propia. con base en ISO (2024, 2016, 2020), AENOR (2008, 2015), GFMAM (2014), IAM (2015) y SMRP (2021).

Casos de implementación en defensa y entorno naval

La gestión eficiente de activos en el sector naval es un factor crítico para garantizar la operatividad sostenida de las plataformas, especialmente en escenarios donde la confiabilidad técnica es clave para la misión. En este contexto, metodologías avanzadas como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) han sido adoptadas en múltiples armadas para fortalecer las capacidades predictivas, optimizar recursos y reducir el ciclo de vida de los activos. Esta sección analiza dos casos internacionales recientes y una iniciativa nacional emergente, con el fin de identificar aprendizajes relevantes y desafíos comunes.

En primer lugar, la Armada Española ha avanzado en la implementación del enfoque RCM al combinarlo con sistemas integrados de monitoreo, tales como el SICP (Sistema Integrado de Control de Plataforma) y el CESADAR (Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada). Estos sistemas permiten recolectar información operativa en tiempo real y soportar decisiones de mantenimiento basadas en condición (CBM). Según Saxena (2025), la sinergia entre RCM y análisis predictivo mediante IoT, algoritmos de falla y aprendizaje automático ha permitido mejorar la disponibilidad operativa de maquinaria crítica en buques y reducir fallos imprevistos mediante modelos adaptativos basados en patrones de deterioro.

Uno de los principales logros ha sido la implementación de modelos que integran Big Data con el sistema logístico GALIA, utilizado para diagnósticos remotos y programación automática de intervenciones. Esta transición, sin embargo, ha revelado limitaciones en la estandarización semántica y la interoperabilidad entre plataformas de mantenimiento y operaciones, lo que ha impulsado nuevas investigaciones en arquitectura de datos.

En segundo lugar, está la Armada de Chile, en su Plan LOG-2040, ha optado por una estrategia progresiva de implementación del RCM, combinando sensores IoT, SCADA y sistemas CMMS para migrar desde un modelo correctivo hacia uno predictivo. Kalghatgi (2022) destaca cómo la aplicación de tecnologías emergentes ha permitido anticipar fallos en componentes críticos como sistemas de propulsión y armas, además de reducir la frecuencia de paradas no programadas.

La experiencia chilena muestra que uno de los mayores retos es la consolidación de plataformas unificadas que integren los datos de toda la flota. A pesar de contar con capacidades de adquisición de datos, la arquitectura actual limita el análisis predictivo global y la toma de decisiones agregadas.

En el caso colombiano, el Plan de Desarrollo Naval 2042 contempla la implementación del Sistema Integrado de Supervisión y Control de Plataforma Colombiano (SISCP-C), el cual busca articular sensores embarcados, plataformas SCADA y software CMMS bajo una lógica de mantenimiento basado en datos. Este sistema tiene el potencial de convertirse en un núcleo habilitador del mantenimiento predictivo, al ofrecer capacidades de integración de datos y visualización operativa. No obstante, estudios recientes han señalado que sin un modelo claro de analítica avanzada y trazabilidad de eventos, la utilidad del sistema se ve restringida a la captura de datos pasiva (Pedraza & Guerrero, 2022).

Para que el SISCP-C evolucione hacia una herramienta estratégica de mantenimiento, se requiere fortalecer los mecanismos de interoperabilidad, estandarizar protocolos de comunicación y alinear sus métricas con los marcos ISO 55000 e ISO 14224.

Marco metodológico

Enfoque de la investigación

El enfoque de esta investigación es cuantitativo de tipo aplicado, con orientación explicativa, ya que busca verificar el sistema actual de gestión de mantenimiento en la Armada Nacional de Colombia a través del análisis futurístico de indicadores técnicos (KPI's y CMD) para optimizar la toma de decisiones. Se opta por este enfoque porque se basa en la recopilación, tratamiento y análisis de datos operativos y también históricos, con el fin de generar modelos predictivos y prescriptivos que permitan generar valor en la gestion eficiente de los activos en este caso, sobre los sistemas de propulsión de las unidades tipo OPV.

Este enfoque permite construir escenarios prospectivos a partir de modelos de simulación, como los de Monte Carlo, y aplicar técnicas de inteligencia artificial para el reconocimiento de patrones. Según Scott et al. (2022), en contextos de defensa, el enfoque cuantitativo es relevante porque sirve para asegurar la robustez de las decisiones operativas, especialmente cuando se depende de datos técnicos y ambientales en constante cambio para el diseño de estrategias de mantenimiento predictivo.

Ahora bien, es importante mencionar que se ha optado por este, debido a que la investigación requiere validar correlaciones entre variables críticas como el tiempo medio entre fallos (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR) y la disponibilidad técnica (Ao), cuya cuantificación solo es posible mediante el análisis numérico de registros operativos y de mantenimiento. Asimismo, se utilizará el modelado estadístico para construir escenarios hipotéticos con base en proyecciones, lo cual está alineado con los principios de la analítica prescriptiva. Como afirman Baker et al. (2020), el enfoque cuantitativo permite evaluar el retorno sobre la inversión (ROI) de la implementación de sistemas de mantenimiento predictivo, como los basados en Prognostics and Health Management (PHM), al considerar datos

históricos, simulados y en tiempo real para predecir fallos y optimizar los recursos de mantenimiento en activos críticos del sector defensa.

Tipo de estudio

La presente investigación se enmarca en los estudios de tipo aplicado con alcance explicativo, ya que pretende verificar el sistema actual de gestión de mantenimiento naval mediante herramientas analíticas avanzadas, fundamentadas en datos reales y modelos proyectivos. Este tipo de estudio se orienta a resolver problemas concretos en contextos operativos, en este caso, mejorar la disponibilidad y confiabilidad de las unidades de superficie de la Armada Nacional. De acuerdo con Lemerande (2020), cuando estos son aplicados en ambientes navales se enfocan en optimizar el ciclo de vida de los activos, integrando variables como disponibilidad operativa, capacidad técnica y costos de sostenimiento, lo cual requiere enfoques robustos de pronóstico que permitan la toma de decisiones basadas en evidencia.

En línea con lo anterior, el carácter explicativo de la investigación busca identificar y justificar las relaciones causales entre los componentes del mantenimiento naval (fallos, diagnósticos, tiempos de inactividad) y los indicadores clave de desempeño (KPI's y CMD). Se pretende verificar modelos que no solo predigan condiciones de fallo, sino que además prescriban acciones preventivas con base en escenarios prospectivos. Baker et al. (2020) señalan que este tipo de investigación se requieren para la implementación de sistemas CBM+ (Condition-Based Maintenance Plus), donde los modelos de diagnóstico y pronóstico permiten explicar cómo determinadas condiciones operativas y decisiones de mantenimiento afectan directamente la disponibilidad y el costo del ciclo de vida de sistemas complejos en defensa.

Diseño metodológico

El diseño metodológico adoptado es no experimental de tipo transversal con enfoque proyectivo y prescriptivo, orientado a la mejora de procesos mediante simulaciones de

escenarios futuros. En este caso, no se manipularán variables independientes de manera directa, sino que se observarán, modelarán y analizarán datos históricos y proyectados sobre el desempeño de activos navales. La metodología se estructura en fases que permiten analizar patrones de fallas, hacer uso de modelos de diagnóstico y pronóstico, además de prescribir acciones óptimas en función del comportamiento proyectado de indicadores clave (KPI's y CMD). Lemerande (2020) señala que en entornos navales, los diseños metodológicos con componentes proyectivos son cruciales para evaluar el impacto a largo plazo de las decisiones sobre disponibilidad y sostenibilidad de los activos, especialmente cuando se integran datos operacionales con modelos de ciclo de vida.

Este diseño permite incorporar herramientas como análisis Monte Carlo, aprendizaje automático y análisis de regresión múltiple, que facilitan la construcción de modelos predictivos y prescriptivos basados en datos empíricos. El objetivo es generar un marco lógico y computacional para optimizar decisiones de mantenimiento, priorizar recursos y elevar la disponibilidad técnica en unidades tipo OPV. Según Baker et al. (2020), el uso de metodologías proyectivas en el ámbito militar permite estructurar sistemas PHM (Prognostics and Health Management) que combinan datos históricos, en tiempo real y simulados para identificar fallos potenciales, diseñar estrategias de intervención y calcular retornos sobre la inversión (ROI) de manera cuantificable.

Población

La población objeto de esta investigación está constituida por los sistemas de propulsión, subsistemas críticos y estructuras de mantenimiento de las unidades tipo OPV (Ocean Patrol Vessel) que integran la Flota de Superficie de la Armada Nacional de Colombia. Esta definición poblacional se justifica porque dichos activos presentan condiciones operativas específicas, ciclos de mantenimiento regulados por estándares militares y una alta criticidad en su disponibilidad para la ejecución de operaciones. En este sentido, la población no se reduce

a individuos, sino a un conjunto estructurado de activos físicos cuya gestión impacta directamente la capacidad operativa de la Armada. Luxhøj (1991) afirma que, en sistemas logísticos a gran escala como los navales, la población puede ser modelada a través de agrupamientos representativos de componentes con características comunes, lo cual facilita el análisis estratégico de la disponibilidad y los costos de mantenimiento mediante modelos poblacionales dinámicos.

Adicionalmente, esta población incluye a las estructuras organizacionales responsables de la planificación, ejecución y supervisión del mantenimiento, como los Departamentos de Ingeniería de Flotilla, Comando de Apoyo Logístico y la Dirección de Mantenimiento Naval (DIMAN). Esto permite capturar variables relacionadas con prácticas operativas, capacidades técnicas, herramientas diagnósticas y métodos de gestión de información. Maholchic (1986) sostiene que la definición de población en estudios de mantenimiento naval debe considerar tanto los activos físicos como los sistemas de gestión contractual, ya que el análisis debe integrar datos técnicos y administrativos para generar inferencias válidas sobre el comportamiento global del sistema de mantenimiento.

Tipo de muestreo

La presente investigación empleará un muestreo intencional estratificado, dada la necesidad de seleccionar unidades representativas que presenten características críticas específicas, tanto en el comportamiento operativo como en los patrones de mantenimiento. Este tipo de muestreo permite identificar subsistemas o componentes dentro de las unidades OPV que concentran el mayor impacto sobre la disponibilidad global, la frecuencia de fallas y el costo de mantenimiento. Lemerande (2020) sustenta que el muestreo dirigido en contextos navales es vital para el desarrollo de modelos de pronóstico del ciclo de vida, ya que la variabilidad entre los activos puede distorsionar las inferencias si se usan métodos aleatorios simples sin segmentación operativa.

El estratificado asegura que se incluyan en la muestra tanto unidades con historial de mantenimiento eficiente como aquellas con mayor frecuencia de averías, permitiendo construir escenarios proyectivos robustos. Chen y Liu (2018) proponen un enfoque de muestreo basado en clustering y hashing de similitud, aplicado a activos de infraestructura, que permite conformar grupos con condiciones operativas comparables. Este método mejora la representatividad del análisis sobre el nivel de mantenimiento, superando la eficacia del muestreo aleatorio tradicional cuando se manejan múltiples tipos de activos críticos en una flota heterogénea.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La investigación se apoya en técnicas mixtas de recolección de datos, combinando registros históricos digitales, sensores abordo y entrevistas semiestructuradas con personal técnico. Los registros digitales incluyen reportes de mantenimiento, hojas de vida de equipos, bitácoras de falla e informacion cargada en el SAP PM. Estos datos alimentarán algoritmos para modelar patrones de falla y predecir eventos futuros. Según Baker et al. (2020), el enfoque más robusto para diagnosticar y predecir fallas en sistemas navales radica en el análisis integrado de múltiples fuentes de datos: sensores de condición, datos operacionales y reportes de expertos. Esta integración permite configurar arquitecturas de mantenimiento basadas en condiciones (CBM) de alta precisión. Menon y Tuladhar (2024) destacan que la incorporación de fuentes heterogéneas de datos estructurados y no estructurados son necesarios en entornos de mantenimiento predictivo, ya que posibilita el diseño de modelos prescriptivos que aumentan la confiabilidad y reducen los costos de operación de los activos militares.

Fuentes primarias y secundarias

Las fuentes primarias de esta investigación comprenden datos generados directamente a partir de sensores embarcados, sistemas de monitoreo de condición (CMS), entrevistas

técnicas y registros operacionales. Estas fuentes permiten analizar variables de desempeño clave como vibración, temperatura, consumo energético y tiempos entre fallas, fundamentales para modelar el comportamiento de los activos críticos en la Flotilla de Superficie. Tavakoli et al. (2023) destacan que las fuentes primarias en mantenimiento predictivo deben garantizar trazabilidad y veracidad mediante sistemas integrados, como los gemelos digitales y la tecnología blockchain, para sustentar decisiones operativas basadas en evidencia en tiempo real.

Las fuentes secundarias utilizadas incluyen bases de datos históricas de mantenimiento, manuales técnicos, procedimientos estandarizados de la DIMAN, documentos de auditoría logística, reportes institucionales y literatura científica relevante. Estas fuentes permiten triangular la información primaria y establecer patrones históricos de degradación, intervalos de mantenimiento y resultados de inspección. Manu et al. (2021) afirman que, en entornos complejos como la ingeniería naval, las fuentes secundarias permiten contextualizar datos primarios, y al ser debidamente evaluadas, aumentan la solidez del análisis al ampliar el horizonte histórico y validar inferencias analíticas.

Procedimiento (por objetivo específico en fases)

El procedimiento metodológico se desarrollará en fases alineadas con cada objetivo específico. Primera fase, se abordará el análisis normativo. Para ello, se revisarán documentos clave como las normas ISO 55000, ISO 55001, ISO 55002 y la UNE-EN 16646. El propósito será entender qué aspectos de estas normas pueden aplicarse directamente a la gestión de activos navales y cómo pueden fortalecer la toma de decisiones técnicas y estratégicas dentro de la organización.

La segunda fase estará enfocada en la identificación y análisis de los equipos críticos. Se definirán criterios técnicos y operativos para evaluar su nivel de importancia, y se utilizarán herramientas reconocidas como la ISO 14224, junto con metodologías como OREDA, EsReDA

y EIREDA. Además, se aplicará un enfoque integral que no solo evalúe lo técnico, sino que también considere la interacción con los equipos humanos y los procesos organizacionales.

En la tercera fase, se trabajará con los datos. Se desarrollará un proceso ETL (extracción, transformación y carga) para organizar la información de mantenimiento disponible. Una vez estructurados los datos, se aplicarán análisis descriptivos y predictivos, apoyados en herramientas como Power BI y simulaciones Montecarlo. Esto permitirá proyectar escenarios futuros, anticiparse a posibles fallas y mejorar la planificación del mantenimiento.

Por último, en la cuarta fase, se integrarán los principales hallazgos del trabajo. Se destacará cómo estos resultados pueden aportar valor a la gestión de activos de la Armada Nacional y servir como base para fortalecer la implementación del SISCP-C. El objetivo será dejar insumos claros y aplicables que faciliten una gestión más eficiente de los activos navales, con una visión estratégica y de largo plazo.

Consideraciones éticas y técnicas

El desarrollo de investigación aplicada en contextos militares, como la Armada Nacional de Colombia, exige un tratamiento ético diferenciado debido a las particularidades de jerarquía, obediencia institucional y exposición a entornos de alta criticidad. Migliore y Killian (2018) sostienen que las investigaciones con población militar deben incorporar salvaguardas adicionales de consentimiento informado, evitando coerción implícita y considerando la cultura institucional de disciplina vertical como factor de vulnerabilidad ética. En este estudio, se garantizará la anonimización de datos técnicos y personales, la participación voluntaria y la validación del protocolo por el Comité de Ética de la Armada. Adicionalmente, se empleará un consentimiento informado estandarizado que explicite que los participantes no están obligados por su rango o deber a participar.

Desde el punto de vista técnico, se deben mitigar riesgos asociados al uso de tecnologías sensibles, como sensores y algoritmos predictivos, que podrían generar

vulnerabilidades en la seguridad de la información naval. Villumsen et al. (2024) destacan que, en sistemas predictivos, los investigadores deben aplicar principios de explicabilidad y no maleficencia, asegurando que los modelos no generen falsas alarmas, diagnósticos incorrectos o consecuencias operativas indeseadas. En este estudio, se aplicarán protocolos de ciberseguridad para proteger la integridad de los datos del SISCP-C, se validarán los algoritmos con pruebas de sensibilidad y se documentarán sus resultados con trazabilidad completa. Además, se limitará el acceso a información crítica a perfiles autorizados por niveles de clasificación institucional.

Desarrollo

Objetivo 1 - Marco Normativo

Introducción al enfoque normativo y operativo

La gestión de activos físicos constituye una disciplina estratégica en organizaciones con alta dependencia tecnológica, como las fuerzas navales. Las normas ISO 55000 (2024), ISO 55001 (2024), ISO 55002 (2018) y UNE-EN 16646 (2015) estructuran un marco de referencia que permite alinear la gestión de activos con los objetivos institucionales mediante criterios de valor, riesgo y desempeño. Estas directrices han sido validadas y se ha evidenciado su impacto positivo sobre la eficiencia operativa y la toma de decisiones técnico-financieras (Farinha et al., 2023; Maletič et al., 2020). En el contexto nacional, Parra et al., (2020) demuestran la viabilidad de articular dichos estándares con modelos de mantenimiento existentes, mejorando así la rentabilidad y la calidad de las operaciones.

La serie ISO 55000 estandariza procesos y facilita la transición hacia una gobernanza técnica centrada en la confiabilidad y sostenibilidad del ciclo de vida del activo. En particular, la norma UNE-EN 16646 (2015) destaca la integración del mantenimiento desde la fase de diseño hasta la renovación o retiro, permitiendo una planificación proactiva de intervenciones. Su aplicación conjunta con sistemas SCADA e IoT fortalece los procesos de monitoreo continuo y análisis predictivo, habilitando decisiones prescriptivas sobre activos críticos (Da Silva & De Souza, 2020; Zahera & González-Prida, 2021). Esta capacidad de anticipación es clave para fuerzas como la Armada Nacional de Colombia, donde la disponibilidad técnica es una condición sine qua non para el cumplimiento de su misión constitucional (ISO 55000, 2024).

En términos operativos, la implementación de modelos de mantenimiento basados en la norma ISO 55001 (2024) permite estructurar un sistema de gestión integral, donde

indicadores como MTBF, MTTR y disponibilidad se integran a cuadros de mando para el análisis del desempeño técnico. Esto ha sido validado por experiencias aplicadas en sectores energéticos y de transporte, donde la implementación sistemática de la norma ha demostrado mejorar la madurez organizacional y reducir la variabilidad en la ejecución de tareas críticas (Valencia & Pinzón, 2021). Además, enfoques como el modelo MMFAM (Maintenance Management Framework for Asset Management) permiten operacionalizar los requisitos normativos mediante procesos normalizados, asegurando una trazabilidad efectiva a lo largo del ciclo de vida (Da Silva & De Souza, 2021).

En Colombia, la aplicación de estas normas ha sido respaldada por el trabajo técnico de instituciones públicas y privadas que han promovido su integración en sectores estratégicos, incluido el naval. Particularmente, en la Armada Nacional de Colombia, la implementación de prácticas alineadas con la ISO 55000 se ha orientado a fortalecer la interoperabilidad de plataformas tecnológicas, centralizar datos operativos y mejorar la capacidad de respuesta ante eventos no planificados. A este respecto, se ha documentado que marcos como el propuesto por Antonenko (2023) permiten construir ecosistemas de mantenimiento inteligentes, fundamentados en gestión de riesgos y simulación probabilística, mediante técnicas como Monte Carlo y machine learning. Estas capacidades analíticas, al integrarse con indicadores normalizados, posicionan al SISCP-C como una herramienta clave para la modernización institucional.

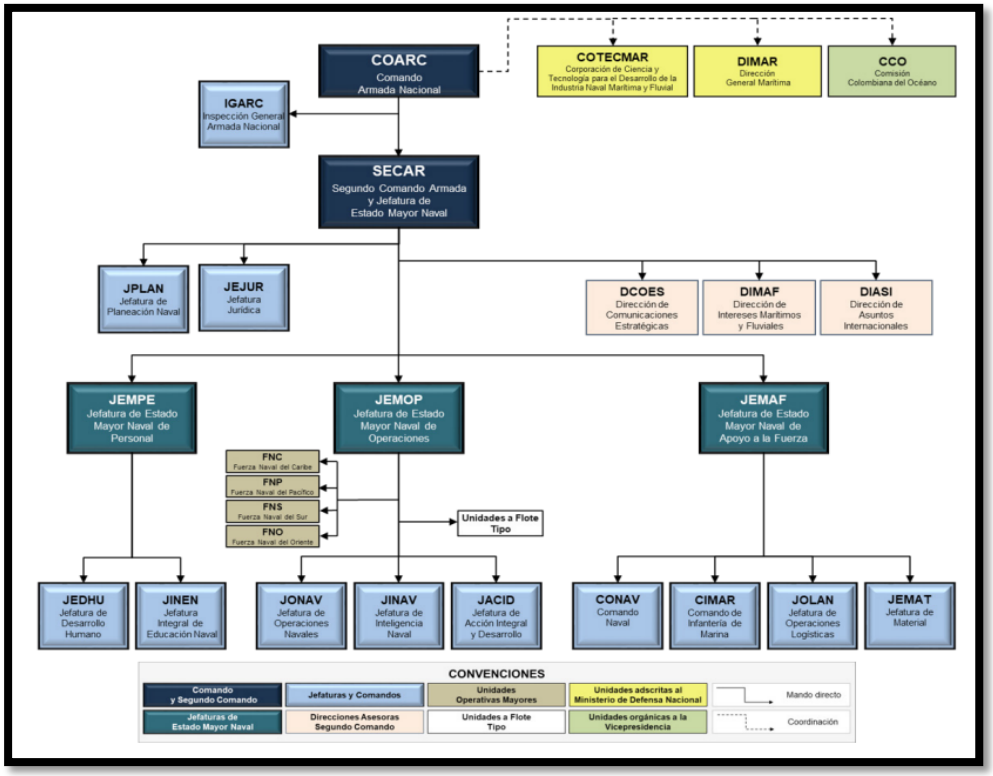
Visión doctrinal de la Armada Nacional sobre gestión de activos

La Armada Nacional de Colombia ha reconocido progresivamente la necesidad de establecer un modelo institucional de gestión de activos que permita garantizar la disponibilidad operativa, sostenibilidad técnica y eficiencia económica de sus plataformas navales. En este contexto, la creación de un Sistema de Gestión de Activos (SGA) ha

representado un paso importante, aunque su implementación presenta desafíos estructurales y doctrinales.

Figura 6

Organigrama Armada Nacional



Nota. La figura muestra la estructura organizacional formal de la Armada Nacional, incluye sus niveles jerárquicos, dependencias funcionales y procesos de apoyo. Tomado de Dirección de Sistemas Integrados de Gestión de la Armada Nacional (2020).

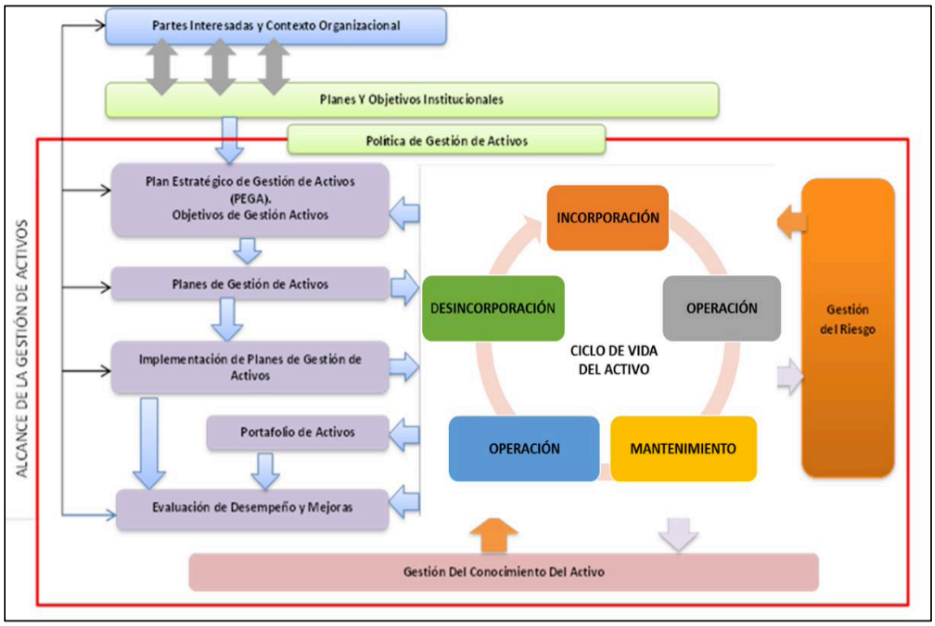
En el contexto de la Armada Nacional de Colombia, la gestión de activos estratégicos navales ha sido impulsada por la necesidad de garantizar niveles óptimos de disponibilidad operacional y sostenibilidad presupuestal. No obstante, la implementación del sistema de gestión de activos (SGA) ha sido conducida principalmente por la Jefatura de Material, sin una articulación directa desde el nivel estratégico superior. Esta estructura limita la alineación vertical requerida por la norma ISO 55001 (2024), que establece que la alta dirección debe asumir la responsabilidad de liderar el sistema de gestión, asegurar su

integración en los procesos organizacionales y promover la mejora continua de su desempeño.

Tal desconexión entre el nivel táctico-operativo y el nivel estratégico de dirección genera brechas en la gobernanza técnica del sistema. Según Da Silva y De Souza (2021), la eficacia de un SGA depende del compromiso explícito de la alta dirección, cuya ausencia reduce la capacidad institucional de priorizar inversiones, gestionar riesgos y establecer objetivos coherentes con la criticidad de los activos. Además, la experiencia documentada por Antonenko (2023) evidencia que el liderazgo estratégico incide directamente sobre la madurez del sistema, el cumplimiento normativo y la trazabilidad de decisiones operativas, lo cual resulta esencial en entornos de alta complejidad tecnológica como el naval.

Figura 7

Modelo conceptual del Sistema de Gestión de Activos (SGA) de la Armada Nacional



Nota. La figura representa el modelo conceptual adoptado por la Armada Nacional para estructurar su Sistema de Gestión de Activos, considerando todo el ciclo de vida del activo, desde su incorporación hasta la desincorporación. Modelo conceptual del SGA de

la ARC. Tomado del Manual de gestión de activos y soporte logístico (Armada Nacional de Colombia, 2022).

El modelo adoptado contempla la gestión del ciclo de vida de los activos, pero persisten esquemas operativos basados en enfoques tradicionales, como el mantenimiento, reparación y servicio (MRS). Este modelo incorpora parcialmente algunos principios del mantenimiento productivo total (TPM), pero no implementa de manera formal metodologías como el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), ni considera la evaluación sistemática de parámetros como el tiempo medio entre fallos (MTBF), el tiempo medio para reparación (MTTR). Como resultado, se limita la capacidad de anticipar fallos, priorizar recursos y optimizar decisiones de renovación tecnológica.

A su vez, las limitaciones presupuestales y la ausencia de un modelo de gobernanza transversal dificultan la implementación integral del sistema de gestión de activos (SGA) en la Armada Nacional de Colombia. Esta condición se evidencia en los datos históricos de la inversión en mantenimiento entre 2008 y 2021, donde se observa un incremento sostenido del presupuesto sin que ello se traduzca de forma proporcional en mejoras sostenidas de la disponibilidad operativa. En particular, la disparidad entre las asignaciones anuales y los indicadores de desempeño revela una débil articulación entre planificación estratégica y ejecución táctica (Armada Nacional de Colombia, 2021). Este escenario refleja la necesidad urgente de consolidar mecanismos de dirección estratégica y control de gestión con base en criterios de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD).

La integración limitada de indicadores clave de desempeño (KPI), junto con la baja adopción de metodologías de análisis de costo del ciclo de vida (LCC), restringe la capacidad institucional para priorizar inversiones con enfoque basado en riesgo. El análisis técnico del comportamiento histórico presupuestal sugiere que, pese a incrementos puntuales en inversión, como ocurrió en 2021, la gestión carece de

herramientas analíticas suficientes para anticipar fallas, valorar obsolescencia tecnológica y definir umbrales de intervención óptimos. Por tanto, fortalecer el modelo de gobernanza del SGA, alineándolo con marcos como la ISO 55001 (2024) y articulando herramientas como CMD y LCC, es un paso necesario para lograr una sostenibilidad operativa eficiente y técnicamente justificada.

Alineación estratégica

Conforme a la norma ISO 55000 (2024), todo proceso asociado a los activos debe estar conectado de forma explícita con los objetivos de la organización, asegurando la creación de valor a través de la coherencia entre niveles estratégicos, tácticos y operativos. Este concepto, conocido como “línea de visión”, permite que las decisiones técnicas no se tomen de manera aislada, sino como parte de un marco estructurado que vincula cada actividad con la misión institucional, garantizando dirección, coherencia y rendición de cuentas.

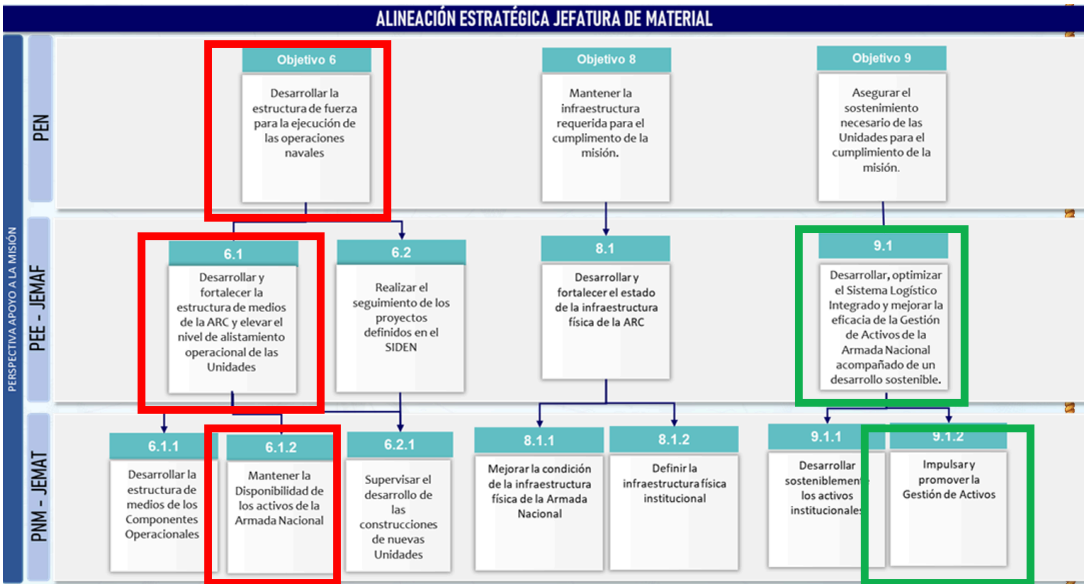
En la Armada Nacional de Colombia, dicha alineación se articula formalmente a través del Plan Estratégico de Gestión de Activos (PEGA), estructurado conforme a los lineamientos del Plan de Desarrollo Naval (PDN) y demás instrumentos de planificación institucional. No obstante, la implementación enfrenta desafíos relevantes. Aunque el PEGA ha sido formulado, no se ha desplegado un sistema integral de Planes de Gestión de Activos (PGA) por unidades o sistemas, que permita operacionalizar dicha estrategia en acciones tácticas verificables. Esta ausencia debilita la trazabilidad entre la visión institucional y los procesos operativos, y limita el control de gestión basado en desempeño técnico y costo del ciclo de vida.

La ausencia de Planes de Gestión de Activos (PGA) documentados y estandarizados en la Armada Nacional de Colombia limita la posibilidad de descomponer los objetivos estratégicos como los establecidos en el PEN, PEE-JEMAT y PNM-JEMAT

en metas operativas concretas con indicadores clave de desempeño (KPIs). Esta carencia afecta directamente los procesos de seguimiento, control y evaluación de resultados, lo cual impide aplicar un enfoque robusto basado en desempeño, riesgo y costo del ciclo de vida. La norma ISO 55002 (2018) establece que los PGA deben estructurarse sobre análisis de brechas, necesidades operacionales y gestión de riesgos, y estar articulados mediante sistemas de información que aseguren trazabilidad y confiabilidad en la toma de decisiones. Véase:

Figura 8

Alienación estratégica Jefatura de Material Armada Nacional



Nota. Fuente: Dirección de Mantenimiento de la JEMAT

Así mismo, la dinámica organizacional, caracterizada por reestructuraciones frecuentes, ha limitado la consolidación de una cultura orientada a la mejora continua. Desde el marco doctrinal de la Armada Nacional, el *Manual de Gestión de Activos* señala que los PGA deben ser instrumentos formales que traduzcan los objetivos estratégicos como el objetivo 9.1.2 de impulsar la gestión de activos en decisiones técnicas sobre

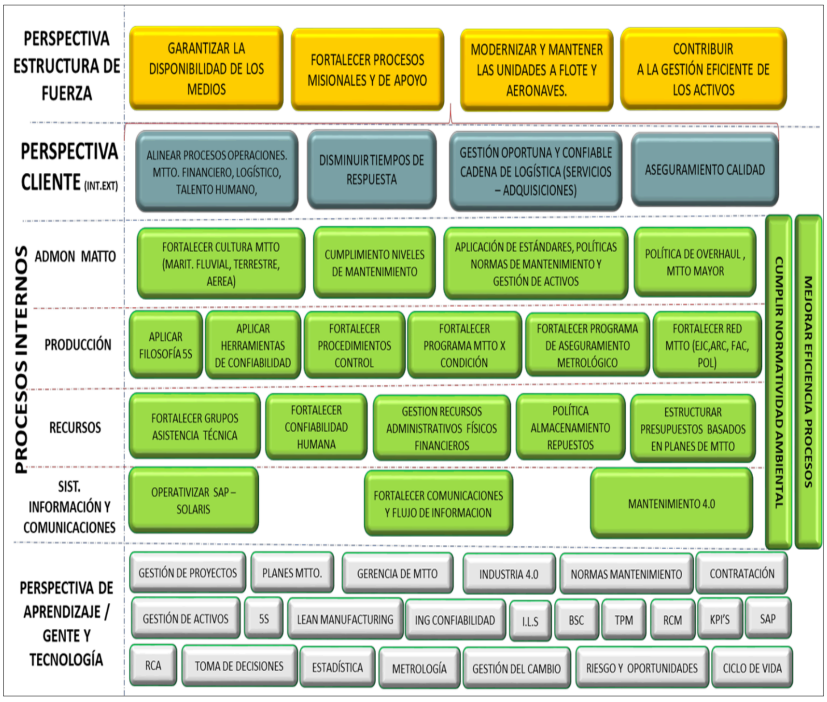
adquisición, renovación, mantenimiento o retiro, conforme al valor total del activo. Para alcanzar este nivel de madurez, es indispensable implementar sistemas de indicadores como OEE, MTBF y MTTR, establecer mecanismos de gobernanza que supervisen la ejecución de los PGA, y asegurar que cada acción esté alineada con los objetivos del Plan Estratégico de Gestión de Activos (PEGA) y los principios establecidos en la ISO 55000 (2024).

Mapa estratégico de mantenimiento

La Doctrina de Material Naval Tomo III introduce un mapa estratégico de mantenimiento que articula los objetivos institucionales con las actividades técnicas, integrando tres perspectivas clave: estructura de fuerza, cliente interno/externo y procesos internos. Este modelo busca consolidar la disponibilidad operativa de los medios navales mediante la alineación entre políticas logísticas, estándares técnicos y capacidades del recurso humano. La representación conceptual de este enfoque vincula acciones como el fortalecimiento de la cultura de mantenimiento, la gestión de inventarios y la implementación de tecnologías 4.0, con metas institucionales como la sostenibilidad del ciclo de vida y la eficiencia en la toma de decisiones operativas.

Figura 9

Mapa estratégico para la gestión de mantenimiento Armada Nacional



Nota. La figura representa el alineamiento estratégico entre las perspectivas organizacionales y los procesos técnicos de mantenimiento, vinculando la disponibilidad operativa con la sostenibilidad de los medios navales. Mapa estratégico de mantenimiento. Tomado de Dirección de Mantenimiento de la JEMAT.

Sin embargo, pese al valor estructural de este enfoque, la gestión actual del mantenimiento en la Armada Nacional carece de un modelo metodológico sistemático para evaluar la confiabilidad técnica y el riesgo asociado a los sistemas navales. Aunque se han definido indicadores clave como la disponibilidad por tipo de unidad marítima, aérea, terrestre y guardacostas con metas proyectadas al 2027, persiste la omisión de métricas críticas del modelo CMD, como el MTBF y el MTTR. Esta limitación restringe la capacidad de implementar metodologías como el mantenimiento basado en condición (CBM) o la predicción de fallos críticos, afectando directamente la retroalimentación técnica y la mejora continua (Andrade-Solórzano & Herrera-Suárez, 2018).

Figura 10

Indicadores y metas operacionales de mantenimiento 2024–2027 de la Armada Nacional

#	OBJETIVO	NOMBRE DEL INDICADOR	FÓRMULA	RESPONSABLE	I-24	II-24	III-24	META 2024	META 2025	META 2026	META 2027
1	No.1 Desarrollar la estructura de medios de los componentes operacionales.	Cumplimiento estructuración proyectos de medios institucionales.	(Cantidad proyectos técnicamente estructurados / Cantidad de Proyectos con recursos asignados)*100	DINAV	25%	75%	100%	100%	100%	100%	100%
2		Cumplimiento Plan de Bajas.	(Bajas Efectuadas / Bajas Programadas)*100	DINAV	25%	50%	80%	100%	100%	100%	100%
3	No. 2 Mantener la disponibilidad de los activos de la Armada Nacional.	Nivel de obsolescencia de los sistemas de la Flota	$\left(\frac{Cantidad\ de\ sistemas\ obsoletos\ de\ abordo}{Cantidad\ de\ sistemas\ de\ abordo}\right) * 100$	DIGET	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
4		Disponibilidad de unidades marítimas y fluviales de las Fuerzas Navales.	Sumatoria de la ponderación de la disponibilidad de las Unidades por tipo, a cargo de las Fuerzas Navales.	DIMAN	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
5		Disponibilidad de unidades de Guardacostas.	Sumatoria de la ponderación de la disponibilidad de las Unidades de Guardacostas.	DIMAN	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
6		Disponibilidad de unidades fluviales de I.M.	Sumatoria de la ponderación de la disponibilidad de las Unidades fluviales de I.M.	DIMAN	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
7		Disponibilidad de Unidades Aéreas.	Sumatoria de la ponderación de la disponibilidad de las Unidades Aéreas.	DIMAN	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
8		Disponibilidad de Unidades terrestres (Vehículos).	Sumatoria de la ponderación de la disponibilidad de las Unidades terrestres.	DIMAN	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
9		Presupuesto invertido en Mantenimiento Imprevistos	Presupuesto invertido en mantenimientos imprevistos/ Total presupuesto asignado	DIMAN	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%

Nota. La figura presenta el conjunto de indicadores técnicos y metas proyectadas para la gestión del mantenimiento en unidades de la Armada Nacional, establece objetivos por tipo de unidad naval y por periodo anual. Tomado de (Fuente: Dirección de Mantenimiento de la JEMAT).

La norma UNE-EN 16646 (2015) establece que el mantenimiento debe gestionarse desde etapas tempranas del ciclo de vida, mediante sistemas de medición estructurados que respalden decisiones de inversión, renovación y sostenibilidad. En este marco, los indicadores no deben limitarse a reportar disponibilidad funcional, sino evidenciar el valor técnico y económico generado por cada acción. Por tanto, una de las oportunidades más relevantes para fortalecer el Sistema de Gestión de Activos (SGA) en la ARC es la estructuración formal de un sistema de indicadores técnicos y tácticos, que permita evaluar el desempeño de activos, priorizar acciones correctivas o preventivas y anticipar fallas de alto impacto sobre la misión.

Portafolio de activos físicos y planes maestros

El portafolio de activos de la Armada Nacional está constituido por buques, aeronaves, vehículos, sistemas de armas, infraestructura y plataformas logísticas, que en conjunto representan el núcleo de soporte operativo institucional. La gestión de estos activos debería regirse por criterios de sostenibilidad, análisis de riesgo, valor estratégico y costo del ciclo de vida (LCC). El Manual de Gestión de Activos y Soporte Logístico (Armada Nacional de Colombia, 2022) establece la formulación de Planes Maestros de Gestión de Activos (PMGA) por cada tipo de activo, articulando estos con la estrategia institucional, los marcos financieros y las necesidades operativas definidas por el mando naval.

Tabla 2

Unidades de superficie y submarinas dentro del portafolio de activos físicos de la Armada Nacional

Categoría	Tipo de Unidad	Tiempo en servicio	Tiempo de vida	Vida remanente
Combate	Fragatas	40	40	0
	Corbetas	39	40	1
	Submarinos	51	40	-11
Patrullaje	CPV	22	30	8
	CPV	27	30	3
	Bote patrullero marítimo	20	30	10
Apoyo	Buque escuela	56	40	-16
Aeroslizadores	Hovercraft	10	10	0
Buques de apoyo logístico	BDA	7	30	23
	Embarcaciones menores	20	20	0
Remolcadores	Remolcador de bahía	37	30	-7
Patrullaje fluvial	Patrullera fluvial pesada	17	30	13
	Patrullera fluvial liviana	46	30	-16
	Remolcadores de río	69	30	-39

Patrullera rápida fluviales	11	15	4
Botes ECF	12	20	8

Nota. Clasificación de activos estratégicos navales de la Armada Nacional. Fuente: Plan Estratégico de Gestión de Activos de la Armada Nacional (2021).

Sin embargo, muchos PMGA han sido formulados sin integrar datos históricos, niveles de criticidad ni evaluaciones de riesgo. Como resultado, varios de estos planes se han convertido en documentos de trámite con escasa utilidad operativa. Estudios recientes demuestran que la integración de metodologías de análisis como el LCC permite anticipar el impacto financiero acumulado de las decisiones técnicas, considerando no solo los costos iniciales, sino también los de operación, mantenimiento, modernización y retiro (Petersen & Efatmaneshnik, 2024). Esta visión permite priorizar inversiones y reducir la exposición a fallas por obsolescencia en contextos de alta criticidad operativa (Lemerande, 2020). Asimismo, enfoques basados en modelado predictivo refuerzan la toma de decisiones a lo largo del ciclo de vida, transformando los PMGA en instrumentos estratégicos y no meramente administrativos (Hastings, 2021).

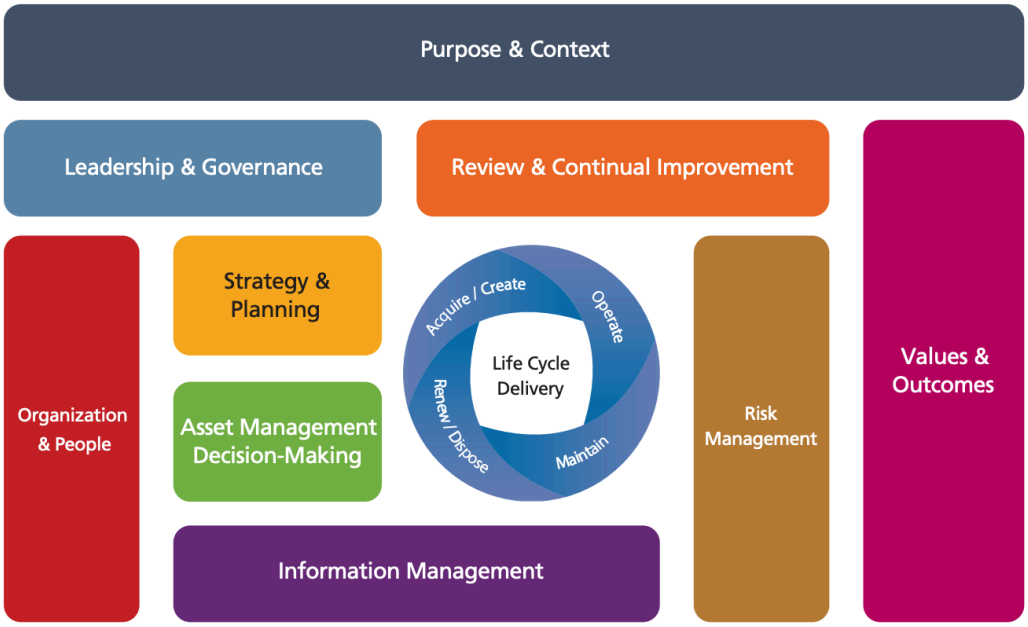
Análisis comparativo con el modelo IAM actualizado

El modelo de gestión de activos implementado por la Dirección de Mantenimiento de la Armada Nacional de Colombia mantiene una estructura basada en las etapas tradicionales del ciclo de vida del activo: adquisición, operación, mantenimiento y desincorporación. Esta aproximación contempla funciones organizativas como la planificación y evaluación, aunque presenta una cobertura parcial respecto a las dimensiones que componen los marcos internacionales de madurez organizacional en gestión de activos. En particular, al contrastarse con el modelo de diez dominios propuesto por el IAM 10-box Capability Model, surgen brechas estructurales que limitan la integración estratégica del sistema.

Una revisión de implementación del enfoque IAM en sistemas de gestión avanzados muestra cómo la incorporación de dominios como liderazgo, toma de decisiones basadas en riesgo y valor, mejora continua, gestión de la información y alineación organizacional transversal, resulta esencial para fortalecer la madurez del sistema de gestión de activos. Ng et al. (2024) describen cómo un modelo digital de gestión integrada permitió articular la operación técnica con la toma de decisiones estratégicas en entornos de alta complejidad, utilizando herramientas de monitoreo continuo, análisis predictivo y gobernanza basada en datos. Esta integración es particularmente relevante para organizaciones militares, donde la sostenibilidad de los activos depende no solo del mantenimiento operativo, sino de su alineación con objetivos institucionales.

Figura 11

Modelo de capacidades en diez dominios del IAM (IAM 10-box Capability Model)



Nota. La figura representa los diez bloques de capacidad definidos por el Institute of Asset Management (IAM), utilizados como marco de referencia para evaluar la madurez organizacional en la gestión de activos. (Fuente:(IAM, 2024)).

El modelo vigente de la ARC carece aún de componentes sólidos en áreas como gestión del cambio, estructuración del conocimiento institucional y liderazgo estratégico. La figura del *IAM 10-box Capability Model* permite identificar visualmente estos vacíos al presentar un marco integral de capacidades organizacionales que conectan el propósito institucional con los resultados esperados, atravesando todos los niveles del sistema. La adopción progresiva de estos dominios no solo mejoraría la coherencia operativa del SGA, sino que facilitaría la trazabilidad entre decisiones tácticas y metas institucionales a través de herramientas como el análisis de valor, la evaluación de desempeño técnico y el uso estructurado de información para gestión del riesgo.

Diagnóstico Armada Nacional en el proceso de mantenimiento

En 2014, la Armada Nacional de Colombia llevó a cabo un diagnóstico institucional de su sistema de mantenimiento técnico, utilizando como referencia metodológica la Matriz de Excelencia de Campbell. Esta evaluación abordó diez dimensiones estratégicas y operativas, como la planificación, la confiabilidad, la gestión tecnológica y el análisis de procesos. El resultado general posicionó a la institución en un nivel de madurez correspondiente a un enfoque de “mantenimiento planeado”, con una calificación promedio de 24,28 puntos sobre 100 posibles, lo que refleja un sistema incipiente con prácticas reactivas y limitada orientación a la confiabilidad o la mejora continua (PEGA, 2021).

De manera complementaria, se aplicó una medición sobre la utilización del módulo SAP-PM/EAM en la gestión institucional del mantenimiento. Este análisis arrojó un nivel de aprovechamiento del 34,88 %, con una brecha funcional del 65,12 %. Este resultado

evidenció fallas en la integración del sistema con los procesos operativos, la baja confiabilidad de la información ingresada y la ausencia de indicadores que facilitaran el análisis predictivo y la planificación estratégica de los activos. Estos hallazgos justificaron la necesidad de estructurar un modelo de gobernanza técnica apoyado en herramientas digitales y metodologías de madurez internacionalmente validadas (PEGA, 2021).

La tercera herramienta diagnóstica aplicada fue la Matriz de Madurez del Programa de Mantenimiento y Confiabilidad, que permitió desagregar el nivel de avance por cada una de las dimensiones estratégicas del mantenimiento. Las mediciones realizadas entre 2015 y 2018 revelaron un progreso desigual, con avances significativos en aspectos tecnológicos (77 %) y de gestión de equipos (66 %), pero rezagos importantes en planificación (52 %), métricas de desempeño (46 %) y administración organizacional (61 %). Para el periodo 2019 – 2025, los avances reportados fueron nulos, lo cual sugiere una discontinuidad en la implementación del programa y una baja institucionalización del enfoque basado en confiabilidad y riesgo (PEGA, 2021).

En conjunto, estos resultados permitieron establecer una línea base técnica para la formulación del Programa Integral de Mantenimiento y Confiabilidad. Este programa se propuso como herramienta institucional para cerrar brechas, consolidar capacidades, y facilitar la transición desde un mantenimiento planeado hacia un sistema gestionado con base en confiabilidad, costo del ciclo de vida y desempeño técnico verificable. Su adopción progresiva es clave para avanzar hacia estándares internacionales de madurez operativa, como los definidos por el IAM o la serie ISO 55000.

En el año 2017, la Armada Nacional de Colombia adoptó formalmente el enfoque de la norma ISO 55001 como marco de referencia para evaluar la madurez de su sistema de gestión de activos. La evaluación se realizó conforme a las diez secciones estructurales de la norma, abarcando desde el contexto institucional hasta el mejoramiento continuo. Los resultados obtenidos reflejaron un promedio general de 2,21

sobre un puntaje máximo de 5, lo cual sitúa a la organización en un nivel de madurez “2”, definido como etapa de implementación. Este nivel indica que, si bien existen avances declarativos y esfuerzos preliminares, no se cuenta aún con trazabilidad documentada que evidencie la integración plena de procesos y su alineación estratégica.

La escala evolutiva empleada para esta valoración contempla cinco niveles: 0 (indiferente), 1 (consciente), 2 (en implementación), 3 (consolidado y articulado) y 4 (mejora continua). El resultado obtenido posiciona a la ARC dentro del tercer peldaño, lo que evidencia que el sistema está en fase de consolidación operativa, pero aún distante de un desempeño maduro y sostenible. En respuesta a este diagnóstico, se desarrollaron herramientas como el Manual de Gestión de Activos y Soporte Logístico (2020), y se incorporaron metas específicas en el Plan Estratégico Naval 2024 – 2027. No obstante, persisten restricciones estructurales propias de la gestión pública, como las limitaciones presupuestales y la falta de continuidad administrativa, que han dificultado la implementación de un sistema transversal plenamente operativo ([GFMAM], 2021).

Tabla 3

Resultados de la Evaluación de Madurez en Gestión de Activos Armada Nacional

Sección ISO 55001	Resultado Promedio ARC	Valor de Referencia ISO
4. Contexto de la Institución	2.28	3
5. Liderazgo	2.43	3
6. Planificación	1.92	3
7. Soporte	2.08	3
8. Operación	2.29	3
9. Evaluación del Desempeño	2.11	3
10. Mejoramiento	2.40	3

Nota. La tabla muestra el resultado de calificaciones obtenidas por la Armada Nacional en la evaluación de madurez conforme a los requisitos de la norma ISO 55001.Tomado: Contrato No 0184-ARC-CBN5-2018 Knar.

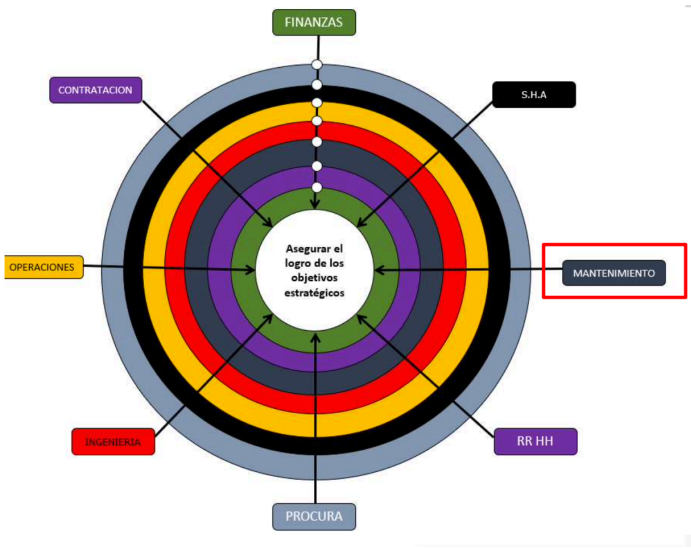
Estos resultados evidencian avances relevantes en las áreas de liderazgo y mejoramiento, mientras que dimensiones como planificación y soporte técnico aún presentan rezagos importantes frente al valor de referencia establecido por la norma. El fortalecimiento de estas dimensiones resulta clave para consolidar la arquitectura del SGA en la ARC.

Aporte de las normas ISO 55000 al modelo de gestión de activos

La norma ISO 55000 establece los principios fundamentales para estructurar un sistema de gestión de activos orientado al valor, alineado con los objetivos estratégicos institucionales. Esta norma plantea que los activos deben gestionarse como medios para alcanzar resultados sostenibles, no solo desde la perspectiva financiera, sino integrando decisiones técnicas, operativas y de riesgo en el ciclo de vida del activo. Según Ihemegbulem y Baglee (2020), este enfoque permite mejorar la toma de decisiones, equilibrar desempeño, costo y riesgo, y fortalecer las políticas de mantenimiento. Además, investigaciones como las de Parra et al. (2020) han demostrado que la integración de modelos de mantenimiento bajo la norma ISO 55000 mejora la rentabilidad empresarial y la satisfacción del usuario. En la Figura 12 se representa cómo distintas áreas funcionales (como mantenimiento, ingeniería o finanzas) articulan sus procesos para lograr objetivos estratégicos comunes, reforzando la necesidad de un enfoque integral bajo estándares normalizados.

Figura 12

Alineación de funciones organizacionales para el logro de objetivos estratégicos



Nota. La figura representa un modelo de integración funcional en el que distintas áreas de la organización, como mantenimiento, finanzas, operaciones e ingeniería, contribuyen de manera articulada al cumplimiento de los objetivos estratégicos institucionales. Adaptado de presentación Ing. profesor Robinson José Medina Núñez (2024), basada en principios del SMRP Body of Knowledge 2020.

El concepto de valor propuesto por la norma ISO 55000 implica una mirada holística sobre la utilidad que un activo aporta a los fines de la organización. Este valor se construye considerando beneficios tangibles e intangibles, y debe ser evaluado durante todo el ciclo de vida. Zahera y González-Prida (2021) proponen una metodología integrada con gestión del riesgo para asegurar este enfoque desde el inicio de la aplicación del estándar. Complementariamente, Almeida et al. (2022) ofrecen una propuesta conceptual que permite traducir el valor del activo en decisiones organizacionales, considerando factores cognitivos y contextuales. Esta visión permite avanzar hacia una gestión que no solo mitiga fallos, sino que maximiza la contribución estratégica del activo. La correcta interpretación de este valor es fundamental en entornos

técnicos complejos como el naval, donde las decisiones deben equilibrar múltiples dimensiones de desempeño.

La alineación estratégica, otro principio clave del estándar, implica conectar las decisiones operativas con los objetivos institucionales mediante una línea de vista clara. Antonenko (2024) señala que este alineamiento se consolida mediante un ecosistema de gestión en el que los estándares ISO 55000 actúan como articuladores de prácticas organizacionales coherentes. Por su parte, Panegossi y Da Silva (2021) proponen que la integración de funciones financieras y no financieras bajo el enfoque ISO 55010 permite mejorar las decisiones de reemplazo de activos críticos, asegurando su contribución a los fines estratégicos. En el contexto de la Armada Nacional, la Figura 13 ilustra esta jerarquía documental, destacando cómo el Plan Estratégico se conecta con políticas, planes y objetivos específicos de gestión de activos. No obstante, como evidencia el caso colombiano, esta estructura documental aún presenta vacíos prácticos que limitan la trazabilidad táctica.

Figura 13

Estructura jerárquica documental del Sistema de Gestión de Activos

Nota. La figura muestra la jerarquía documental que conecta el plan estratégico institucional con la política de gestión de activos, el PEGA y los PGA, lo que demuestra la

alineación entre niveles organizacionales. Adaptado de Lárez, A. (2020), en LinkedIn: https://www.linkedin.com/pulse/fundamentos-de-la-gestión-activos-iso-50002014-parte-2-lárez-cmrp/

La falta de implementación efectiva de Planes de Gestión de Activos (PGA) obstaculiza la capacidad de retroalimentación y mejora continua. Esta debilidad compromete el rendimiento técnico y económico de los activos en fases críticas del ciclo de vida. Kijak (2021) subraya que un sistema robusto de gestión de activos debe ser adaptable y permitir mejora continua, apoyado por herramientas como gemelos digitales y metodologías de ciclo PDCA. En la Armada Nacional, donde confluyen mantenimiento, logística y operación en buques de superficie, esta integración es clave para sostener la disponibilidad operativa y reducir riesgos sistémicos. El enfoque del sistema debe permitir la conexión entre la planificación estratégica y la ejecución técnica a través de KPIs específicos que midan el impacto en los resultados misionales. Consolidar esta estructura requiere establecer mecanismos formales para traducir los objetivos estratégicos en acciones tácticas verificables.

Norma ISO 55001

La norma ISO 55001:2024 establece una estructura normativa integral para el diseño e implementación de un sistema de gestión de activos orientado al ciclo de vida. Su aplicación en organizaciones de defensa permite vincular objetivos estratégicos con decisiones operacionales mediante procesos documentados y medibles. La experiencia en empresas del sector energético y ferroviario demuestra que el cumplimiento de los requisitos de la norma mejora la gobernanza, la eficiencia de los recursos y la trazabilidad de las acciones tácticas (Parra et al., 2024; Ali, 2021). En la Armada Nacional, su adopción sistemática fortalecería la alineación entre la planificación institucional y la

gestión técnica de los activos, favoreciendo una gobernanza basada en evidencia y orientada a resultados sostenibles en ambientes de alta complejidad operacional.

Uno de los ejes estructurales de la norma ISO 55001 es el compromiso del liderazgo. Este principio requiere que la alta dirección establezca una política de gestión de activos, asigne recursos, y ejerza seguimiento al desempeño técnico y económico del sistema. La evidencia muestra que esta práctica permite reducir brechas de madurez organizacional y promueve decisiones informadas en escenarios cambiantes (Capela et al., 2020; Antonenko, 2024). En el contexto naval colombiano, esta exigencia implica elevar el nivel jerárquico de la gestión de activos, transfiriendo la rectoría del sistema desde el nivel técnico hacia el estratégico, lo cual es congruente con las recomendaciones de ISO 55001 sobre liderazgo, contexto organizacional y evaluación del desempeño.

Otro componente clave es la gestión basada en riesgo, la cual se constituye como un eje transversal en la toma de decisiones sobre mantenimiento, reemplazo o inversión. Según ISO 55001, las organizaciones deben identificar riesgos asociados a sus activos, establecer objetivos medibles e integrar indicadores clave de desempeño en sus modelos operativos. La aplicación de estos principios ha demostrado reducir vulnerabilidades técnicas y optimizar la asignación de recursos en empresas de servicios públicos y transporte (Zahera & González-Prida, 2021; Antonenko, 2023). En la Armada Nacional, si bien existen matrices de criticidad, su implementación carece de estandarización metodológica y no incorpora modelos como FMEA o RCM debido a limitaciones en la calidad y disponibilidad de datos consolidados.

La norma también establece la mejora continua como principio rector del sistema. Esta debe ser operacionalizada mediante auditorías internas, análisis de desempeño y acciones correctivas documentadas. Las organizaciones que adoptan ciclos de retroalimentación sistemática mejoran su adaptabilidad ante variaciones externas y fortalecen la resiliencia operativa (Da Silva & De Souza, 2021). Actualmente, la Armada

Nacional no dispone de mecanismos institucionalizados para evaluar el impacto real del sistema de gestión de activos en términos de disponibilidad, costos y desempeño. La implementación plena de los requisitos de la norma, junto con indicadores robustos y procesos de auditoría estructurados, permitiría cerrar esta brecha y consolidar una cultura organizacional orientada a resultados verificables y sostenibles en el tiempo.

Norma ISO 55002

La norma ISO 55002 proporciona directrices operativas clave para aterrizar los requisitos establecidos por la ISO 55001, enfocándose en la traducción de lineamientos estratégicos en acciones tácticas verificables. Según Da Silva y De Souza (2021), su implementación efectiva permite estructurar un marco metodológico que habilita la planificación, ejecución y seguimiento del mantenimiento dentro del sistema de gestión de activos (SGA). Esta norma también promueve la integración de indicadores clave de desempeño (KPIs) mediante herramientas de modelado de procesos, contribuyendo a alinear los objetivos operativos con la visión estratégica institucional. Para una organización como la Armada Nacional, que requiere coherencia entre los niveles doctrinal, táctico y técnico, estas directrices ofrecen un camino claro hacia la trazabilidad operativa del Plan Estratégico de Gestión de Activos (PEGA) mediante Planes de Gestión de Activos (PGA) específicos por unidad o sistema.

Asimismo, se destaca por su enfoque práctico hacia la toma de decisiones basada en riesgos, el análisis de desempeño y el uso de datos confiables como insumo para metodologías de mantenimiento avanzadas. La implementación de modelos como RCM o FMEA se ve limitada en organizaciones con baja madurez informacional; sin embargo, ISO 55002 aporta ejemplos concretos que facilitan dicha operacionalización. Según Ali (2021), el uso de esta norma en empresas con activos complejos permite identificar brechas en madurez organizacional y definir mejoras basadas en desempeño y riesgo, lo

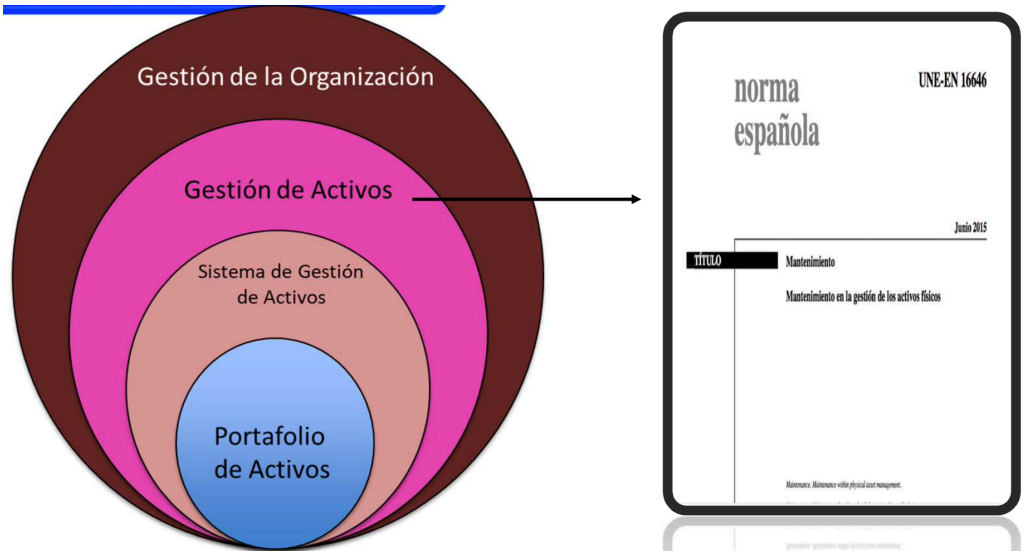
cual resulta aplicable a las unidades navales de la Armada Nacional. Esta estandarización no solo fortalece la eficiencia operativa, sino que también promueve la mejora continua a través de procesos formales de revisión, evaluación y corrección integrados en el ciclo de vida de los activos.

Norma UNE-EN 16646

La norma UNE-EN 16646 sitúa el mantenimiento como una función estratégica dentro del Sistema de Gestión de Activos (SGA), no subordinada a la operación técnica, sino articulada con los objetivos de valor de la organización. En el contexto naval, esta orientación se expresa en una jerarquía funcional clara entre cartera de activos, sistemas y componentes individuales. Esta estructura, reflejada en la figura 14, permite integrar la confiabilidad humana, del diseño, del proceso y del equipo a lo largo del ciclo de vida, gestionando así los costos de capital (CAPEX) y operación (OPEX) desde el diseño hasta la desincorporación. Esta concepción es coherente con los lineamientos de la serie ISO 55000, que exige coordinar actividades y decisiones basadas en riesgo, costo y desempeño (Antonenko, 2023), y refuerza el rol del mantenimiento como generador de valor, más allá de su función operativa básica (Silva & de Souza, 2021).

Figura 14

Representación de la influencia de la norma UNE-EN 16646 en la estructura del SGA

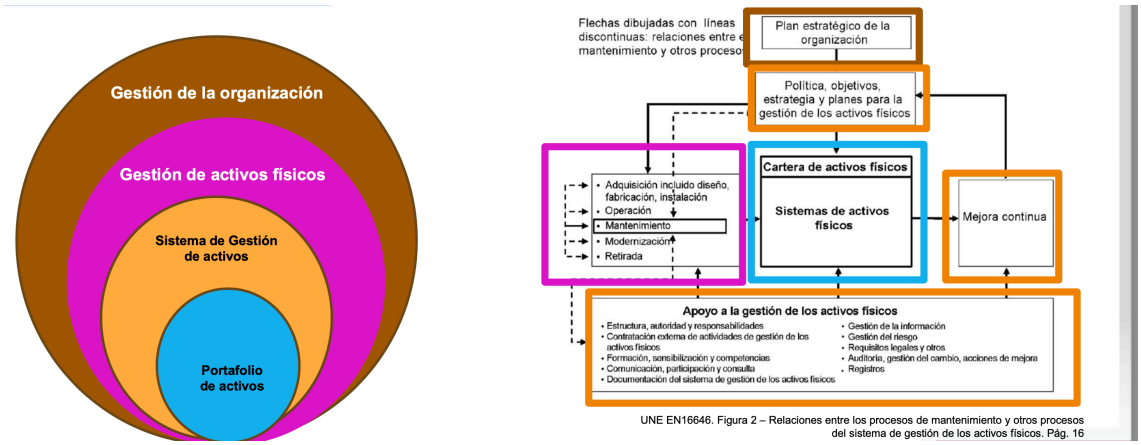


Nota. La figura representa cómo la norma UNE-EN 16646 influye en la estructuración del Sistema de Gestión de Activos, donde evidencia el mantenimiento como una función estratégica dentro de la gestión organizacional. Adaptado por el Ing. Robinson José Medina Núñez (2023), con base en UNE-EN 16646:2015 e ISO 55000:2014.

La integración del mantenimiento con la planificación estratégica, tal como representa la figura 15, exige una participación estructural del mantenimiento desde fases tempranas del ciclo de vida del activo. Este enfoque fortalece la alineación táctica entre las unidades operativas de la Armada Nacional y los planes institucionales como el PEGA, cuyo diseño debe incorporar no solo criterios de disponibilidad, sino también de riesgo y generación de valor. Estudios recientes coinciden en que una implementación efectiva del estándar ISO 55000 permite mejorar la toma de decisiones estratégicas y tácticas a través de marcos robustos de gestión del mantenimiento, como el modelo propuesto por Parra et al. (2020), que articula políticas, roles y procesos. Esta visión permite integrar mantenibilidad, confiabilidad y disponibilidad dentro de esquemas jerárquicos que favorecen la trazabilidad de decisiones desde el nivel institucional hasta la ejecución a bordo.

Figura 15

Relación entre mantenimiento, SGA físicos y planificación estratégica



Nota. La figura representa cómo los procesos de mantenimiento se integran dentro del sistema de gestión de activos físicos y se alinean con la planificación estratégica de la organización, según la lógica jerárquica propuesta por la UNE-EN 16646.Adaptación gráfica realizada por el ing. José Medina Núñez (2023), basada en UNE-EN 16646:2015.

El ciclo de vida de los activos en la Armada Nacional, representado en la figura 16, incorpora múltiples actores que intervienen en las fases de diseño, adquisición, operación y retiro. Este modelo exige que el mantenimiento se fundamente en decisiones técnicas informadas por indicadores clave como MTBF, MTTR y disponibilidad, en coherencia con metodologías CMD y modelos de análisis de vida útil (LCC). La UNE-EN 16646 respalda esta orientación al vincular explícitamente el mantenimiento con cada etapa del ciclo de vida y con funciones operativas, consultivas y participativas según el nivel jerárquico del activo. Según da Silva y de Souza (2021), implementar un marco de mantenimiento basado en ISO 55000 permite operacionalizar esta lógica, proporcionando herramientas prácticas para estructurar decisiones técnicas alineadas con la gestión del valor, el riesgo y el desempeño.

Figura 16

Gestión de activos en la Armada Nacional basada en ciclo de vida

Nota. La figura presenta las fases del ciclo de vida del activo y su alineación con los principios de costo, riesgo y desempeño, según el enfoque técnico adoptado por la Armada Nacional. Tomado del Manual de Gestión de Activos y Soporte Logístico, Armada Nacional (2022).

Este marco requiere que la Armada Nacional avance hacia una gestión de activos basada en información estructurada y gobernada por datos. La figura 16 ilustra cómo la confiabilidad de diseño, proceso y humana debe incorporarse desde el inicio del ciclo de vida, mediante mecanismos como SCADA, IoT y análisis probabilísticos. Las normas internacionales apuntan a que este enfoque posibilita una trazabilidad desde la planeación estratégica hasta el mantenimiento correctivo o preventivo, alineando decisiones con modelos de negocio sostenibles (Ihemegbulem & Baglee, 2020). En este sentido, el uso de herramientas predictivas y prescriptivas se vuelve esencial para anticipar riesgos operativos y optimizar la vida útil de los activos, como lo plantea la propuesta de Silva & de Souza (2021), lo que fortalece la sostenibilidad técnica de la flotilla naval y la eficacia en la asignación de recursos públicos.

Objetivo 2 - Caracterización de Equipos

La caracterización de equipos críticos es una actividad fundamental en la gestión de mantenimiento naval. Su objetivo es identificar aquellos activos cuya falla impacta significativamente la seguridad, disponibilidad y continuidad operacional de las unidades de superficie.

En el caso de la Armada Nacional de Colombia, esta caracterización ya se ha desarrollado parcialmente. Existen jerarquías técnicas funcionales basadas en los grupos constructivos y formatos operativos, alineados en parte con la norma ISO 14224.

La norma ISO 14224 permite clasificar activos según niveles jerárquicos (sistema, subsistema, conjunto, componente) y estandariza la recolección de datos de confiabilidad y mantenimiento. Esta estructura facilita la trazabilidad de fallas, la comparación de desempeño y la toma de decisiones basadas en datos (ISO, 2016).

Sin embargo, en el sistema actual persisten vacíos. No siempre se tipifican adecuadamente los modos de falla, las causas raíz ni las condiciones operativas. Esto limita el cálculo fiable de indicadores como MTBF, MTTR o disponibilidad técnica.

Este objetivo no busca rediseñar el sistema existente. Pretende verificar su funcionamiento, identificar brechas y explorar cómo metodologías internacionales como OREDA, ESREDA y EIREDA pueden aportar valor desde la experiencia en sistemas de entornos operacionales complejos y de alta criticidad.

La caracterización también permitirá proponer la integración formal de métricas CMD y KPI reconocidos por organismos como GFMAM y SMRP. Estas métricas fortalecen la toma de decisiones en mantenimiento basado en riesgos, y son clave para sistemas como el SISCP-C (SMRP, 2020).

Finalmente, este análisis se interpretará desde un enfoque sistémico. Se integrarán fundamentos kantianos, grantianos, maslowianos y de Wilson, queda a

entender el mantenimiento como una competencia estratégica al servicio de la disponibilidad operativa y del cumplimiento institucional.

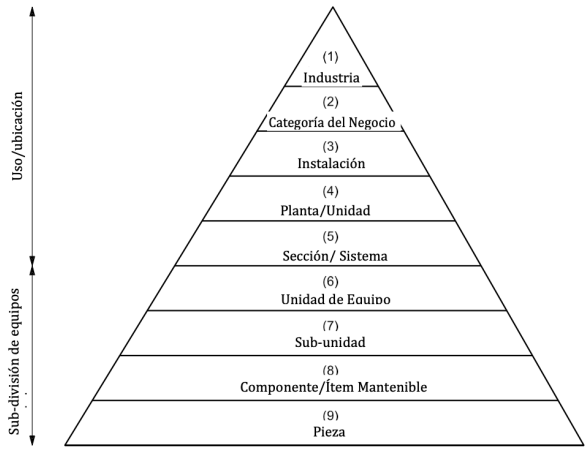
Norma BS EN ISO 14224: Jerarquía funcional y estructural de activos

La norma BS EN ISO 14224 de 2016 establece directrices para la recopilación y el intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento aplicables a equipos utilizados en industrias que operan activos complejos. Esta norma ha sido diseñada inicialmente para los sectores de petróleo, gas y energía, pero su estructura ha demostrado ser adaptable a sistemas técnicos militares y navales debido a su enfoque basado en jerarquías funcionales y estructurales (ISO, 2016).

El modelo jerárquico propuesto organiza los activos en niveles que permiten una representación sistemática y funcional del sistema técnico. Esta estructura facilita el análisis de eventos de falla, planificación de mantenimiento y generación de métricas de desempeño. Los niveles establecidos son:

Figura 17

Jerarquía funcional y estructural de activos según la norma ISO 14224



Nota. Fuente ISO 14224:2016

Además de la jerarquía, la ISO 14224 incorpora una clasificación funcional, que permite recoger y organizar datos de manera sistémica:

La función técnica de cada equipo;

El tipo de evento asociado (falla, demanda, inspección);

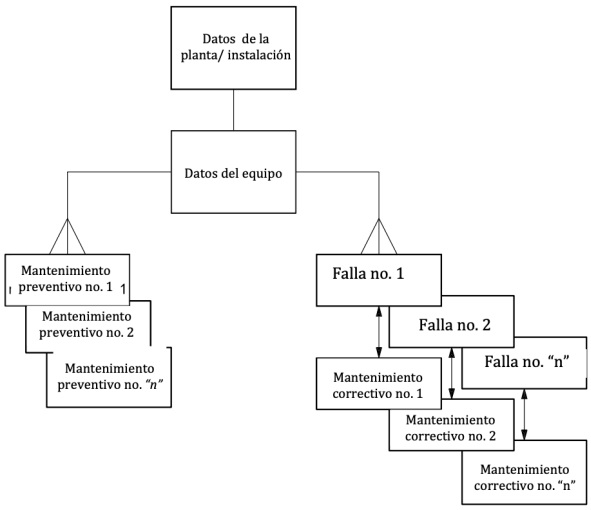
El modo de falla;

La causa técnica o humana;

La tarea realizada (reparación, reemplazo, inspección).

Figura 18

Estructura lógica de datos para mantenimiento y fallas según ISO 14224



Nota. La figura muestra un ejemplo de organización de datos de mantenimiento y eventos de falla, utilizado para apoyar procesos de análisis técnico, trazabilidad y gestión del ciclo de vida de los activos, conforme a la norma ISO 14224.*Tomado de ISO 14224:2016.*

Esta estructura estandarizada permite integrar sistemas de información técnica con herramientas analíticas de confiabilidad como MTBF y MTTR, facilita la construcción de modelos de disponibilidad alcanzada, inherente u operativa. Su aplicación correcta

contribuye a fortalecer la trazabilidad, la toma de decisiones y el soporte al ciclo de vida de los activos críticos (Palomino & Barreto, 2024).

Jerarquía técnica en la Armada Nacional

La Armada Nacional de Colombia ha establecido una organización técnico funcional basada en la división del buque en grupos constructivos, cada uno asociado a una función operativa específica. Esta estructura, formalizada en la Doctrina de Material Naval Tomo II, responde al principio de especialización funcional y facilita el control del mantenimiento, la trazabilidad de fallas y la asignación de responsabilidades técnicas (Armada Nacional, 2022).

Tabla 4

Jerarquía técnica de activos en la Armada Nacional según grupos constructivos

GPC	Descripción
000	Planos, diseños y regulaciones generales de construcción
100	Plataforma, buque, casco y superestructura
200	Planta de propulsión
300	Planta eléctrica y sistemas eléctricos
400	Sistemas auxiliares de operación del buque
500	Sistemas de detección, navegación y comunicaciones
600	Sistemas de control de armas
700	Armamento
800	Administración y regulación de proyectos e integración
900	Equipo complementario (outfitting), documentación técnica y repuestos

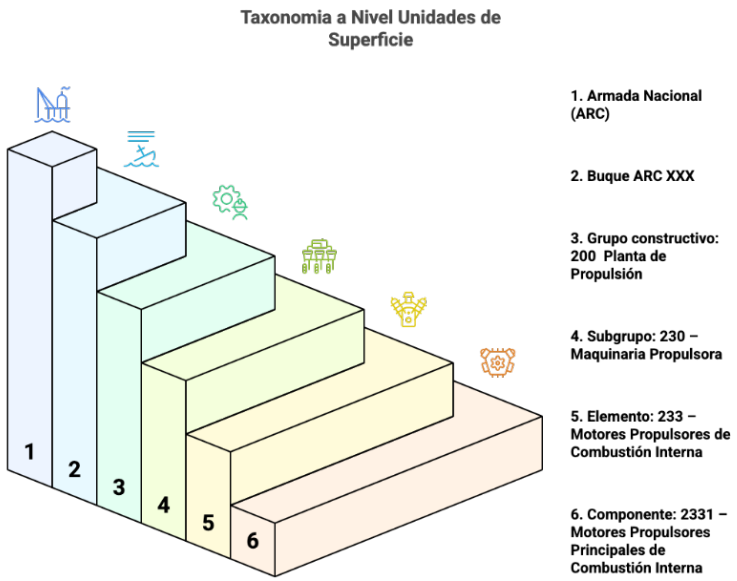
Nota. La tabla presenta la estructura jerárquica por grupos constructivos utilizada por la Armada Nacional para clasificar los activos navales, lo que facilita la gestión técnica, el mantenimiento y la trazabilidad operativa de los sistemas a bordo.Tomado de Doctrina de Material Naval, Tomo II (Armada Nacional, 2022).

Cada unidad naval se descompone jerárquicamente en sistemas, subsistemas, conjuntos y componentes. Esta jerarquía permite estructurar el ciclo de vida del activo, desde su adquisición hasta su proceso de baja, asi mismo organizar la información técnica en función de la operación, el soporte logístico y las decisiones estratégicas.

La organización por grupos constructivos se expresa así:

Figura 19

Niveles jerárquicos de descomposición técnica de activos en unidades navales



Nota. La figura representa los seis niveles de descomposición técnica de un activo, desde la unidad funcional hasta el componente individual, en coherencia con los lineamientos de la norma ISO 14224. Elaboración propia con herramientas de IA, adaptada de Doctrina de Material Naval, Tomo II (Armada Nacional, 2022).

Este modelo estructural ha sido adoptado formalmente y es coherente con la jerarquía propuesta por la norma ISO 14224. Además, los modos de falla ya se encuentran definidos y replican los ejemplos sugeridos en dicha norma para equipos como motores de combustión interna, generadores, bombas y compresores ente otros.

La principal oportunidad de mejora radica en alcanzar mayores niveles de descomposición técnica, especialmente en partes críticas de sistemas de alta criticidad, como los que comprometen la propulsión, generación de energía y control de gobierno. Avanzar hacia este nivel de detalle resulta fundamental para desarrollar análisis de confiabilidad más precisos y aplicar estrategias de mantenimiento basadas en riesgo.

Por otro lado, si bien la Armada cuenta con la infraestructura tecnológica adecuada en sistemas como SAP-PM, persisten debilidades en la cultura organizacional relacionada con la gestión de información técnica. Muchas unidades aún no tienen cargada de forma completa su jerarquía funcional, y solo una fracción realiza el registro sistemático de datos de operación y mantenimiento.

Esta situación impide que la información técnica registrada en SAP se utilice con valor estratégico para la toma de decisiones. Fortalecer la disciplina de cargue, establecer auditorías técnicas de datos, y fomentar una cultura de aprovechamiento analítico son pasos necesarios para convertir la estructura existente en un sistema de gestión activo, interoperable y predictivo.

Tabla 5

Jerarquía funcional de activos de un la planta de propulsion de una unidad tipo OPV

Nivel ISO 14224	Equivalente Armada Nacional	Ejemplo en OPV
Equipment Unit	Unidad naval	ARC 20 de Julio
System	Grupo constructivo	Grupo 200 – Planta de Propulsión
Subsystem	Sub Grupo técnico	Subgrupo: 230 – Maquinaria Propulsora
Equipment	Conjunto funcional	Motor MAN D2876
Component / Part	Parte crítica o ítem mantenible	Bomba de alta presión / válvula inyectora

Nota. Jerarquía funcional de activos: comparación entre los niveles definidos por la norma ISO 14224 y su equivalencia en la estructura técnico-operativa de una OPV de la Armada Nacional. Se evidencia que, en la práctica, los datos en SAP se registran hasta el nivel de componente, sin detallar ítems mantenibles como bomba de refrigeración o turbocargador, lo que limita la capacidad de análisis y planeación específica. Adaptado de ISO 14224 (2016) y doctrina técnica naval (Armada Nacional de Colombia, 2022).

La Tabla 5 resume la correspondencia entre los niveles jerárquicos definidos por la norma ISO 14224 y la estructura técnica utilizada en la Armada Nacional. En ella se evidencia que, aunque la jerarquía funcional se encuentra estructurada formalmente hasta el nivel de componente, la carga técnica en SAP generalmente se limita a ese nivel, sin llegar a los ítems mantenibles específicos. Esto representa una limitación técnica importante.

Por ejemplo, en el caso de un motor propulsor MAN D2876, componentes como la bomba de refrigeración, el turbocargador, la bomba de circuito cerrado y el intercambiador de calor constituyen unidades funcionales críticas que requieren planeación

independiente, seguimiento en su ciclo de vida y trazabilidad ante fallas o mantenimientos específicos.

La ausencia de estos ítems mantenibles en la plataforma dificulta la aplicación efectiva de estrategias de mantenimiento basado en condición, impide el análisis de fallas por subsistemas y limita la generación de métricas CMD ajustadas a nivel de detalle. Para avanzar hacia un modelo de gestión predictiva, es indispensable descomponer los activos hasta el nivel de parte crítica o ítem mantenible, especialmente en sistemas de alta prioridad como propulsión, generación eléctrica y mando.

Fundamento de la criticidad

El análisis de criticidad permite determinar la importancia relativa de un activo dentro de un sistema técnico. En el contexto de la gestión de activos navales, este análisis constituye un instrumento para priorizar recursos, optimizar mantenimientos y garantizar la continuidad de misión. Su objetivo es identificar qué equipos requieren mayor atención técnica, logística y operativa, en función de su impacto potencial ante una falla (Figueroa, 2023; Medancich, 2023).

La norma ISO 55000:2024 establece que los activos deben gestionarse con base a su contribución al valor organizacional y el riesgo asociado a su falla. En este sentido, la criticidad no se define únicamente por el costo del activo, sino por variables como el impacto en la seguridad, en la disponibilidad operativa, en el medio ambiente, en la logística de soporte o en los costos del ciclo de vida (ISO, 2024).

Por su parte, la norma ISO 14224:2021 propone incluir en los análisis variables como:

frecuencia de falla;

modo de falla;

consecuencia funcional;

redundancia existente;

facilidad de mantenimiento;

condiciones operativas.

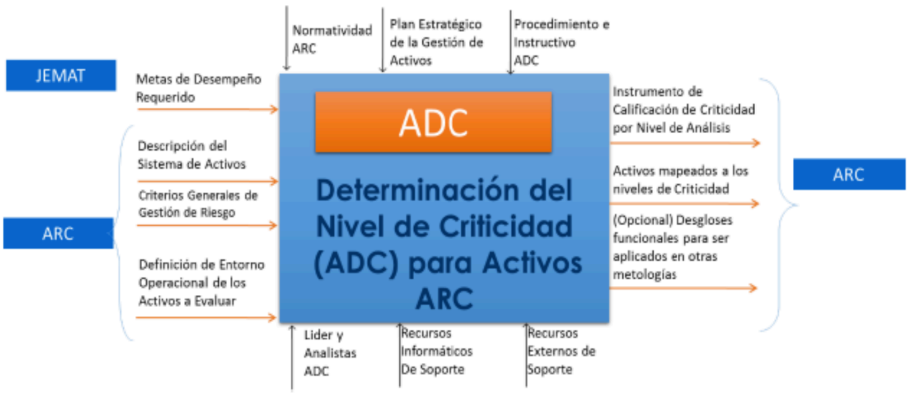
Estos elementos pueden combinarse mediante matrices cualitativas o semicuantitativas que permiten clasificar activos en niveles de prioridad para la toma de decisiones.

Enfoque metodológico aplicado en la Armada

La Armada Nacional ha formalizado el análisis de criticidad a través del procedimiento técnico MAN-PT-051-JEMAT, el cual establece los lineamientos para clasificar los activos según su importancia técnica y funcional. Este procedimiento ha sido aplicado en unidades de superficie como las OPV, lo que ha permitido estructurar modelos de priorización para la planificación del mantenimiento, el control de riesgos y la asignación de recursos técnicos y logísticos (Proyecto) et al., 2022).

Figura 20

Determinación del nivel de criticidad (ADC) para activos en la Armada Nacional



Nota. La figura representa los elementos normativos, técnicos y operativos que estructuran el procedimiento institucional para determinar la criticidad de los activos, como

parte del enfoque de gestión del riesgo en la Armada Nacional. Fuente: Procedimiento para Análisis de Criticidad código MAN-PT-051-JEMAT.

La metodología adoptada se basa en una clasificación cualitativa de tres niveles de criticidad, que agrupa los activos según su impacto en la disponibilidad operativa, la seguridad de la unidad, el soporte logístico y el cumplimiento de la misión. Los criterios empleados incluyen:

La metodología adoptada se basa en una clasificación cualitativa de tres niveles de criticidad, estructurada según el impacto que cada activo puede generar en la operación naval. Esta clasificación considera los criterios definidos por el modelo institucional de gestión del riesgo de la Armada Nacional, los cuales son:

Capacidad operativa de la Armada: valora si la falla del equipo limita o compromete el desempeño funcional de la unidad.

Cumplimiento de la misión: analiza el efecto de la indisponibilidad del activo sobre la ejecución de las tareas asignadas.

Seguridad del personal: identifica si la falla del equipo puede poner en riesgo la integridad física de la dotación.

Impacto económico: determina las consecuencias financieras directas e indirectas derivadas de la falla del equipo, que incluye costos de recuperación, tiempo de inactividad y afectación presupuestal.

Impacto ambiental: evalúa el potencial de afectación al entorno natural ante una falla o evento no deseado.

Impacto en la imagen institucional: considera el efecto que una falla crítica podría tener en la percepción pública o en la confianza estratégica.

Estos criterios permiten asignar una criticidad operativa coherente con la realidad táctica de cada unidad naval y facilitan su integración en procesos de mantenimiento,

planeación logística y soporte a la toma de decisiones estratégicas (Armada Nacional, 2022).

La clasificación resultante se define como:

Criticidad 1: equipos sin redundancia, cuya falla compromete la seguridad, la operación táctica o la disponibilidad inmediata del buque;

Criticidad 2: equipos relevantes, pero con respaldo funcional o cuyo fallo permite continuar la operación con restricciones;

Criticidad 3: equipos auxiliares o de baja prioridad operativa, cuya falla no interrumpe la misión ni representa un riesgo significativo.

Esta metodología ha sido aplicada con éxito en unidades OPV, como se evidencia en el documento técnico de criticidad analizado. En dicha unidad, se identificaron 291 equipos, distribuidos de la siguiente forma:

10 equipos clasificados como Criticidad 1.

60 equipos clasificados como Criticidad 2.

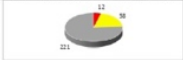
221 equipos clasificados como Criticidad 3.

Figura 21

Clasificación de criticidad operativa aplicada a unidades OPV en la Armada Nacional

OPV		RIESGO NEGAN.	IMPACTO						PISO ENT. PONDERA
100	110013718	CASCO 101	R0	B	M	A	A	B	A	1
100	110013719	SUPERESTRUCTURA 101	R0	B	M	M	A	B	A	1
100	110013720	PANEL DE CONTROL 1 CATHELCO 104	R0	B	B	B	B	B	B	3
100	110013721	PANEL DE CONTROL 2 CATHELCO 204	R0	B	B	B	B	B	B	3
100	110013722	PANEL DE CONTROL 3 CATHELCO 304	R0	B	B	B	B	B	B	3
100	110013723	PANEL CONTROL TIRISTOR CATHELCO 404	R0	B	B	B	B	B	B	3
200	110012434	MOTOR PROPULSOR No 1	R0	B	A	M	A	M	M	1
200	110012435	MOTOR PROPULSOR No 2	R0	B	A	M	A	M	M	1
200	110013740	POWER_PACK_HIDRAULICO_CPP1 308	R0	B	B	B	B	B	B	3
200	110013762	BOMBA STAND BY LUBRICACION MP No 2 104	R0	B	B	B	B	B	B	3
200	110013763	MOTOR ELECTRI BOMBA STAND BY LUB MP No	R0	B	B	B	B	B	B	3
200	110013764	BOMBA STAND BY LUBRICACION MP No 1 304	R0	B	B	B	B	B	B	3
200	110013765	MOTOR ELECTRI BOMBA STAND BY LUB MP No	R0	B	B	B	B	B	B	3
400	17685128	AIS 303	R0	B	M	B	M	B	B	2
400	17685129	MODULO REPETIDOR TRANSAS 4100 102	R0	B	M	B	M	B	M	2
400	17685130	WECDIS-TRANSAS 202	R0	B	M	B	M	B	M	2
400	110017168	Director Tiro 20MM 7	R0	B	B	A	A	B	A	1
400	110017170	Director Tiro Babor 9	R0	B	B	A	A	B	A	1
400	110017169	Director Tiro Estribor 8	R0	B	B	A	A	B	A	1
400	110017167	Director Tiro Shapo 6	R0	B	M	A	A	B	A	1
400	110017173	GMDSS CONSOLA 12	R0	B	M	A	M	B	M	2
500	110013855	E27 EXTRACTOR CUARTO DE COMPRESORES 1616	R0	B	B	M	B	B	B	2
500	110013849	E32 EXTRACTOR CUARTO COMPACTADOR BASURA 1016	R0	B	B	M	B	B	B	2
500	110013850	E33 EXTRACTOR TALLER DE CUBIERTA 1116	R0	B	B	M	B	B	B	2
500	110013851	E34 EXTRACTOR CUARTO DE CAMBIADO 1216	R0	B	B	M	B	B	B	2
500	110013852	E36 EXTRACTOR PAÑOL DE PINTURA 1316	R0	B	B	M	B	B	B	2
500	110013853	E38 EXTRACTOR CUARTO EQUIPOS ABORDAJE 1416	R0	B	B	M	B	B	B	2
500	110013854	E42 EXTRACTOR HANGAR 1516	R0	B	B	M	B	B	B	2
500	110013856	E47 EXTRACTOR SERV/OMOTOR 113	R0	B	B	M	B	B	B	2
500	110013873	EVAPORADOR CUARTO FRIO 506	R0	B	M	M	B	B	M	2
500	110013874	EVAPORADOR CUARTO VIVERES FRESCOS 606	R0	B	M	M	B	B	M	2
500	110013865	FAN COIL CAMARA JEFES 1013	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013864	FAN COIL CAMARA OFICIALES 913	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013862	FAN COIL CIC 713	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013868	FAN COIL COCINA 1313	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013829	FAN COIL CUARTO CONTROL DE ENIERIA 102	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013861	FAN COIL CUARTO DE RADIO 613	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013863	FAN COIL FDO 813	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013830	FAN COIL HANGAR 202	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013860	FAN COIL PUENTE BABOR 513	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013859	FAN COIL PUENTE ESTRIBOR 413	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013866	FAN COIL RANCHO GENERAL 1113	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013867	FAN COIL SALON MULTI PROPOSITOS 1213	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013831	FAN COIL TALLER 102	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013914	GRUA PALFINGER 312	R0	B	M	B	B	B	B	2
500	110013942	macmurdo- BOYA EPIRB 65 PLUS 1236	R0	B	B	A	B	B	B	2
500	110013986	MOTOR ELECTRICO BOMB ACEITE SUCIO 204	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013987	MOTOR ELECTRICO BOMB ENT COMB 204	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013988	MOTOR ELECTRICO BOMB LODOS 404	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013907	MOTORES_ELECTRICOS BOW THRUSTHERS 808	R0	B	M	B	B	B	B	2
500	110013981	PLANTA_TRATAMIENTO AGUAS RESIDUALES 306	R0	B	M	A	A	A	M	1
500	110013975	POWER_PACK_HIDRAULICO_RAMPA 103	R0	B	B	B	M	B	B	2
500	110013892	SIST TRANSF DE GASOLINA 104	R0	B	B	B	B	B	B	3
500	110013978	WINCHE DE SISTEMA DE IZADA Y ARIADA URR	R0	B	B	B	M	B	M	2
600	110013996	COMPACTADOR BASURA 101	R0	B	B	M	B	M	M	2
700	110014001	Cañon 40mm Twin Mount 101	R0	M	A	A	A	B	A	1
700	110014008	GABINETE DE POTENCIA 102	R0	B	M	M	B	B	B	2

EL MENOR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PISO ENT PROMEDIO	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PISO ENT PONDERA	6%	6%	6%	70%	6%	6%



CANT. EQUIPOS CRITICIDAD 1	10	3,4%
CANT. EQUIPOS CRITICIDAD 2	60	20,6%
CANT. EQUIPOS CRITICIDAD 3	221	75,9%
TOTAL	**291**	**100,0%**

Nota. La figura muestra la distribución de equipos según niveles de criticidad en una unidad OPV, como parte del análisis técnico adoptado por la Armada Nacional para orientar el mantenimiento basado en riesgo.Fuente: Procedimiento para Análisis de Criticidad código MAN-PT-051-JEMAT.

Los sistemas con mayor concentración de equipos críticos pertenecen a los grupos constructivos de:

Grupo 200 (Propulsión): motores principales, bombas de inyección, sistema de combustible;

Grupo 500 (Sistemas auxiliares): planta de tratamiento de aguas, bombas de achique, generadores;

Grupo 400 (Mando y gobierno): sistemas de dirección y control de tiro.

Este enfoque permite orientar las actividades de mantenimiento hacia los activos que realmente afectan la capacidad operativa del buque. Además, facilita la planificación de mantenimientos condicionales, la asignación de recursos críticos y el desarrollo de modelos de gestión basados en confiabilidad.

Categorización estructural por sistemas funcionales

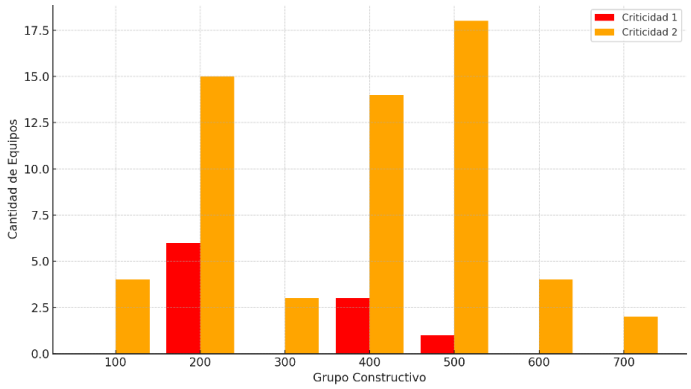
La aplicación del análisis de criticidad en unidades OPV permite estructurar los equipos técnicos no solo por su nivel de importancia, sino también por su función dentro del sistema operativo del buque. Esta organización se realiza conforme a los grupos constructivos, que representan los sistemas funcionales de la unidad de superficie naval.

Cada grupo constructivo agrupa subsistemas y conjuntos que responden a una función operativa específica. Esta categorización estructural no solo mejora el orden técnico, sino que permite vincular la criticidad directamente al cumplimiento de la misión y la continuidad del servicio.

En el caso de la OPV analizada, los equipos clasificados con Criticidad 1 se agrupan principalmente en los siguientes sistemas:

Figura 22

Distribucion de equipos criticos por grupo costructivo (criticidad 1 y 2)



Nota. Elaboración propia con base en datos del procedimiento MAN-PT-051-JEMAT.

Esta distribución muestra que los sistemas que afectan directamente la operatividad, el mando y la autosuficiencia del buque concentran la mayor cantidad de activos críticos. Por el contrario, los grupos constructivos relacionados con habitabilidad (Grupo 600) o elementos no esenciales tienden a contener equipos de Criticidad 2 o 3.

La categorización por sistema funcional también facilita el diseño de rutas técnicas de mantenimiento, al concentrar esfuerzos sobre los sistemas de mayor impacto. Este enfoque permite desarrollar planes de mantenimiento más eficientes, al priorizar inspecciones, repuestos, y competencias técnicas según la función operativa y no solo según el tipo de equipo (Medancich, 2023).

Además, este agrupamiento estructural se puede integrar directamente en plataformas como SAP o el SISCP-C, lo que facilita la visualización de riesgos técnicos por sistema, la trazabilidad de acciones y la integración de métricas CMD para cada grupo constructivo.

Aplicación operativa de la categorización

La clasificación de equipos según su nivel de criticidad tiene como propósito orientar la asignación de recursos, priorizar mantenimientos y reducir el riesgo técnico-operacional. En el modelo adoptado por la Armada Nacional, esta categorización permite enfocar los esfuerzos sobre los activos que comprometen directamente la seguridad, la disponibilidad y la ejecución de la misión.

Sin embargo, su aplicación enfrenta limitaciones prácticas. La planificación de mantenimiento en muchas unidades no responde con precisión al nivel de criticidad asignado. Factores como la falta de recursos, la baja cobertura logística o la ausencia de repuestos influyen en que, incluso los equipos de Criticidad 1, no reciban la atención técnica requerida en tiempo y forma (Medancich, 2023).

A esto se suma una debilidad persistente en la comprensión técnica del concepto de criticidad. En algunos casos, los planificadores de mantenimiento, incluidos ingenieros jefes de buque no reconocen que la criticidad no es estática. Esta puede aumentar a lo largo de la vida útil del equipo, especialmente cuando el activo se encuentra sometido a envejecimiento, obsolescencia o condiciones operativas exigentes. Al no considerarse este factor, se subestima el riesgo técnico ante una falla catastrófica (Hernández, 2019).

La implementación en plataformas como SAP aún no refleja de forma sistemática esta clasificación. Aunque la estructura jerárquica existe, el registro disciplinado de datos y la trazabilidad de eventos no están plenamente consolidados, lo que limita la utilidad de la criticidad como criterio real para la toma de decisiones.

Para lograr que esta herramienta cumpla su propósito, es necesario fortalecer la cultura organizacional, capacitar al personal técnico y establecer un sistema de monitoreo continuo que permita ajustar la criticidad en función de la evolución del activo. Solo así se podrá anticipar el riesgo y asegurar la disponibilidad operativa de manera sostenible (Segura et al., 2024).

Aplicación referencial de OREDA, EsReDA y EIREDA en el análisis de equipos

El análisis técnico de equipos críticos en la Armada Nacional puede fortalecerse mediante el uso complementario de metodologías internacionales como OREDA, EsReDA y EIREDA. Estas herramientas, aunque desarrolladas en entornos industriales, presentan una estructura metodológica que puede adaptarse a los sistemas navales para enriquecer la gestión de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.

OREDA (Offshore Reliability Data) proporciona datos estadísticos sobre tasas de falla, modos de falla y tiempos medios entre fallas (MTBF) y reparación (MTTR) para equipos como bombas, válvulas, motores y generadores. En el entorno naval, estos datos permiten validar la clasificación de criticidad asignada a activos sin historial confiable o

con registros incompletos. También facilitan la estimación de la frecuencia de mantenimiento óptima y la proyección del comportamiento operativo de activos clave (Langseth et al., 1998).

ESReDA (European Safety, Reliability and Data Association) se enfoca en el análisis de eventos no deseados desde una perspectiva ampliada, que integra factores técnicos, humanos y organizacionales. Su utilidad radica en que permite estudiar incidentes donde la falla no solo depende del componente físico, sino también de su interacción con el operador, la respuesta del sistema y las condiciones institucionales (Pineau, 1998).

En el contexto naval, su aplicación resulta especialmente pertinente en sistemas de mando, control, gobierno y navegación, donde el comportamiento del sistema está fuertemente influenciado por decisiones humanas, rutinas operativas y dinámicas del entorno. ESReDA aporta herramientas para:

Analizar eventos adversos desde múltiples dimensiones;

Desarrollar investigaciones de causa raíz estructuradas;

Incorporar aprendizajes institucionales a partir de incidentes técnicos o errores operativos;

Diseñar estrategias de mitigación basadas en patrones sistémicos, no solo en tasas de falla.

EIReDA (European Industry Reliability Data Bank) ofrece información de referencia sobre la mantenibilidad y confiabilidad de equipos industriales, que permite establecer parámetros estándar para MTTR, disponibilidad alcanzada y probabilidad de intervención. Su uso en la Armada puede servir para comparar el desempeño real de equipos navales frente a valores industriales de referencia, lo cual respalda los procesos de mejora continua y decisiones de renovación o rediseño (Procaccia et al., 2024).

Estas metodologías no reemplazan el modelo institucional ni la doctrina técnica vigente, pero sí lo complementan al introducir referencias comparables, criterios cuantitativos y esquemas de validación. Su aplicación permite enriquecer la caracterización de criticidad con datos objetivos, fortalecer la trazabilidad técnica y preparar la base analítica necesaria para alimentar sistemas como el SISCP-C.

Integración de enfoques sistémicos con jerarquías técnicas en mantenimiento

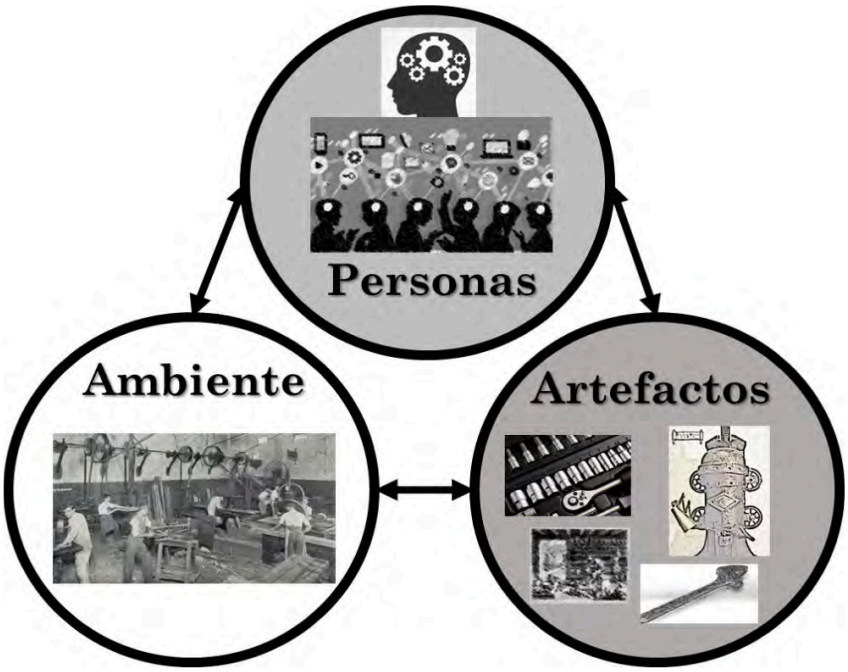
La caracterización de activos críticos debe trascender el enfoque meramente técnico-normativo. Según Mora (2022), el mantenimiento debe consolidarse como un recurso nuclear de la organización, con la incorporación de principios filosóficos, arquitecturas organizacionales y metodologías analíticas. Para ello, se propone una convergencia entre la jerarquía funcional de la ISO 14224, los modelos de análisis de confiabilidad y los enfoques sistémicos de Kant, Grant, Maslow y Wilson (Mora, 2022).

Desde la perspectiva kantiana, el mantenimiento se interpreta como un deber racional, guiado por principios de responsabilidad, sostenibilidad e integridad técnica. Mora ilustra este enfoque a través del modelo sistémico donde las personas, los entornos y los artefactos interactúan éticamente para asegurar la funcionalidad del sistema (Mora, 2009).

Este principio se operacionaliza en el uso riguroso de registros de fallas, análisis de causas y trazabilidad de acciones correctivas, como una expresión moral del deber institucional.

Figura 23

Enfoque sistémico Kantiano

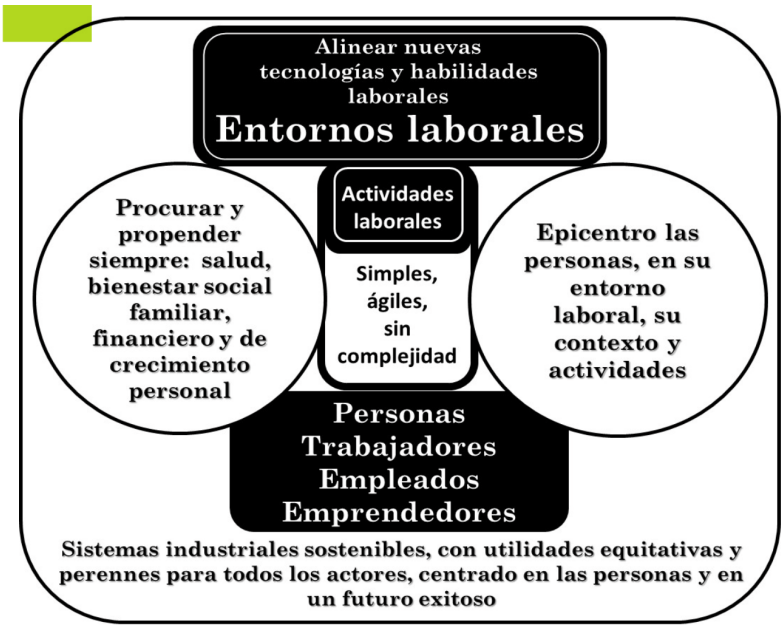


Nota. La figura ilustra la interacción entre personas, entorno y artefactos como elementos naturales de todo sistema técnico-operacional, que sigue el enfoque sistémico desarrollado por Kant. Esta estructura conceptual sustenta metodologías modernas como la ingeniería de sistemas, la inteligencia analítica y la gestión estratégica del mantenimiento. Tomado de Mora, A. G. (2022). Mantenimiento: Vanguardia Integral & Analytics. del El pensamiento ilustrado de Kant, 2019) (Mora A. -G., Mantenimiento estrategico, 2017)(Chiavenato, 2005) (Bertalanffy, Teoría General de los Sistemas, 1994) (Synapsis@, 2014).

El modelo grantiano, por su parte, sitúa al mantenimiento como una competencia central del negocio (core competence), que articula activos, estrategia y conocimiento. La jerarquía de activos debe entenderse como una arquitectura cognitiva que permite decisiones estratégicas, generación de valor y sostenibilidad. Mora refuerza esto con la representación del mantenimiento como una capacidad organizacional en la Figura 24 (Escenarios futuros empresariales con personas y entorno) y la Figura 25 Enfoque global Kant, Grant y Wilson (Mora, 2022).

Figura 24

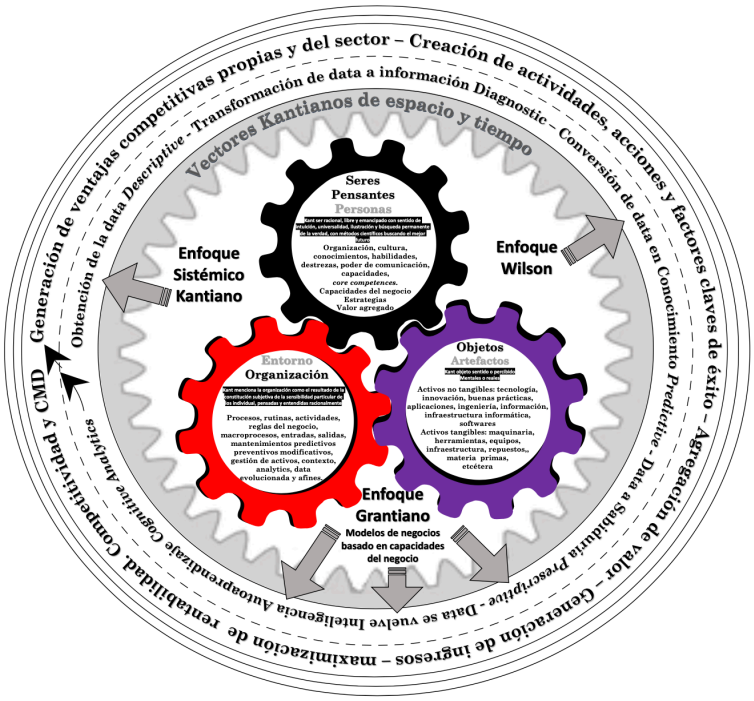
Escenarios Futuros Empresariales con personas y ambito laboral - Grant



Nota. La figura representa los elementos estructurales que configuran los escenarios empresariales del futuro, dentro de una arquitectura organizacional centrada en servicios. Integra entorno, talento humano y estrategia, el cual posiciona al mantenimiento como una competencia central y una función de servicio clave para la sostenibilidad operativa, el desarrollo de capacidades organizacionales y la creación de valor. Tomado de Mora, A. G. (2022). Mantenimiento: Vanguardia Integral & Analytics. Ilustración adaptada y transformada de su original de los autores a continuación citados (Serrano & Sayeras, 2021) (Gimbert, 2009) (WEFM@, 2020).

Figura 25

Enfoque Global Kant & Grant & Wilson, mantenimiento como capacidad nuclear



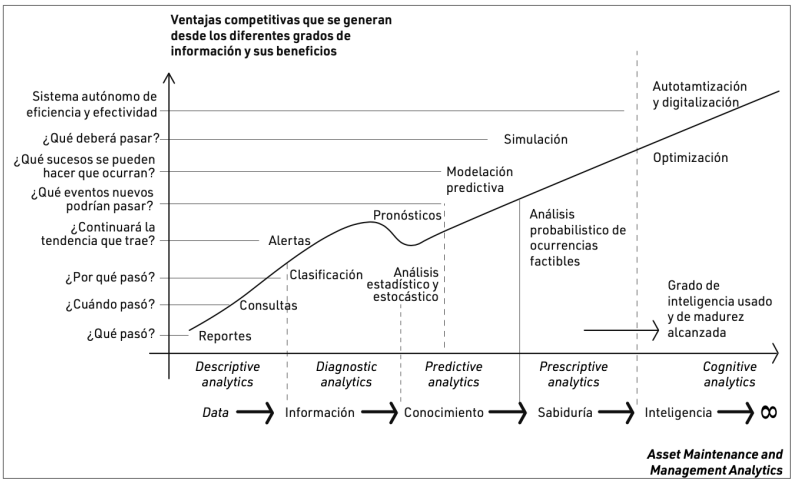
Nota. La figura sintetiza una visión sistémica y estratégica de la gestión de activos, donde convergen tres enfoques: el deber racional y ético del mantenimiento (Kant), su rol como competencia central generadora de valor (Grant) y la arquitectura funcional del conocimiento aplicado (Wilson). Esta ilustración integra los principios filosóficos, organizacionales y operativos que sustentan el mantenimiento como núcleo del negocio (core), orientado a garantizar funcionalidad, maximizar el CMD y fortalecer la competitividad institucional. Tomado de Mora, A. G. (2022). Mantenimiento: Vanguardia Integral & Analytics.

Desde el enfoque de Maslow, Mora reformula la pirámide de necesidades aplicándola a sistemas técnicos: los activos de criticidad 1 representan necesidades básicas (operación mínima), los de criticidad 2 corresponden a eficiencia operativa, y los de criticidad 3 a innovación y valor agregado (Mora, 2022).Esta analogía permite jerarquizar la planificación del mantenimiento en función del aporte de cada activo al cumplimiento de los objetivos institucionales.

Finalmente, el modelo de Wilson complementa esta integración al situar el mantenimiento como un sistema de aprendizaje organizacional. Cada intervención técnica se convierte en insumo para mejorar procesos, recalibrar modelos predictivos y construir conocimiento colectivo. Mora refuerza esta visión en la Figura 26, donde se muestran las cinco dimensiones analíticas aplicadas a la gestión de activos bajo este enfoque (Mora, 2022).

Figura 26

Dimenciones de Wilson con modelo negocio de Grant



Nota. La figura representa el proceso evolutivo de la analítica en mantenimiento, desde los datos hasta la sabiduría organizacional, estructurado bajo el modelo ETL (Extracción, Transformación y Carga). Este proceso, integrado con el enfoque estratégico de Grant y la inteligencia racional kantiana, posiciona el mantenimiento como una capacidad gerencial que transforma activos tangibles e intangibles en ventajas competitivas sostenibles. Tomado de Mora, A. G. (2022). Analytics. Best Seller Internacional.

La integración de jerarquías funcionales con los enfoques sistémicos de Kant, Grant, Maslow y Wilson transforma el mantenimiento naval en una capacidad estratégica de alto valor institucional. Esta convergencia no solo fortalece la identificación de activos críticos, sino que consolida la base técnica y cultural necesaria para alimentar sistemas

como el SISCP-C. Bajo esta lógica, el mantenimiento deja de ser una acción técnica aislada y se convierte en un sistema racional, adaptativo, ético y generador de conocimiento al servicio de la disponibilidad operativa de la Armada Nacional.

Objetivo 3 - ETL y Analítica Predictiva

La Armada Nacional, en concordancia con lo estipulado en el Plan Estratégico Específico de Apoyo a la Fuerza, ha definido una serie de indicadores para la gestión del mantenimiento. Dentro de estos, la disponibilidad de unidades marítimas y fluviales de las Fuerzas Navales figura como el único indicador oficial para evaluar la eficacia del proceso de mantenimiento asignado a la Jefatura de Material. Sin embargo, este indicador carece de una fórmula explícita y se limita a reflejar la proporción de unidades de superficie, sean marítimas o fluviales, que se encuentran operativas para cumplir misiones navales.

Figura 27

Objetivos Estratégicos Específicos Jefatura de Material

OBJETIVOS ESPECÍFICOS JEMAT	NOMBRE INDICADOR
Objetivo Específico No.1: Desarrollar la estructura de medios de los Componentes Operacionales.	1. Cumplimiento estructuración de medios. 2. Cumplimiento Plan de Bajas
Objetivo Específico No.2: Mantener la Disponibilidad de los activos de la Armada Nacional.	3. Nivel de Obsolescencia de los sistemas de la Flota. 4. Disponibilidad de unidades marítimas y fluviales de las Fuerzas Navales. 5. Disponibilidad de unidades de Guardacostas. 6. Disponibilidad de unidades fluviales. 7. Disponibilidad de Unidades Aéreas. 8. Disponibilidad de Unidades terrestres (Vehículos).
Objetivo Específico No.3: Supervisar el desarrollo de las construcciones de nuevas Unidades	9. Supervisión técnica construcción unidades
Objetivo Específico No. 4: Mejorar la condición de la infraestructura física de la Armada Nacional.	10. Nivel de condición de la infraestructura física.
Objetivo Específico No. 5: Definir la infraestructura física institucional.	11. Avance definición infraestructura física. 12. Cubrimiento planes piloto Unidades ARC.
Objetivo Específico No. 6: Impulsar y promover la Gestión de Activos.	13. Avance Implementación Gestión de Activos.
Objetivo Específico No. 7: Desarrollar sosteniblemente los activos institucionales.	14. Reducción huella de carbono.

NOMBRE DEL INDICADOR	FÓRMULA	METAS			
		2024	2025	2026	2027
1. Cumplimiento estructuración proyectos de medios institucionales.	(Sumatoria de porcentajes de avance de la estructuración de los proyectos. / Cantidad de Proyectos con recursos asignados)*100	100%	100%	100%	100%
2. Cumplimiento Plan de Bajas.	(Bajas Efectuadas / Bajas Programadas)*100	100%	100%	100%	100%
3. Nivel de Obsolescencia de los sistemas de la flota.	Nivel de obsolescencia de los sistemas de la Flota = $\left(\frac{\text{Cantidad de sistemas obsoletos de abordo}}{\text{Cantidad de sistemas de abordo}}\right)*100$	20%	20%	20%	20%
4. Disponibilidad de unidades marítimas y fluviales de las Fuerzas Navales.	Sumatoria de la ponderación de la disponibilidad de las Unidades por tipo, a cargo de las Fuerzas Navales.	75%	75%	75%	75%
5. Disponibilidad de unidades de Guardacostas.	Sumatoria de la ponderación de la disponibilidad de las Unidades de Guardacostas.	75%	75%	75%	75%
6. Disponibilidad de unidades fluviales de I.M.	Sumatoria de la ponderación de las disponibilidad de las Unidades fluviales de I.M.	75%	75%	75%	75%
7. Disponibilidad de Unidades Aéreas.	Sumatoria de la ponderación de la disponibilidad de las Unidades Aéreas.	70%	70%	70%	70%
8. Disponibilidad de Unidades terrestres (Vehículos).	Sumatoria de la ponderación de la disponibilidad de las Unidades terrestres.	80%	80%	80%	80%
9. Supervisión técnica construcción unidades.	Promedio del (% de avance por construcción / % de avance planeado por construcción)	100%	100%	100%	100%
10. Nivel de condición de la infraestructura física.	Incremento de la condición de la infraestructura física en estado Excelente, Bueno y Regular: (% I.F. Exc + % I.F Bueno + % I.F. Reg. Del periodo actual) - (% I.F. Exc. + % I.F. Bueno + % I.F. Reg. del periodo anterior).	1%	1%	1%	1%

Nota. Tomado del Plan Estratégico Específico de Apoyo a la Fuerza 2024 – 2027 (Armada Nacional, 2024)

Aunque útil para reportes ejecutivos de alto nivel, esta métrica resulta insuficiente para analizar de forma técnica las causas subyacentes de pérdida de capacidad operativa, ni para sustentar decisiones sobre intervenciones con base técnica rigurosa.

En la actualidad, ni los historiales de equipo ni el módulo SAP de mantenimiento registran métricas asociadas a la confiabilidad o mantenibilidad. Esto implica que componentes críticos como un motor principal, una bomba contra incendios o un equipo de cocina se ponderan por igual en el cálculo de disponibilidad de una unidad, a pesar de sus impactos radicalmente distintos sobre el cumplimiento de la misión.

Este objetivo propone avanzar hacia un enfoque más estructurado e integrador, incorporando junto al indicador de disponibilidad los indicadores CMD, MTBMc (Mean Time Between Maintenance Corrective), MTTR (Mean Time To Repair), MTBMp (Mean Time Between Maintenance Preventive) y Mp (número de mantenimientos preventivos), así como los principales KPI de confiabilidad recomendados por la metodología Business Analytics (Mora, 2022).

Este enfoque permitirá una comprensión más precisa de la degradación operativa y una mejor planificación de los ciclos de mantenimiento basados en datos técnicos y a base de datos históricos.

Para el análisis se seleccionó el subsistema de alta criticidad de una unidad de superficie tipo OPV: el motor propulsor de babor. Este equipo cuenta con un historial de equipo, registros cargados en la plataforma SAP, así como con avisos técnicos, ordenes de trabajo que abarcan aproximadamente los últimos ocho años.

Cabe destacar que el procedimiento de análisis es modular y replicable para cualquier equipo perteneciente a una unidad de superficie, siempre que se cuente con un volumen de datos suficiente para garantizar una aproximación confiable a la realidad operativa.

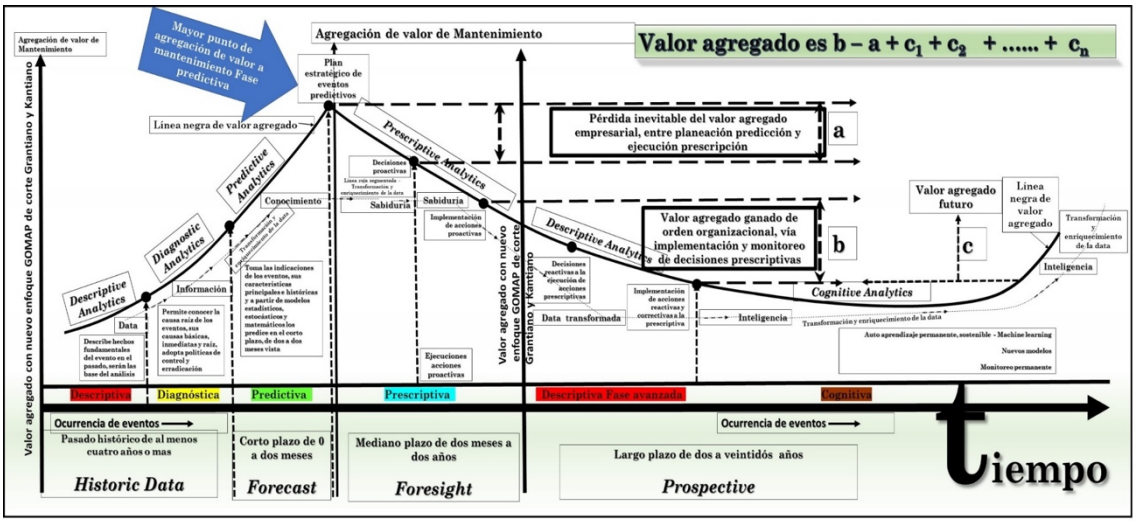
El producto tangible de esta metodología es un conjunto de métricas técnicas y pronósticos a corto plazo que permiten migrar de un modelo tradicional reactivo basado en paradas, reparaciones y registros hacia un esquema proactivo, basado en datos, que

anticipe fallos, reduzca tiempos de indisponibilidad, y contribuya a la optimización del ciclo de vida de los activos.

Generación de valor en la gestión de mantenimiento mediante Analytics

Figura 28

Generación de valor de la analytics bajo las 5 dimensiones del modelo GOMAP



Nota. Analytics y su desarrollo de varias fases y procesos analíticos descriptivo a prescriptivo (Arango y otros, 2011) (Harden y otros, 2004) (Mora A. -G., 2022)(Muños Díaz). Proceso real que sigue la trazabilidad de agregación de valor en las decisiones que se toman, alrededor de la transformación de la data aplicada en la gestión y operación de mantenimiento y activos.

La Figura 28 ilustra cómo la aplicación sistemática de la analítica en sus cinco dimensiones descriptiva, diagnóstica, predictiva, prescriptiva y cognitiva dentro del modelo GOMAP[6], permite generar valor creciente en los procesos de mantenimiento naval. Este modelo analítico, desarrollado por Mora (2022), muestra cómo la transición desde la interpretación de datos históricos hacia un enfoque prescriptivo y cognitivo permite no solo

[6] GOMAP: Gestión y Operación de Mantenimiento y Activos con Producción

anticipar fallos, sino también optimizar las decisiones de mantenimiento en función del ciclo de vida de los activos (Pérez, 2023).

El valor generado se incrementa notablemente a medida que se aplican técnicas de forecast y análisis prospectivo, lo cual permite planear intervenciones de mantenimiento de manera más eficaz. En el estadio prescriptivo, el sistema comienza a proponer acciones optimizadas, y en el estadio cognitivo se consolidan procesos de aprendizaje automatizado que permiten sostener la mejora continua. Esta evolución representa una ruptura con el modelo tradicional reactivo, y establece un marco técnico que respalda la toma de decisiones basada en datos. (Mora, 2022)

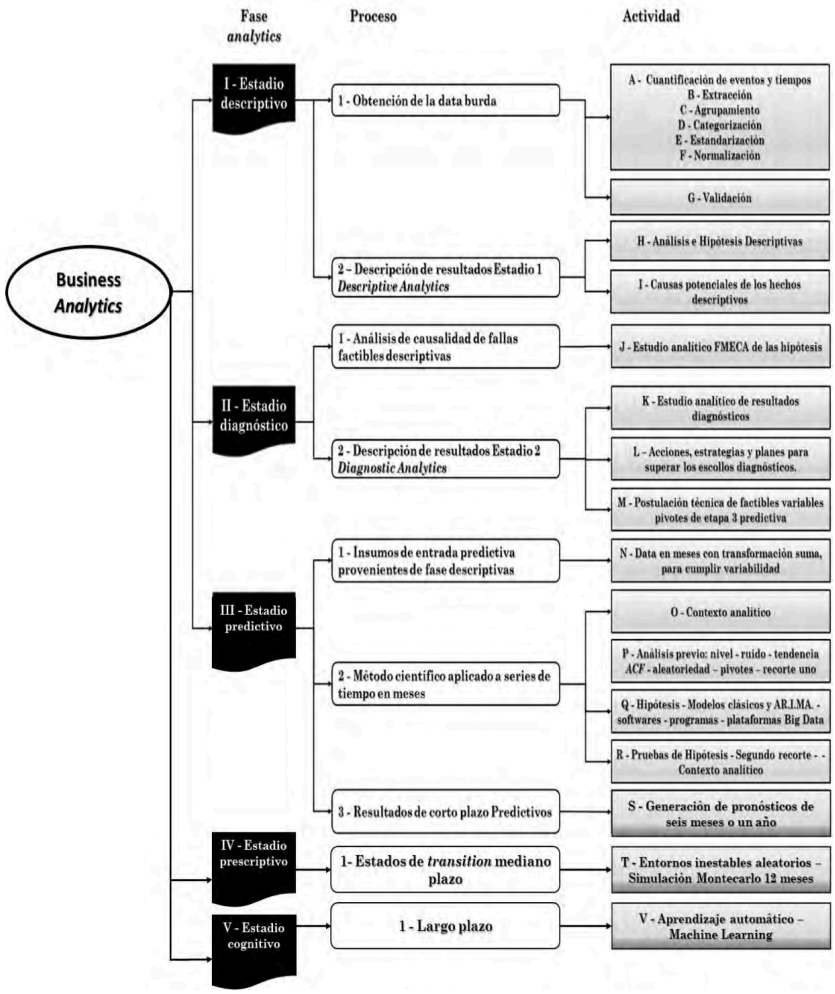
Este enfoque constituye el núcleo estratégico del presente proyecto, cuyo objetivo es transformar la simple observación del comportamiento histórico del motor propulsor de una OPV en un modelo de análisis predictivo, que permita generar recomendaciones operativas basadas en data que aporten valor desde lo operativo a todo el proceso de mantenimiento.

Arquitectura metodológica basada en Business Analytics

La arquitectura metodológica de este proyecto se fundamenta en la aplicación estructurada de Business Analytics en sus cinco estadios: descriptivo, diagnóstico, predictivo, prescriptivo y cognitivo, en concordancia con el modelo GOMAP y el enfoque analítico propuesto por Wilson.(Mora, 2022; Wilson, 2020)

Figura 29

Proceso central Business Analytical



Nota. Tomado de libro analytics mantenimiento vanguardia 2022.(Mora, 2022)

Durante la etapa descriptiva se trabaja con datos históricos en estado crudo denominados data burda[7] provenientes de múltiples fuentes como bitácoras operativas, sistemas de control y el módulo SAP-PM. Estos datos son depurados, estandarizados y

[7] La data burda, también llamada “data de Kant”, representa registros operacionales sin estructurar que deben ser sometidos a procesos ETL antes de aportar valor analítico (Mora, 2022).

transformados mediante procesos ETL, con el objetivo de representar de forma clara y confiable el estado base del sistema (Walha et al., 2024).

En la etapa predictiva, la información se convierte en conocimiento aplicando técnicas como análisis de series temporales, ajustes con distribuciones de Weibull, modelado estocástico y simulaciones Monte Carlo.

Estos métodos permiten anticipar el comportamiento futuro de los indicadores CMD MTBMc, MTTR, MTBMp y Mp y con ello, los niveles de riesgo operativo asociados a cada componente crítico.

Las fases prescriptiva y cognitiva representan un nivel avanzado aún no implementado en este caso de estudio, debido a la ausencia de datos económicos completos y a las limitaciones de madurez digital de las plataformas actuales. No obstante, estos estadios permitirían transformar los pronósticos en planes de acción optimizados.

Con este enfoque metodológico, el mantenimiento trasciende su función operativa tradicional para convertirse en una capacidad estratégica orientada a la generación sostenida de valor agregado institucional (Gutiérrez, 2024).

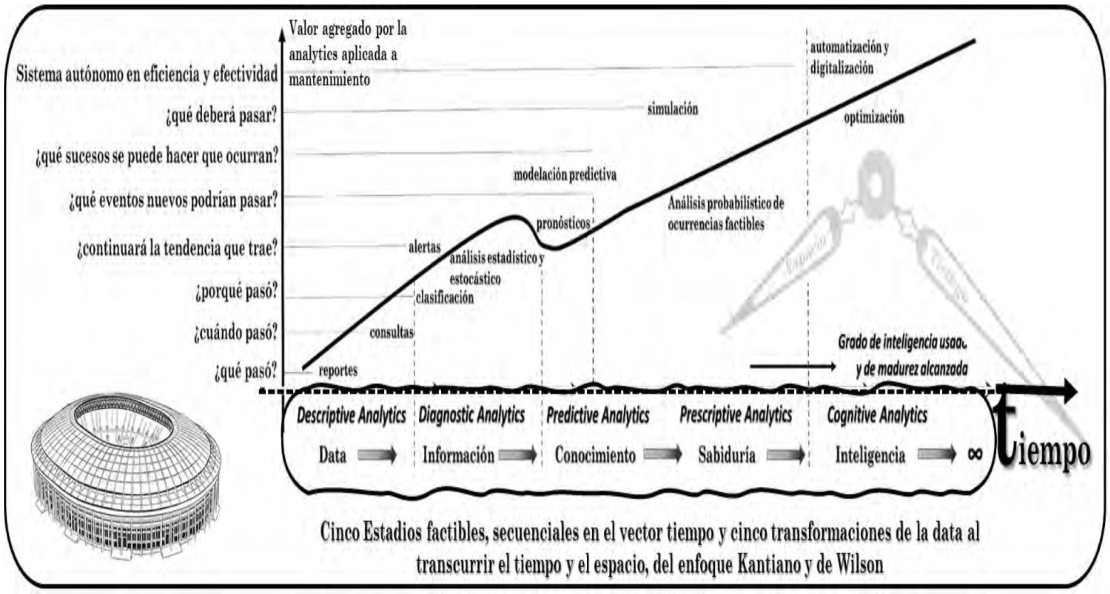
Evolución de la data de lo descriptivo a lo cognitivo

En el contexto actual de la Armada Nacional, las bitácoras operativas, historiales de equipos, los avisos y ordenes del módulo SAP-PM y los registros provenientes de sistemas de control conforman lo que Mora en sus literaturas denomina data burda.

Para transformar estos datos en conocimiento útil, es necesario recorrer cinco estadios analíticos secuenciales adaptados del modelo de Wilson, como se representa en la Figura 30 Analytics con cinco estadios.

Figura 30

Cinco estadios Factibles, secuenciales en el vector tiempo y cinco transformaciones de la data a trascurrir el tiempo y el espacio del enfoque kantiano y de wilson



Nota. Imagen tomada del libro libro analytics vanguardia integral, adaptada por Mora de la imagen de nombre Analytics Mantenimiento Activos, 5 dimensiones Wilson con modelo de negocio Grant, donde ya se observa el umbral completo de los estados y de espacios, denominados estadios y las evoluciones de la data en el tiempo, definida como grado de complejidad y madurez de la Big Data aplicada a GOMAP (Mora, 2022; Villamil, 2021; Wilson, 2020).

Descriptive Analytics: Implica la depuración inicial de la data y la generación de tablas e indicadores básicos, como duración de paradas, frecuencia de fallas y series históricas.

Diagnostic Analytics: Permite clasificar los tipos de fallas, calcular los indicadores CMD MTBMc, MTTR, MTBMp y Mp e identificar correlaciones causales para comprender por qué ocurrió una falla.

Predictive Analytics: Emplea ajustes estadísticos como la distribución de Weibull, donde los parámetros β y η permiten proyectar la probabilidad de falla dentro de ventanas temporales de 6 a meses 12.

Prescriptive Analytics: A través de simulaciones tipo Monte Carlo, se ensayan escenarios de intervención por ejemplo, adelantar mantenimientos preventivos cuantificando su impacto potencial sobre la disponibilidad operacional.

Cognitive Analytics: Este último estadio incorpora sistemas que aprenden de los resultados operativos reales y retroalimentan el proceso, recomendando automáticamente nuevas ventanas de intervención mediante técnicas como inteligencia artificial o modelos de gemelos digitales.

En el gráfico, el eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical el valor agregado que genera la analítica aplicada a la toma de decisiones. Alcanzar al menos el estadio prescriptivo permite migrar desde esquemas reactivos de tipo parar reparar registrar, hacia modelos de mantenimiento anticipativo. Esta evolución es condición necesaria para la futura implementación de un SGA alineado con la norma ISO 55000.

Disponibilidad Alcanzada

La disponibilidad alcanzada representa la probabilidad de que un sistema opere satisfactoriamente cuando se requiere, bajo condiciones normales de operación y sin considerar demoras logísticas ni retrasos administrativos. Este indicador resulta especialmente útil en organizaciones que desean controlar y evaluar el impacto de los tiempos dedicados tanto a mantenimientos planificados (preventivos y predictivos) como a acciones correctivas o modificativas (Mora, 2022; Pupo, 2014).

A diferencia de la disponibilidad inherente, la disponibilidad alcanzada considera de forma explícita los tiempos proactivos de mantenimiento es decir, actividades planificadas que no implican una falla funcional junto con los tiempos reactivos que sí

conllevan pérdida de funcionalidad. Esto permite una visión más integral del comportamiento real del sistema y de la efectividad del mantenimiento aplicado (Sánchez, 2016).

Fórmula general de Disponibilidad Alcanzada:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{MTBM}}{\text{MTBM} + \text{M}_{\text{mean}}}$$

Donde:

MTBM (Mean Time Between Maintenance) es el tiempo medio útil entre actividades de mantenimiento, MTBMc o planificadas MTBMp. Se obtiene como:

$$\text{MTBM} = \frac{1}{\frac{1}{\text{MTBMc}} + \frac{1}{\text{MTBMp}}}$$

Mmean (MeanTime Active Maintenance) es el tiempo promedio que toma cualquier actividad de mantenimiento activa, y se calcula así:

$$\text{M}_{\text{mean}} = \frac{\frac{\text{MTTR}}{\text{MTBMc}} + \frac{\text{MP}}{\text{MTBMp}}}{\frac{1}{\text{MTBMc}} + \frac{1}{\text{MTBMp}}}$$

donde:

MTTR (Mean Time To Repair) representa el tiempo neto necesario para ejecutar mantenimientos correctivos o modificativos.

MP es el tiempo promedio invertido en actividades planificadas, como mantenimientos preventivos, predictivos o proactivos.

Sustituyendo estas expresiones en la fórmula integral, se obtiene:

$$\text{Disponibilidad Alcanzada} = \frac{\dfrac{1}{\dfrac{1}{\text{MTBMc}} + \dfrac{1}{\text{MTBMp}}}}{\dfrac{1}{\dfrac{1}{\text{MTBMc}} + \dfrac{1}{\text{MTBMp}}} + \dfrac{\dfrac{\text{MTTR}}{\text{MTBMc}} + \dfrac{\text{MP}}{\text{MTBMp}}}{\dfrac{1}{\text{MTBMc}} + \dfrac{1}{\text{MTBMp}}}}$$

fuente (Mora A. -G., Mantenimiento Vanguardia analytics, 2022)

Este modelo reconoce que tanto la frecuencia como la duración de las acciones de mantenimiento (planeadas o no) afectan directamente la capacidad del sistema para mantenerse disponible.

De este modo, al incorporar indicadores CMD, se posibilita una evaluación más precisa del rendimiento operacional del activo, especialmente en contextos donde las tareas preventivas o predictivas se presentan con regularidad.

Cabe destacar que, si durante una intervención planificada (por ejemplo, un mantenimiento predictivo) se detecta una falla que requiere una acción correctiva inmediata, esta debe tratarse como una actividad independiente, registrando el tiempo imputado a cada componente por separado, sin mezclar los tiempos en una sola categoría (Moubray, 2004; Wireman, 2004).

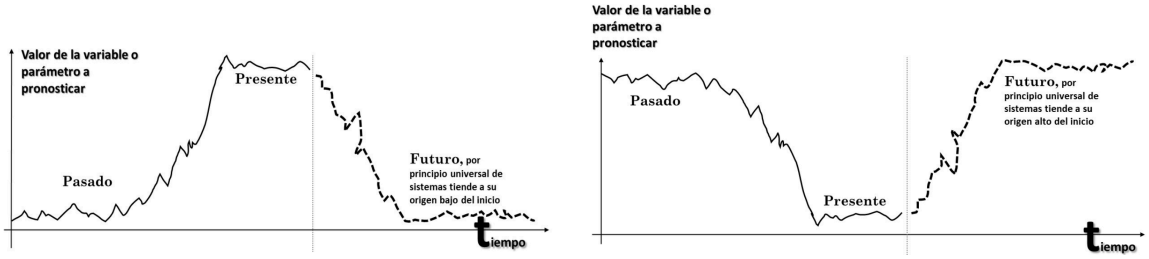
Interpretación analítica del ciclo de vida del activo: curvas de Davies

Los procesos de análisis de datos históricos en mantenimiento presentan particularidades que exigen un enfoque diferente al de otras áreas operativas. Uno de los fenómenos más relevantes es la existencia de colas en la cantidad histórica de la data, lo cual afecta la precisión del análisis si no se delimita adecuadamente el horizonte de observación.

En este contexto, el principio de no retroactividad indica que los eventos de mantenimiento muy antiguos pierden efecto sobre el comportamiento actual del sistema, especialmente si han sido superados por mantenimientos correctivos exitosos o ciclos de mantenimiento planificados más recientes (Mora, 2022).

Figura 31

Tiempos de series con cola inicial a la baja o a la suba



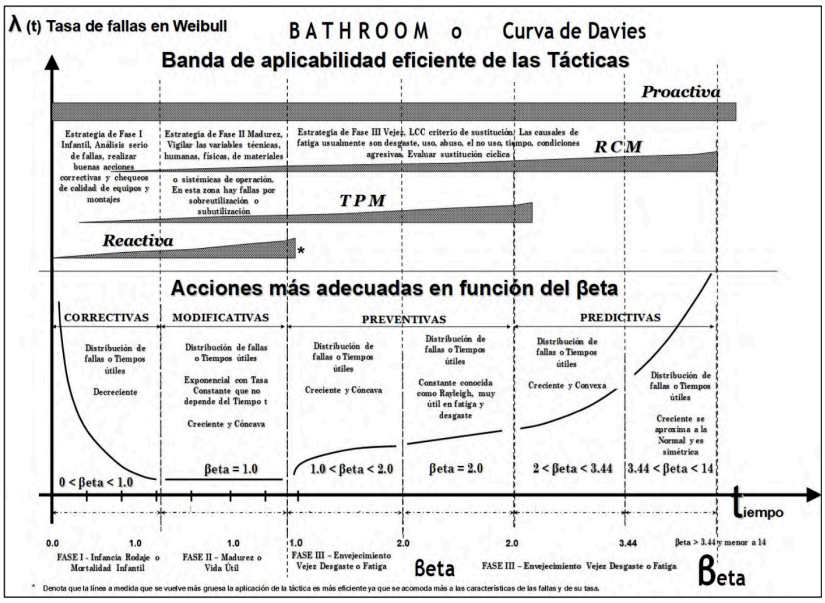
Nota imagen tomada del libro libro Mantenimiento Vanguardia & Analytics, generador de competitividad (Mora, 2022).

A partir de esta base, el análisis estadístico avanza hacia la comprensión del comportamiento futuro del activo, utilizando parámetros derivados de la distribución Weibull, en particular el parámetro β (beta). Este parámetro permite clasificar los modos de falla según su forma, facilitando la selección de la táctica de mantenimiento óptima con base en evidencia numérica (Pala & Aguirre, 2024).

La Figura 32 ilustra este principio con la curva de Davies, la cual asocia cada rango de β con una etapa del ciclo de vida del activo y una estrategia de intervención recomendada:

Figura 32

Estrategias exitosas basadas en Curva de Davies o de la Bañera



Nota imagen tomada del libro Mantenimiento Vanguardia & Analytics, generador de competitividad (Mora, 2022)

Tabla 6

Estrategias exitosas basadas en Curva de Davies x valores óptimos de betas.

Valor de β	Etapa del ciclo de vida	Táctica dominante
β < 1,0	Mortalidad infantil	Correctiva / Análisis RCFA
≈ 1,0	Vida útil estable	TPM / Mantenimiento modificativo
1,0 < β < 2,0	Desgaste temprano	Preventivo basado en tiempo
2,0 ≤ β < 3,44	Fatiga	Predictivo / CBM
≥ 3,44	Fin de vida útil	Proactivo / Sustitución / RCM

Nota. Elaboracion propia adaptado de Estrategias exitosas basadas en Curva de Davies.

Estas curvas deben interpretarse considerando también los efectos de cola en series históricas. Como lo muestra la Figura 32, existe una tendencia natural según la teoría general de sistemas a que las series con largo historial tiendan a retornar al comportamiento original. Esta observación refuerza la importancia de seleccionar

adecuadamente la ventana de análisis, recomendándose una muestra no menor a cuatro años (48 meses) para garantizar estabilidad y representatividad estadística (Bertalanffy, 1996).

En conjunto, estas herramientas permiten transformar los indicadores CMD en insumos estratégicos de decisión, al superponer el valor de β calculado sobre las curvas de Davies y la bañera. Esto no solo mejora la comprensión técnica del estado del activo, sino que habilita decisiones de mantenimiento orientadas a maximizar la disponibilidad, minimizar el riesgo y extender el ciclo de vida útil de sistemas críticos (Rodríguez, 2020; Villamil, 2021).

Recolección de la data

La primera fase del proceso ETL consistió en la recopilación y consolidación de la data operativa, de mantenimiento y de fallas del motor propulsor de babor en una unidad tipo OPV. Esta información fue extraída de tres fuentes principales: avisos y órdenes de trabajo del módulo SAP-PM, registros históricos de partes diarios y historiales del equipo.

Se definió un horizonte de análisis de 8 años con sus respectivos meses para garantizar estabilidad estadística y trazabilidad histórica. La data fue descargada en formato excel, organizándose en una estructura preliminar por evento, donde cada fila representa una intervención o evento de falla.

Durante esta etapa también se realizó la verificación cruzada de fechas, identificadores de equipo y subsistemas, con el fin de evitar duplicidades, omisiones o inconsistencias en la trazabilidad del activo. Todos los registros fueron alineados bajo un esquema común de campos: fecha, tipo de tarea, modo de falla, duración, causa, acción ejecutada y resultado operativo.

El resultado fue una base de datos maestra consolidada, que serviría como insumo para las fases de transformación, análisis descriptivo y modelado predictivo.

Figura 33

Recopilación de Datos de operación y mantenimiento existentes del activo

No	Fecha	Horas de maquinaria	Equipo	Descripción de la Falla	Componente Afectado	Modo de falla	mecanismo de falla	Causa de Falla	Concecuencia de falla	Tiempo de Parada (hrs)	Tempo de raparacion (hrs)		Acciones Correctivas	No Averia Sap
1	23/11/2016	244	MOTOR PROPULSOR BABOR	Fuga de combustible ruptura de tuberia	tuberia de combustible	ELF Fuga externa - combustible	1.1 Fuga	Falla de instalación	menor	72	3		pruebas de banco , cambio de tuberia	
2	06/12/2016	283	MOTOR PROPULSOR BABOR	falla en automatico motor de arranque	motor de arranque	FCO Falla de conexión	4.2 Circuito Abierto	Falla de instalación	menor	8	1		cambio automatico	
3	18/01/2017	686	MOTOR PROPULSOR BABOR	Fuga de aceite por manometro el manometro	manometro aceite	ELP Fuga externa – medio del proceso	1.1 Fuga	Causas combinadas	menor	0	1		cambio de manometro	
4	12/03/2017	744	MOTOR PROPULSOR BABOR	Ruptura de manometro de combustible	manometro combustible	ELF Fuga externa - combustible	1.1 Fuga	Causas combinadas	menor	1	1		cambio de manometro	
5	19/08/2018	3801	MOTOR PROPULSOR BABOR	fuga de combustible racor	racor	ELF Fuga externa - combustible	1.1 Fuga	Desgaste esperado	menor	1	0,2		Ajuste	
6	22/10/2018	4407	MOTOR PROPULSOR BABOR	fuga de refrigerante	tanque de Expansion	ILP Fuga interna – medio del proceso	1.1 Fuga	Causas combinadas	moderada	96	3		verificación x cambio de empaques	
7	30/10/2018	4461	MOTOR PROPULSOR BABOR	fisura correa / falla en turbo cargador	correa / turbo cargador	UBU Deformación general	2.5 Rotura	Causas combinadas	moderada	730	72		cambio de correea / cambio de componentes internos del turbo	
8	21/10/2019	6318	MOTOR PROPULSOR BABOR	fisura en cuerpo del intercooler / desgaste de tapas	interccoler / tanque de Expansion	STD Deficiencia estructural	2.5 Rotura	Causas combinadas	moderada	192	12		cambio de empaque, soldadura de fisura / cambio de componentes	
9	12/02/2019	4749	MOTOR PROPULSOR BABOR	fisura carter / bomba de agua jascob	carter	STD Deficiencia estructural	2.5 Rotura	Causas combinadas	moderada	0	24		cambio de empaques y soldadura	
10	13/02/2019	4779	MOTOR PROPULSOR BABOR	bomba de agua jascob	fuga bomba de agua jascob	FTF Falla de funcionamiento bajo demanda	1.1 Fuga	Desgaste esperado	menor	0	4		cambio de componentes internos	
11	11/03/2019	4869	MOTOR PROPULSOR BABOR	Fuga en Electro valvula 3.2 vias de combustible	Electrovalvula de combustible	ELF Fuga externa - combustible	1.1 Fuga	Ninguna causa encontrada	menor	0	1		cambio de manguera	
12	26/03/2019	5093	MOTOR PROPULSOR BABOR	Sensor de RPM presenta ruptura por roces con damp	Sensor de RPM	PDE Desviación de parámetro	3.3 Señal/indicación defectuosa	Causas combinadas	moderada	0	3		verificación , cambio de sensor	
13	05/08/2020	7209	MOTOR PROPULSOR BABOR	fisura camisa No 2	Camisa No 2	FTF Falla de funcionamiento bajo demanda	2.5 Rotura	Causas combinadas	severas	0			entro a mantto todo el motor en dique, 730 hrs aproximadamente	
14	28/09/2020	7767	MOTOR PROPULSOR BABOR	linea No 1 de combustible fisurada	linea No 1 de combustible	ELF Fuga externa - combustible	2.5 Rotura	Desgaste esperado	menor	0	4		cambio de linea	
15	16/12/2020	8683	MOTOR PROPULSOR BABOR	falla bobina de combustible / falla en turbo cargador	bobina de combustible / turbo ca	FTF Falla de funcionamiento bajo demanda	6.2 Causas Combinadas	Causas combinadas	moderada	192	3		cambio de la bobina / mantenimiento externo contratista de turbo	
16	10/04/2021	9034	MOTOR PROPULSOR BABOR	fuga de combustible, ruptura de acople de vaso filtro	acople vaso filtro	ELF Fuga externa - combustible	2.5 Rotura	Desgaste esperado	menor	0	1		cambio de acople	
17	19/04/2021	9050	MOTOR PROPULSOR BABOR	fuga de combustible, ruptura de acople de vaso filtro	acople vaso filtro	ELF Fuga externa - combustible	2.5 Rotura	Desgaste esperado	menor	0	1		cambio de acople	
18	25/04/2021	9122	MOTOR PROPULSOR BABOR	perdida de potencia en el motor / desajuste de bases	general motor	FTF Falla de funcionamiento bajo demanda	6.2 Causas Combinadas	Causas combinadas	moderada	192	40		intevencion de cotecmar	
19	10/06/2021	9264	MOTOR PROPULSOR BABOR	falla en baterías 12 V	baterías 8D	FOV Error en voltaje de salida	2.4 Desgaste	Capacidad inapropiada	menor	0	3		cambio de baterías	
20	08/07/2021	9303	MOTOR PROPULSOR BABOR	fuga de refrigerante	tanque de Expansion	ILP Fuga interna – medio del proceso	1.1 Fuga	Causas combinadas	moderada	0	2		reparacion de tubo de drenaje	
21	06/10/2021	9875	MOTOR PROPULSOR BABOR	falla de inyectores /presencia de oxido en inyectores	inyectores	FTF Falla de funcionamiento bajo demanda	6.2 Causas Combinadas	Causas combinadas	moderada	0	4		el motor queda pendiente para ejecicion de mantto 10.000 hras / cambio de tubo de refrigerante	
22	11/01/2023	11004	MOTOR PROPULSOR BABOR	fuga de aceite en bomba manual	bomba manual de aceite	ELP Fuga externa – medio del proceso	1.1 Fuga	Causas combinadas	menor	0	0,2		ajuste de racores	
23	24/07/2023	11821	MOTOR PROPULSOR BABOR	falla en baterías 12 V - falla en el arranque	baterías 8D	FOV Error en voltaje de salida	2.4 Desgaste	Capacidad inapropiada	menor	0	2		se realiza cambio de baterías	
24	25/09/2023	11935	MOTOR PROPULSOR BABOR	fuga de aceite	acople	ELP Fuga externa – medio del proceso	1.1 Fuga	Causas combinadas	menor	0	1		cambio de acople	
25	13/10/2023	11978	MOTOR PROPULSOR BABOR	fuga de refrigerante - entre el acople del intecooler y	acople	ELP Fuga externa – medio del proceso	1.1 Fuga	Causas combinadas	menor	0	2		ajuste de componentes	
26	05/12/2023	12807	MOTOR PROPULSOR BABOR	perdida de potencia en el motor	filtro de aire	FTF Falla de funcionamiento bajo demanda	6.2 Causas Combinadas	Causas combinadas	menor	0	2		cambio de filtros de aire	
27	13/02/2024	12932	MOTOR PROPULSOR BABOR	perdida de potencia en el motor - toveraas 1,3,5 en r	toveras	FTF Falla de funcionamiento bajo demanda	6.2 Causas Combinadas	Causas combinadas	moderada	984	4		cambio de toveras	
28	04/04/2024	12935	MOTOR PROPULSOR BABOR	falla en baterías 12 V - falla en el arranque	baterías 8D	FOV Error en voltaje de salida	2.4 Desgaste	Capacidad inapropiada	menor	0	2		se realiza cambio de baterías	
29	25/05/2024	13547	MOTOR PROPULSOR BABOR	falla en motor de arranque - no tiene potencia	motor de arranque	FOV Error en voltaje de salida	2.4 Desgaste	Capacidad inapropiada	moderada	0	4		se Instala 01 uno provicional	
30	14/06/2024	13587	MOTOR PROPULSOR BABOR	alta temperatura / perdida de potencia / falla bomba	falla diferentes componentes	IHT Transferencia de calor insuficiente	6.2 Causas Combinadas	Capacidad inapropiada	moderada	0	32		se realizo mantto a todo el sisetam de refrigeracion del motor.	
31	15/07/2024	13992	MOTOR PROPULSOR BABOR	perdida de potencia en el motor	sistema de refrigeracion obtruido	IHT Transferencia de calor insuficiente	5.2 Contaminación	Causas combinadas	moderada	240	32		mantto todo el sistema de refrigeracion	
32	25/07/2024	14026	MOTOR PROPULSOR BABOR	ruptura de alaves del turbo	turbo cargador	FRO Falla de rotación	2.5 Rotura	Causas combinadas	moderada	72	8		reparacion paracial con componentes remanofacturasdos	

No	Fecha	Hora	Equipo	Descripción del trabajo	Tempo de raparacion (hrs)	Acciones Correctivas
1	22/12/2016	582	MOTOR PROPULSOR BABOR	Cambio de aceite 400 hrs	2	
2	13/12/2016	414	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 800 hrs	2	
3	05/05/2017	1025	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 1000 hrs	2	
4	21/06/2017	1476	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 1400 hrs	2	
5	02/09/2017	1569	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 1600 hrs	2	
6	21/01/2018	2018	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 2000 hrs	2	
7	23/03/2018	2326	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 2200 hrs	2	
8	23/03/2018	2326	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 2400 hrs	2	
9	03/04/2018	2558	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 2600 hrs	2	
10	25/04/2018	2801	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 2800 hrs	2	
11	27/04/2018	2801	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de sello retenedor de aceite de bomba de agua x cambio de refirgerante	4	
12	18/08/2018	3766	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 200 hrs de trabajo	2	
13	27/08/2018	3987	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 200 hrs de trabajo	2	
14	06/09/2018	4175	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 200 hrs de trabajo	2	
15	11/01/2019	4749	MOTOR PROPULSOR BABOR	mantenimiento de sisetma de refrigeracion por parte empresa contratista INGESCARIBE ESC 5000	840	
16	15/02/2019	4749	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 4800 hrs	2	
17	29/03/2019	5113	MOTOR PROPULSOR BABOR	menteniiento a componentes, turbos, verificación de fugas, ajustes de componentes	3	
18	02/04/2019	5202	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 5200 hrs	2	
19	13/09/2019	5866	MOTOR PROPULSOR BABOR	mantenimiento correctivo por ruptura de 01 camisa, verificación de veilas, camisas, valvulas	730	
20	05/01/2020	6472	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 200 hrs de trabajo	2	
21	17/09/2020	7614	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 8000 hrs	2	
22	16/12/2020	8683	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de inyectores	2	
23	30/12/2020	8685	MOTOR PROPULSOR BABOR	mantenimiento correctivo, verificación de culatas, vielas, pistones, anillos muñones, cigüeñal,	1800	2 mese y medio
24	28/04/2021	9174	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio exhaustor	2	
25	28/04/2021	9174	MOTOR PROPULSOR BABOR	verificación del juego axial del cigüeñal /alineacion del motor / verificación inyectores	8	
26	04/05/2021	9175	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite para pruebas de funcionamiento	2	
27	18/07/2021	9310	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de cable de aceleracion	2	
28	14/09/2021	9455	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite por horas	2	
29	02/02/2022	10179	MOTOR PROPULSOR BABOR	mantto esc 10.000 hrs-	1296	54 dias
30	15/04/2022	10198	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de aceite 50 hras de pues de mantto 10.000	1	
31	09/08/2022	10483	MOTOR PROPULSOR BABOR	alienacion del motor	3	
32	25/05/2023	11445	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de acite x 400 hras de trabajo	2	
33	24/07/2023	11821	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de acite x 400 hras de trabajo	2	
34	11/10/2023	11956	MOTOR PROPULSOR BABOR	mantenimiento intercooler	4	
35	13/10/2023	11978	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de termostato	2	
36	01/11/2023	12316	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de acite x 400 hras de trabajo	2	
37	23/11/2023	12606	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de acite x 400 hras de trabajo	2	
38	03/04/2024	12932	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de acite x 400 hras de trabajo	2	
39	25/05/2024	13547	MOTOR PROPULSOR BABOR	mantenimiento de alternador	168	mantto externo una semana
40	05/06/2024	13547	MOTOR PROPULSOR BABOR	alienacion del motor	2	
41	06/06/2024	13547	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de acite x 400 hras de trabajo	2	
42	25/07/2024	14026	MOTOR PROPULSOR BABOR	cambio de acite x 400 hras de trabajo	2	
43	30/07/2024	14030	MOTOR PROPULSOR BABOR	mantinimento a sistema de exaustubacion	8	
44	31/07/2024	14030	MOTOR PROPULSOR BABOR	mantenimiento a sistema de refrigeracion	32	

Nota. Elaboración propia recolección de data en formato Excel.

Consolidación, limpieza y estructuración de la base de datos CMD

El formato estándar CMD en Excel, propuesto por Mora, permitió transformar la data de tiempos útiles entre mantenimientos, a partir de registros obtenidos de las fuentes anteriormente mencionadas. Este proceso de transformación incluyó la homologación de los tiempos de intervención, estructurándolos por tipo de mantenimiento y permitiendo su procesamiento técnico bajo la metodología CMD.

Figura 34

Consolidación, limpieza y estructuración de la base de datos CMD

Datos para Mantenimiento Planeado

TIEMPOS ÚTILES

Dato de	$MTBM_P$	Valor horas promedio mes
Año 1 Mes 1	1	1025217,0000
Año 1 Mes 2	2	3215,0000
Año 1 Mes 3	3	3215,0000
Año 1 Mes 4	4	3215,0000
Año 1 Mes 5	5	3215,0000
Año 1 Mes 6	6	3215,0000
Año 1 Mes 7	7	1133,0000
Año 1 Mes 8	8	1747,0000
Año 1 Mes 9	9	1747,0000
Año 1 Mes 10	10	1747,0000
Año 1 Mes 11	11	3385,0000
Año 1 Mes 12	12	3385,0000
Año 2 Mes 1	13	3385,0000
Año 2 Mes 2	14	3385,0000
Año 2 Mes 3	15	1462,0000
Año 2 Mes 4	16	1462,0000

Fecha y Hora de Inicio	Fecha y Hora de Finalización del Tiempo útil	TIEMPOS ÚTILES NETO (Horas Decimales)		Se deben completar al menos 48 meses	
	13 - martes - diciembre - 2016 a las 09:00 Horas (militar)	1025217,00	UT_1	1025217,00	Año 1 Mes 1
22 - jueves - diciembre - 2016 a las 10:00 Horas (militar)	05 - viernes - mayo - 2017 a las 09:00 Horas (militar)	3215,00	UT_2	3215,00	Año 1 Mes 2
01 - domingo - enero - 2017 a las 00:00 Horas (militar)		3215,00		3215,00	
01 - miércoles - febrero - 2017 a las 00:00 Horas (militar)		3215,00		3215,00	
01 - miércoles - marzo - 2017 a las 00:00 Horas (militar)		3215,00		3215,00	
01 - sábado - abril - 2017 a las 00:00 Horas (militar)		3215,00		3215,00	
05 - viernes - mayo - 2017 a las 09:00 Horas (militar)	21 - miércoles - junio - 2017 a las 14:00 Horas (militar)	1133,00	UT_3	1133,00	Año 1 Mes 3
21 - miércoles - junio - 2017 a las 14:00 Horas (militar)	02 - sábado - septiembre - 2017 a las 09:00 Horas (militar)	1747,00	UT_4	1747,00	Año 1 Mes 4
01 - sábado - julio - 2017 a las 00:00 Horas (militar)		1747,00		1747,00	
01 - martes - agosto - 2017 a las 00:00 Horas (militar)		1747,00		1747,00	
02 - sábado - septiembre - 2017 a las 09:00 Horas (militar)	21 - domingo - enero - 2018 a las 10:00 Horas (militar)	3385,00	UT_5	3385,00	Año 1 Mes 5
01 - domingo - octubre - 2017 a las 00:00 Horas (militar)		3385,00		3385,00	
01 - miércoles - noviembre - 2017 a las 00:00 Horas (militar)		3385,00		3385,00	
01 - viernes - diciembre - 2017 a las 00:00 Horas (militar)		3385,00		3385,00	
21 - domingo - enero - 2018 a las 10:00 Horas (militar)	23 - viernes - marzo - 2018 a las 08:00 Horas (militar)	1462,00	UT_6	1462,00	Año 1 Mes 6
01 - jueves - febrero - 2018 a las 00:00 Horas (militar)		1462,00		1462,00	

Nota. Organización de data en formato inicial macro Free Excel.

La consolidación se llevó a cabo mediante una limpieza sistemática de la información: se eliminaron registros duplicados o inconsistentes, se estandarizaron nomenclaturas técnicas y se unificaron las unidades de tiempo en horas decimales. El resultado fue una base robusta y consistente, apta para cálculos dinámicos y trazabilidad completa del historial técnico.

Posteriormente, se organizó la data por métrica CMD, permitiendo construir bloques analíticos independientes para cada parámetro: MTBMc, MTTR, MP y MTBM. Esta segmentación facilitó la generación de series temporales y comparables, adecuadas para aplicar técnicas de predicción y simulación.

En los meses donde no se reportaron eventos, se aplicó el criterio de conservación de tendencia: se imputó el valor del mes anterior para mantener la continuidad de la serie, y se dejó la celda en gris oscuro como marca visual. Este tratamiento aseguró homogeneidad estadística sin alterar la integridad del análisis.

Figura 35

Aplicacion el criterio de conservación de tendencia

30 - viernes - noviembre - 2018 a las 09:00 Horas (militar)	12 - martes - febrero - 2019 a las 08:00 Horas (militar)	1775,00	UT_7	1775,00	Año 3 Mes 1
01 - sábado - diciembre - 2018 a las 00:00 Horas (militar)		1775,00		1775,00	Año 3 Mes 2
01 - martes - enero - 2019 a las 00:00 Horas (militar)		1775,00		1775,00	Año 3 Mes 3
13 - miércoles - febrero - 2019 a las 08:00 Horas (militar)	13 - miércoles - febrero - 2019 a las 08:00 Horas (militar)	1775,00	UT_8	1199,00	Año 3 Mes 4
13 - miércoles - febrero - 2019 a las 12:00 Horas (militar)	11 - lunes - marzo - 2019 a las 11:00 Horas (militar)	623,00	UT_9		
11 - lunes - marzo - 2019 a las 14:00 Horas (militar)	26 - martes - marzo - 2019 a las 13:00 Horas (militar)	359,00	UT_{10}	2688,00	Año 3 Mes 5
26 - martes - marzo - 2019 a las 14:00 Horas (militar)	21 - lunes - octubre - 2019 a las 15:00 Horas (militar)	5017,00	UT_{11}		
01 - lunes - abril - 2019 a las 00:00 Horas (militar)		2688,00		2688,00	Año 3 Mes 6
01 - miércoles - mayo - 2019 a las 00:00 Horas (militar)		2688,00		2688,00	Año 3 Mes 7
01 - sábado - junio - 2019 a las 00:00 Horas (militar)		2688,00		2688,00	Año 3 Mes 8

Nota. Aplicacion el criterio de conservación de tendencia formato macro Free Excel.

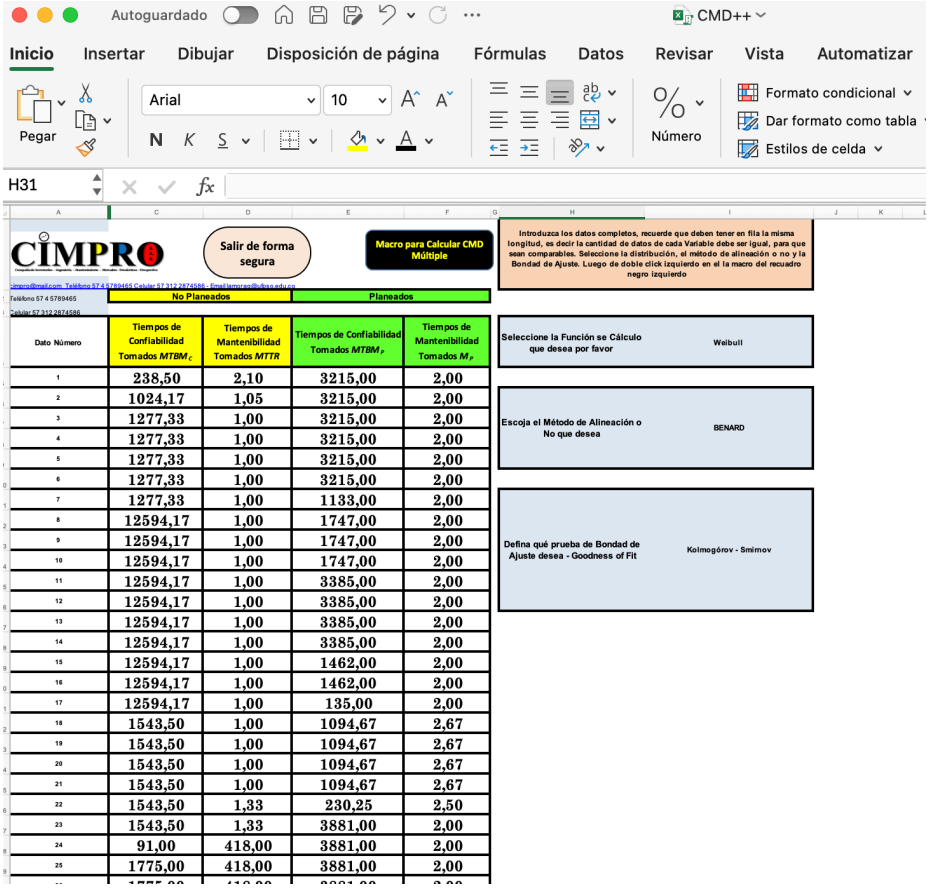
Como resultado, se obtuvo una base de datos organizada, validada manualmente, y apta para el desarrollo de análisis descriptivos, diagnósticos y predictivos bajo la metodología estándar de cálculos CMD.

Análisis descriptivo y diagnóstico

Verificación técnica del análisis descriptivo y diagnóstico por métrica CMD Una vez organizada la base de datos con los registros de mantenimiento correctivo y planificado, se procedió a aplicar la fase descriptiva y diagnóstica del análisis CMD. Esta etapa consistió en verificar, para cada una de las métricas, el cumplimiento de criterios estadísticos y la coherencia técnica de los resultados mediante una tabla resumen, denominada Informe General, ubicada en el archivo Excel CMD++.

Figura 36

Digitacion de Data en formato Free excel



	No Planeados		Planeados	
Dato Número	Tiempos de Confiabilidad Tomados $MTBM_c$	Tiempos de Mantenibilidad Tomados $MTTR$	Tiempos de Confiabilidad Tomados $MTBM_p$	Tiempos de Mantenibilidad Tomados M_p
1	238,50	2,10	3215,00	2,00
2	1024,17	1,05	3215,00	2,00
3	1277,33	1,00	3215,00	2,00
4	1277,33	1,00	3215,00	2,00
5	1277,33	1,00	3215,00	2,00
6	1277,33	1,00	3215,00	2,00
7	1277,33	1,00	1133,00	2,00
8	12594,17	1,00	1747,00	2,00
9	12594,17	1,00	1747,00	2,00
10	12594,17	1,00	1747,00	2,00
11	12594,17	1,00	3385,00	2,00
12	12594,17	1,00	3385,00	2,00
13	12594,17	1,00	3385,00	2,00
14	12594,17	1,00	3385,00	2,00
15	12594,17	1,00	1462,00	2,00
16	12594,17	1,00	1462,00	2,00
17	12594,17	1,00	135,00	2,00
18	1543,50	1,00	1094,67	2,67
19	1543,50	1,00	1094,67	2,67
20	1543,50	1,00	1094,67	2,67
21	1543,50	1,00	1094,67	2,67
22	1543,50	1,33	230,25	2,50
23	1543,50	1,33	3881,00	2,00
24	91,00	418,00	3881,00	2,00
25	1775,00	418,00	3881,00	2,00

Nota. Digitacion de Data en macro Free excel.

Cada métrica MTBMc, MTBMp, MTTR, MP, fue evaluada utilizando la función de distribución Weibull, con el fin de ajustar los datos a un modelo que permitiera interpretar la forma de las fallas y proyectar su comportamiento. Para cada conjunto de datos, se calcularon los siguientes elementos:

β (beta): parámetro de forma de la distribución, utilizado para interpretar el tipo de fallo y su severidad. Un valor $\beta \approx 1$ sugiere fallas aleatorias, $\beta < 1$ indica mortalidad infantil, y $\beta > 1$ evidencia desgaste progresivo.

η (eta): conocido como vida característica, representa el punto donde el 63,2% de las fallas ya ha ocurrido. Es una medida robusta del comportamiento del sistema a lo largo del tiempo.

Alineación: verificación visual del modelo ajustado (Benard), que confirma si los datos empíricos siguen el patrón teórico de Weibull.

Goodness of Fit: prueba estadística de ajuste, validada principalmente con Kolmogórov–Smirnov, que determina si la función se ajusta con significancia aceptable a los datos observados.

Cumplimiento del ajuste: expresado como OK cuando se verifica la validez estadística del modelo.

Tiempo calculado: corresponde al valor proyectado del , o el que se obtiene como salida del modelo ajustado, útil para comparaciones con el histórico o para simulaciones futuras.

La siguiente figura representa un extracto de dicha tabla resumen, correspondiente al análisis de confiabilidad no planificada (MTBMc). Se observa cómo se estructuran los datos por muestra (dato número), verificando en cada caso si el modelo cumple estadísticamente y cuáles son los valores finales calculados para los parámetros.

Figura 37

Verificación estadística y técnica de los parámetros CMD

Confiabilidad - No Planeada (Correctiva)									
MTBM $_C$									
Dato Número	Función Distribución	Tiempo	βeta *MTBM* $_C$ de Confiabilidad	η - Eta de Confiabilidad No Planeada *MTBM* $_C$	Alineación	Goodness of Fit	Cumple o no Bondad de Ajuste - Goodness of Fit	MTBM$_C$ Calculado	Tiempo Confiabilidad Calculado *MTBM* $_C$
0		238,50							
1		1024,17							
2	Weibull	1277,33	1,01	1070,26	Benard	Kolmogórov - Smirnov	OK	1067,713043	1067,713043
3	Weibull	1277,33	1,12	1218,74	Benard	Kolmogórov - Smirnov	OK	1170,256637	1170,256637
4	Weibull	1277,33	1,21	1310,38	Benard	Kolmogórov - Smirnov	OK	1229,751446	1229,751446
5	Weibull	1277,33	1,29	1370,97	Benard	Kolmogórov - Smirnov	OK	1267,659307	1267,659307
6	Weibull	1277,33	1,36	1413,13	Benard	Kolmogórov - Smirnov	OK	1293,392156	1293,392156
7	Weibull	12594,17	0,83	2491,25	Benard	Kolmogórov - Smirnov	OK	2752,038574	2752,038574
8	Weibull	12594,17	0,75	3424,52	Benard	Kolmogórov - Smirnov	OK	4061,227525	4061,227525
9	Weibull	12594,17	0,73	4296,25	Benard	Kolmogórov - Smirnov	OK	5232,289241	5232,289241
10	Weibull	12594,17	0,72	5111,87	Benard	Kolmogórov - Smirnov	OK	6272,068568	6272,068568
11	Weibull	12594,17	0,73	5871,20	Benard	Kolmogórov - Smirnov	OK	7191,17703	7191,17703
12	Weibull	12594,17	0,73	6575,09	Benard	Kolmogórov - Smirnov	OK	8002,397087	8002,397087
13	Weibull	12594,17	0,74	7225,74	Benard	Kolmogórov - Smirnov	OK	8718,741849	8718,741849
14	Weibull	12594,17	0,75	7826,25	Benard	Kolmogórov - Smirnov	OK	9352,391805	9352,391805

Nota. Verificación estadística y técnica de los parámetros CMD aplicados al análisis descriptivo y diagnóstico. Fragmento de la pestaña “Informe General”, archivo CMD++.

Este mismo proceso se aplicó a todas las métricas mencionadas, permitiendo no solo validar el modelo, sino también generar un set de datos confiables y comparables que alimentan las etapas posteriores de simulación y toma de decisiones prescriptivas.

Análisis predictivo: integración de series temporales y distribución de Weibull

Tras la verificación estadística y técnica de las métricas CMD en la etapa descriptiva y diagnóstica, se avanzó hacia el análisis predictivo mediante el uso combinado de series temporales y ajustes de distribución Weibull.

Este enfoque permitió estimar con mayor certeza el comportamiento futuro (6 meses) de la confiabilidad y mantenibilidad del motor propulsor de babor, incorporando tanto el patrón histórico como los parámetros β y η obtenidos de cada serie.

Figura 38

Estimación de pronóstico a partir de datos calculados

Ordinal	Date	MTBMc	MTTR	MTBMp	Mp
1	1/1/18	238,5	70,5	1025217,0000	2,0000
2	1/2/18	1024,17	8	3215,0000	2,0000
3	1/3/18	1277,33	1	3215,0000	2,0000
4	1/4/18	1277,33	1	3215,0000	2,0000
5	1/5/18	12594,17	1	3215,0000	2,0000
6	1/6/18	12594,17	1	3215,0000	2,0000
93	Pronóstico mes 1	3731,43	36	1345	18,2886
94	Pronóstico mes 2	3679,35	33,07	813,58	18,2926
95	Pronóstico mes 3	3627,27	30,54	466,51	18,2965
96	Pronóstico mes 4	3575,18	166,53	2133,58	18,3005
97	Pronóstico mes 5	3523,1	173,09	2110,98	18,3044
98	Pronóstico mes 6	3471,02	172,75	2036,13	18,3083
		MTBMc	MTTR	MTBMp	Mp

La función de confiabilidad Weibull fue aplicada como modelo de base para proyectar el valor esperado de las métricas CMD (MTBMc, MTBMp, MTTR, MP) a través de la ecuación general:

$$\text{MTBMc o MTBMp o MTTR o MP } = \eta * \left(\gamma + \frac{1}{\beta}\right) = \eta * \text{Gamma}\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

donde:

η (eta) eta o factor de escala, denota el rango de trabajo del equip

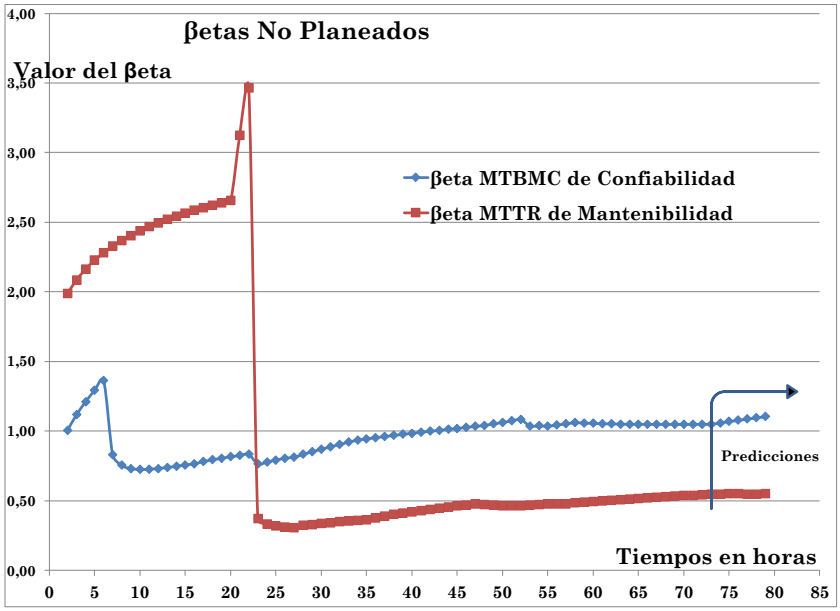
β (beta) βeta o factor de forma en que el equipo falla o funciona. Se asocia y refiere a mantenimiento

γ = gammaΓ es la función gamma natural, que facilita el ajuste del valor medio esperado.

Este modelo se nutrió directamente de los datos estructurados en el archivo CMD++, y generó salidas visuales y graficas de alto valor técnico, analisadas a continuacion.

Figura 39

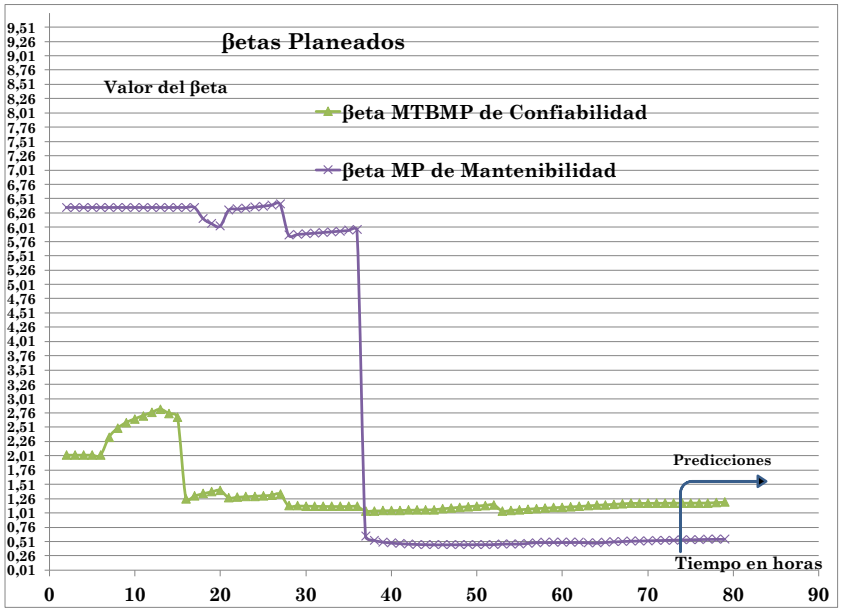
Comportamiento técnico de los β no planeados: confiabilidad (MTBMc) y mantenibilidad correctiva (MTTR)



La figura evidencia una gestión correctiva inestable: el β del MTTR presenta una oscilación crítica, pasando de alta severidad (>3,5) a una dispersión extrema (<0,5), lo que refleja fallas en la consistencia de los tiempos de reparación. Simultáneamente, el β del MTBMc se mantiene por debajo de 1, indicando fallas aleatorias y no controladas. Este patrón confirma que la mantenibilidad y confiabilidad correctiva del motor propulsor a babor operan con alta variabilidad, limitando la posibilidad de establecer planes de acción predictivos o prescriptivos eficaces.

Figura 40

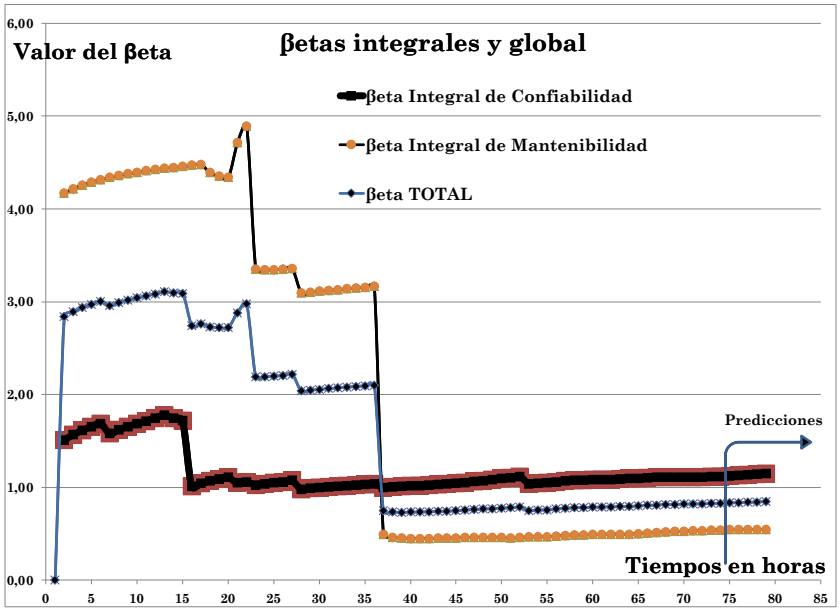
Evaluación de los β de mantenimiento planificado: confiabilidad (MTBMp) y mantenibilidad preventiva (MP)



La figura muestra que los valores β asociados al mantenimiento planificado (MTBMp y MP) inician en niveles altos, lo cual refleja una buena estructuración preventiva en las primeras horas. Sin embargo, a partir del tiempo 35, ambos indicadores caen drásticamente: el β de MP desciende por debajo de 0,6 y el de MTBMp se mantiene entre 1,0 y 1,3. Esta caída indica pérdida de control y consistencia en la planificación del mantenimiento, comprometiendo su efectividad. Las predicciones finales reflejan una estabilización, pero en niveles bajos, lo cual limita la capacidad del sistema para sostener una estrategia de mantenimiento predictivo o prescriptivo efectiva.

Figura 41

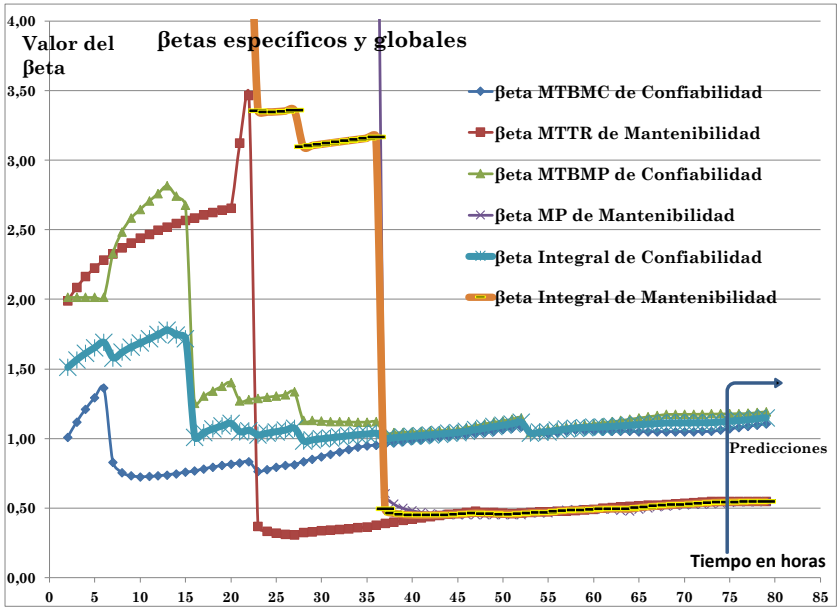
Análisis integral de los β técnicos: confiabilidad, mantenibilidad y β total con proyecciones operativas



La figura evidencia una pérdida progresiva de consistencia técnica en el sistema: los valores de β integral de confiabilidad y β total descienden desde niveles superiores a 3 hasta estabilizarse por debajo de 1,5, lo que indica aumento en la aleatoriedad de las fallas. De forma similar, el β integral de mantenibilidad cae desde 5 a cerca de 1, reflejando una degradación significativa en la capacidad de respuesta del mantenimiento.

Figura 42

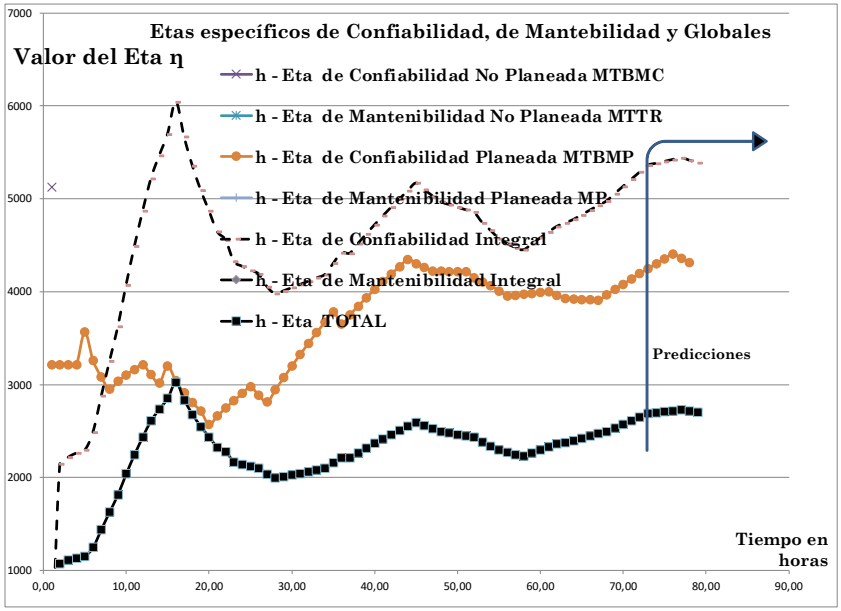
Comportamiento comparado de los β técnicos por métrica CMD



La figura consolida el comportamiento de los βetas específicos e integrales, mostrando que, aunque algunas métricas comienzan en niveles aceptables, todas convergen hacia valores bajos, por debajo de los umbrales ideales para una gestión táctica robusta (>2,45). Las predicciones proyectadas reflejan una estabilización deficiente, sin señales claras de recuperación técnica en el corto plazo. Se recomienda implementar acciones correctivas estructuradas sobre el plan de mantenimiento, fortalecer el análisis de fallas y revisar la asignación de recursos técnicos para revertir esta tendencia y habilitar una posible transición a esquemas prescriptivos.

Figura 43

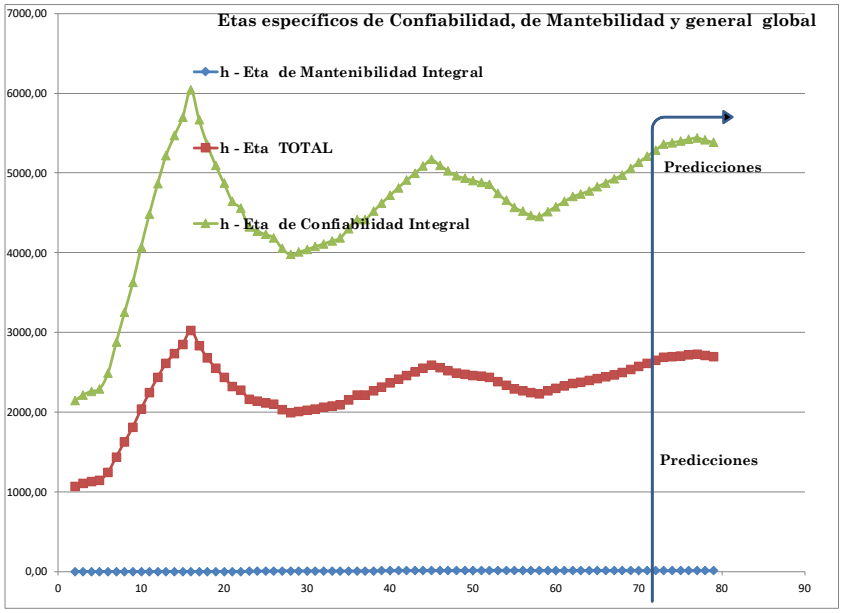
Análisis comparativo de los Etas específicos y globales por métrica CMD



La figura muestra un comportamiento positivo y progresivo de las etas (η) asociadas a confiabilidad y mantenibilidad, especialmente en las métricas integrales y planificadas. Se destaca una tendencia creciente y estable en los valores η total, η de confiabilidad planificada (MTBMp) y η de mantenibilidad planificada (MP), lo que sugiere que el sistema ha logrado extender sus tiempos útiles operacionales. Las predicciones refuerzan esta mejora sostenida. Se recomienda consolidar esta tendencia fortaleciendo la planeación del mantenimiento y asegurando la ejecución oportuna, lo cual podría habilitar una transición futura hacia estrategias prescriptivas sostenibles.

Figura 44

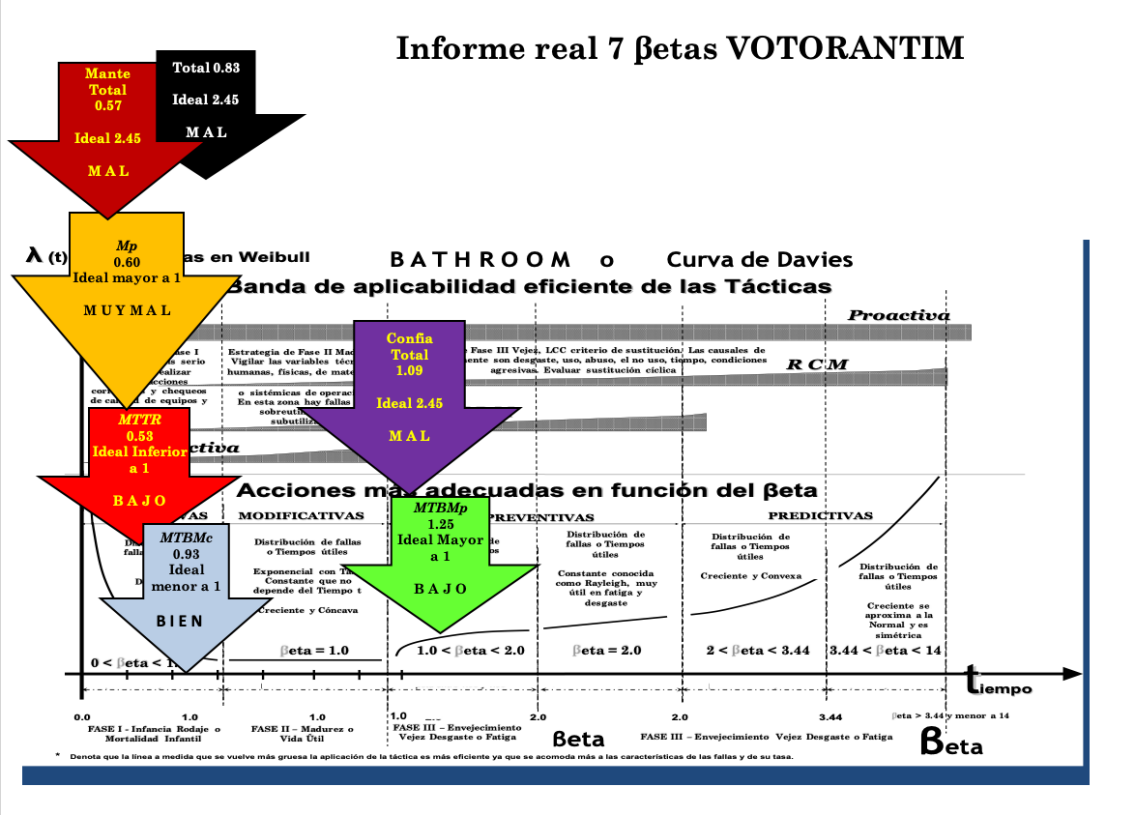
Análisis de las Etas integrales: confiabilidad, mantenibilidad y Eta total con proyecciones operativas



La figura refleja un comportamiento positivo en la η de confiabilidad integral, que crece sostenidamente hasta superar las 6000 horas y mantiene estabilidad en las proyecciones, lo que indica mayor tiempo útil antes de falla. En cambio, la η de mantenibilidad integral se mantiene cercana a cero, lo que revela deficiencias críticas en la capacidad de ejecutar reparaciones eficaces. La η total muestra una mejora progresiva, pero condicionada por la debilidad de la mantenibilidad. Se recomienda intervenir los procesos correctivos para alinear los tiempos de reparación con el desempeño de confiabilidad alcanzado.

Figura 45

Informe real 7 βetas VOTORANTIM acuerdo resultados obtenidos



Nota. Todos los datos presentados fueron extraídos directamente del análisis técnico realizado y pueden ser verificados en el archivo CMD++.

La curva de la bañera, utilizada como referencia para determinar la aplicabilidad táctica de las estrategias de mantenimiento, permite ubicar con precisión los valores β calculados durante el análisis del motor propulsor de babor.

Estos valores, al ser contrastados con los rangos ideales, evidencian un comportamiento técnico aún inmaduro y con predominancia de fases operativas asociadas a alta dispersión o intervenciones inconsistentes.

Si bien el β del MTBMc (0,93) se aproxima al límite funcional de confiabilidad en presencia de fallas aleatorias, otros indicadores clave como el β del MTBMp (1,25), del MP (0,60), del MTTR (0,53), así como los valores β integrales (confiabilidad: 1,09;

mantenibilidad: 0,57; total: 0,83), permanecen muy por debajo del umbral técnico mínimo de 2,45 establecido como referencia para operar bajo tácticas predictivas o proactivas.

Este posicionamiento dentro de la curva refleja una gestión con predominio de acciones reactivas y preventivas poco efectivas, que requieren ser revisadas a profundidad desde el punto de vista de su planificación, ejecución y alineación con el análisis de fallas.

Figura 46

Cálculos dinámicos CMD en meses VOTORANTIM de βeta y Eta

CMD VOTORANTIM Estrategias cognitivas — DISPONIBILIDAD 99,65%

		BIEN	BIEN	BIEN	MAL	MAL	MAL	MAL
βetas - Factor de forma le interesa a Mantenimiento		βeta $MTBM_C$ de Confiabilidad	βeta $MTTR$ de Mantenibilidad	βeta $MTBM_P$ de Confiabilidad	βeta M_P de Mantenibilidad	βeta $MTBM$ Integral de Confiabilidad	βeta M_{Mean} Integral de Mantenibilidad	βeta TOTAL
	SER	0,93	0,53	1,25	0,60	1,09	0,57	0,83
	DEBER SER	Menor a 1	Menor a 1	Muy mayor a 1	Muy mayor a 1	2,45	2,45	2,45
Eta - Factor de escala le interesa a Producción		η - Eta de Confiabilidad No Planeada $MTBM_C$	η - Eta de Mantenibilidad No Planeada $MTTR$	η - Eta de Confiabilidad Planeada $MTBM_P$	η - Eta de Mantenibilidad Planeada M_P	η - Eta de Confiabilidad Integral	η - Eta de Mantenibilidad Integral	η - Eta TOTAL
	SER	5672,95	18,38	3726,01	10,34	4699,48	14,36	2356,92
	DEBER SER	5872,71	33,54	3469,14	15,39	4548,35	23,42	2607,90
Cumple o no con rango del 10%		Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	Cumple
Límite inferior Tiempo - 90% del tiempo teórico		5285,44	30,18	3122,22	13,85	4093,51	21,08	2347,11
Límite superior Tiempo - 110% del tiempo teórico		6459,98	36,89	3816,05	16,93	5003,18	25,76	2868,69
Cuando el Eta η es óptimo se asimila y acerca a los tiempos calculados de $MTBM_C$ $MTTR$ $MTBM_P$ M_P, en cada columna es el debe ser calculado en horas		OK	NO	OK	NO	OK	NO	OK
		Perfecto	Mal	Perfecto	Mal			

Nota. Esta imagen representa la validación cruzada entre los valores β y η por métrica CMD, clasificando su desempeño técnico según cumplimiento de rangos ideales definidos en la estrategia cognitiva CMD.

La matriz cognitiva permite establecer una verificación cruzada entre los valores β (forma) y η (escala), contrastando cada métrica CMD con sus rangos operativos de referencia. Mientras que algunos indicadores muestran cercanía a los criterios ideales, la mayoría refleja un desbalance técnico entre confiabilidad y mantenibilidad, especialmente en su dimensión integral.

Se evidencia un cumplimiento parcial de las condiciones esperadas: solo tres columnas alcanzan el umbral de aceptación (OK), mientras que otras tres principalmente

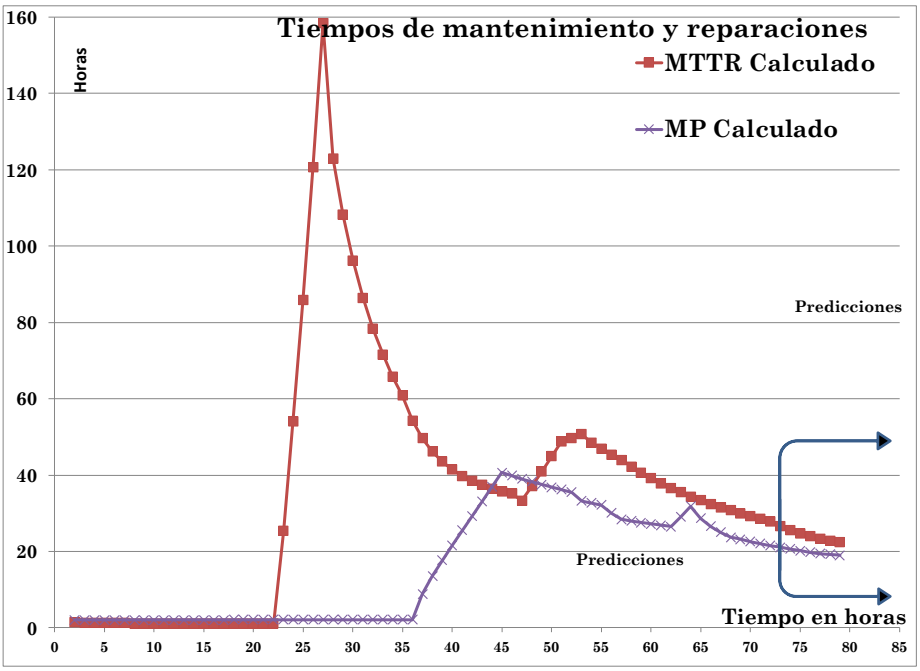
aquellas relacionadas con mantenibilidad planificada y su consolidado presentan incumplimientos relevantes.

Este desbalance sugiere que, aunque existen esfuerzos aislados por mantener la estabilidad operativa, no se ha logrado una integración funcional entre las estrategias de mantenimiento, ni una correspondencia efectiva entre los tiempos estimados (η) y los comportamientos reales observados (β).

La lectura combinada de esta tabla con los análisis anteriores confirma que el sistema aún opera por debajo del nivel de madurez requerido para aplicar esquemas predictivos o de optimización prescriptiva.

Figura 47

Tiempos de mantenimiento y reparación (MTTR y MP)

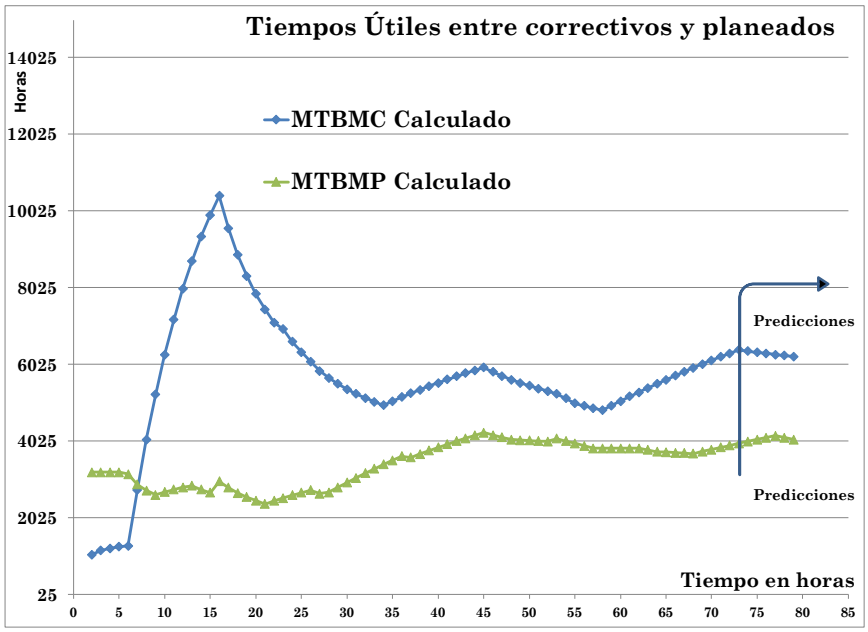


Nota. Esta gráfica representa la evolución de los tiempos medios de mantenimiento planificado y correctivo (MP y MTTR), incluyendo su proyección predictiva en horas operativas.

La gráfica evidencia el comportamiento comparado entre los tiempos de reparación correctiva (MTTR) y los tiempos de ejecución de mantenimiento planificado (MP). Se observa un pico crítico del MTTR en el intervalo entre horas 25 y 30, superando las 150 horas, lo cual indica una intervención compleja no anticipada. Posteriormente, la curva desciende, pero permanece con valores por encima del MP hasta la hora 70. El tiempo de mantenimiento planificado, aunque más estable, muestra un crecimiento progresivo, reflejando acumulación de tareas o baja eficiencia en su ejecución. Las predicciones proyectadas en ambos casos sugieren una reducción paulatina de los tiempos, pero sin converger en una zona de control óptimo.

Figura 48

Tiempos útiles entre eventos correctivos y planeados - MTBMc y MTBMp



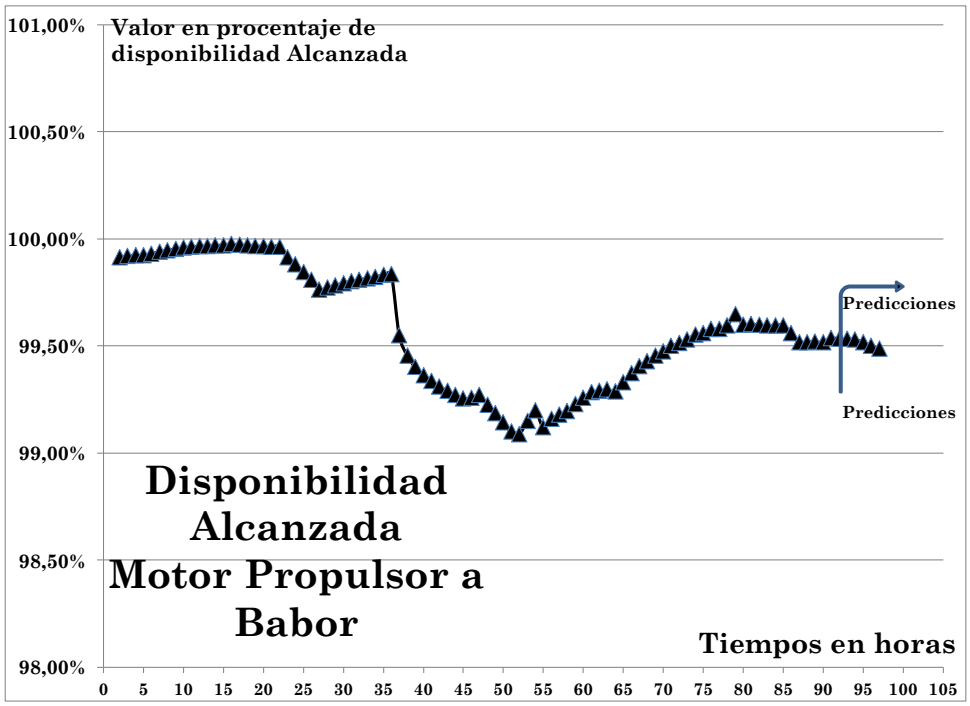
Nota. Esta imagen presenta la evolución y predicción de los tiempos útiles promedio entre intervenciones correctivas (MTBMC) y planeadas (MTBMP), como insumos de confiabilidad operativa.

Esta gráfica muestra la frecuencia media con la que ocurren fallas correctivas (MTBMC) y mantenimientos planificados (MTBMP). El MTBMC alcanza un pico superior a las 10.000 horas, pero decrece posteriormente hacia una zona de 6.000 horas, lo que refleja un patrón cíclico de falla no controlada.

En contraste, el MTBMP se mantiene en valores más bajos, entre 3.000 y 4.000 horas, con menor variabilidad. Esta diferencia indica que, si bien los mantenimientos están siendo ejecutados, su frecuencia no logra impactar significativamente en la reducción de eventos correctivos. La curva proyectada de ambas métricas presenta una ligera estabilización hacia el final del periodo, pero sin convergencia operacional clara.

Figura 49

Valor porcentaje disponibilidad técnica alcanzada



Nota. Esta gráfica muestra la disponibilidad técnica acumulada del motor propulsor a babor, con base en sus métricas CMD y su proyección de sostenibilidad operativa.

Finalmente, la gráfica anterior sintetiza el efecto acumulado de las métricas anteriores en la disponibilidad técnica real del motor propulsor de babor. Se destaca un periodo estable inicial, seguido por una caída prolongada de la disponibilidad hasta valores cercanos al 99,0 %.

Aunque la tendencia se revierte posteriormente, las proyecciones indican que el sistema no logra superar el umbral del 99,6 %, lo cual, si bien es aceptable, está por debajo de su potencial.

Esta lectura confirma que los parámetros de mantenimiento actuales no sostienen una disponibilidad alineada con esquemas predictivos robustos.

Si bien los resultados no alcanzan aún los valores ideales en confiabilidad y mantenibilidad, este análisis representa una oportunidad valiosa para la mejora continua y la consolidación de una cultura técnica basada en datos.

La aplicación de herramientas predictivas sobre el motor propulsor de babor permitió modelar tendencias operativas reales, generando métricas proyectadas a través de procesos ETL y distribuciones Weibull.

Estas proyecciones constituyen un insumo clave para la toma de decisiones estratégicas, priorización de recursos y gestión del riesgo técnico. Asimismo, los patrones identificados ofrecen una base sólida para que el SISCP-C defina con mayor precisión cómo debe estructurarse, capturarse y almacenarse la información técnica de los activos, fortaleciendo el proceso de madurez organizacional y la transición hacia un mantenimiento basado en análisis prescriptivo.

Objetivo 4 - Conclusiones e Integración del SISCP-C.

El presente apartado tiene como propósito sintetizar los resultados alcanzados durante el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos del trabajo. Estas conclusiones recogen los principales hallazgos técnicos y académicos derivados de las fases metodológicas previamente ejecutadas, y constituyen la base para sustentar la pertinencia de los lineamientos propuestos para la SISCP-C en la gestión de activos estratégicos de la Armada Nacional.

Conclusión Objetivo 1 – Marco normativo

La revisión crítica de las normas ISO 55000, ISO 55001, ISO 55002 y UNE-EN 16646 evidenció su pertinencia para transformar la gestión de activos y mantenimiento de la flota de superficie de la Armada Nacional de Colombia. Estas normas establecen principios de valor, alineación estratégica, enfoque de ciclo de vida y mejora continua que sustentan un sistema de gestión de activos (ISO, 2024).

El estudio siguió una metodología documental que contrastó los requisitos de los estándares con la doctrina institucional. Se realizó un análisis comparativo del modelo de GA actual de la Armada Nacional con el IAM 10-Box Capability Model para identificar vacíos de gobernanza, información y métricas CMD y LCC.

Los resultados muestran un nivel de madurez institucional incipiente: liderazgo concentrado en un área táctica, ausencia de Planes de Gestión de Activos documentados, predominio del indicador disponibilidad y uso limitado de MTBF, MTTR y análisis de costo del ciclo de vida. Factores como rotación de personal, restricciones presupuestales y baja calidad de datos reducen la efectividad del sistema.

Cada norma aporta elementos diferenciados. ISO 55000 define el concepto de valor del activo y la línea de visión estratégica; ISO 55001 exige liderazgo directivo,

gestión del riesgo y auditorías periódicas; ISO 55002 ofrece guías operativas para estructurar planes y KPIs; UNE-EN 16646 posiciona el mantenimiento como función estratégica y lo articula con todas las fases del ciclo de vida.

La comparación con el estado actual confirma que aplicar de forma íntegra estos estándares habilita la formalización de indicadores CMD y LCC, fortalece la trazabilidad entre niveles institucionales y transforma el mantenimiento en generador de valor técnico, económico y operativo.

En síntesis, la descripción de las influencias factibles de las normas analizadas y demostró que su adopción constituye la ruta para cerrar brechas de gobernanza, datos y desempeño. El cumplimiento pleno de los requisitos facilitará decisiones basadas en confiabilidad, riesgo y costo, asegurará la sostenibilidad operativa de los buques y alineará la gestión de activos con las mejores prácticas internacionales.

Conclusión Objetivo 2 – Caracterización de equipos críticos

La evaluación confirmó que la jerarquía técnica de la Armada Nacional se ajusta a los niveles definidos en ISO 14224. Cada buque se divide en grupos constructivos, subsistemas, conjuntos y partes, estructura que facilita la trazabilidad de fallas y la comparación del desempeño. Al aplicar el procedimiento MAN-PT-051-JEMAT a los activos de una OPV se establecieron tres niveles de criticidad: los sistemas de propulsión, auxiliares y mando-control concentran la mayor parte de equipos críticos, de modo que requieren prioridad presupuestal y logística por su influencia directa sobre la disponibilidad operativa.

El modelo jerárquico incorpora los modos de falla recomendados por la norma para motores, bombas, generadores y compresores; esta estandarización refuerza la captura de causas y la definición de tareas correctivas. Además, la matriz de criticidad

considera impacto operacional, seguridad, ambiente y costos, lo que alinea la priorización con la misión institucional.

Aun así, subsisten oportunidades de mejora. Resulta imprescindible profundizar la descomposición técnica hasta partes críticas en los sistemas de mayor riesgo y criticidad, ya que la falta de detalle limita realizar análisis de fallas para un posterior cálculo de variables como MTBF y MTTR.

El sistema SAP-PM presenta vacíos que reducen el valor estratégico de la información, por lo que conviene fortalecer la gestión de la información. También es necesario adoptar el concepto de criticidad dinámica, la obsolescencia y el envejecimiento modifican el riesgo y obligan a revisar la clasificación con regularidad.

Finalmente, los planes de mantenimiento deben reflejar el nivel de criticidad; la restricción de recursos ha retrasado intervenciones en equipos de alto impacto y, en algunos casos, ha derivado en fallas catastróficas.

El cumplimiento y adopción de los requisitos de la norma ISO 14224, complementado con bases de datos internacionales y una cultura analítica sólida, convertirá la caracterización de equipos en un instrumento de alto valor para la Armada Nacional, para una organización sistemática de la información de cada equipo, sistema y unidad; De modo que los recursos se asignen a los activos de mayor riesgo y valor, de esta manera se consolidará un mantenimiento proactivo y optimizará el costo del ciclo de vida de sus activos estratégicos.

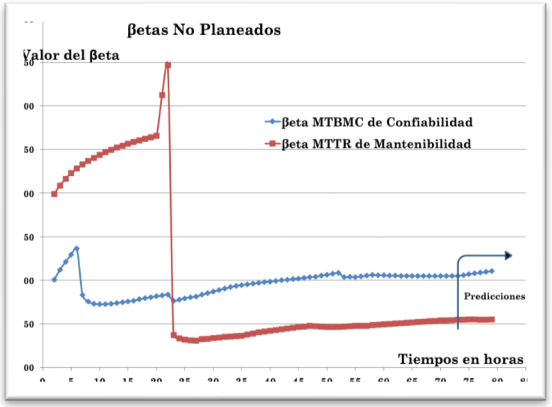
Conclusión Objetivo 3 – ETL y Analítica Predictiva

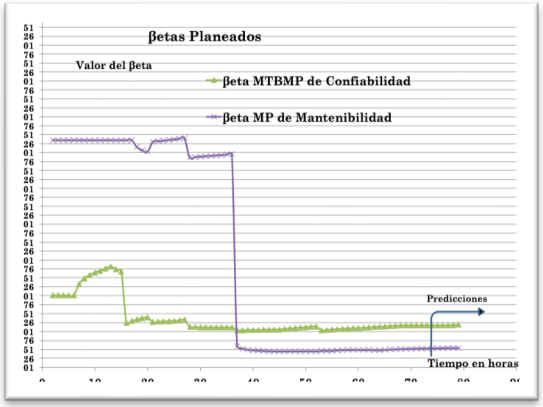
La presente sección sintetiza los principales hallazgos del Objetivo, en el cual se aplicaron procesos ETL y analítica predictiva sobre métricas CMD del motor propulsor babor. Se utilizaron modelos Weibull y análisis de parámetros β y η, permitiendo evaluar

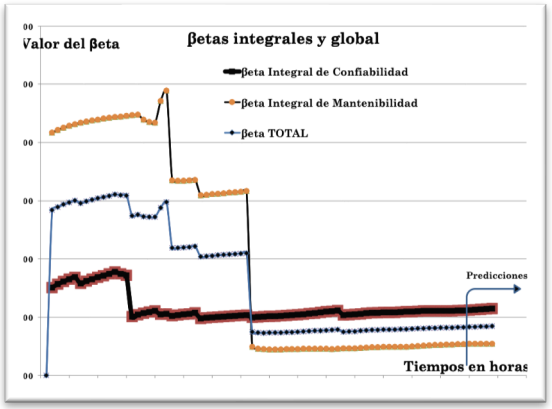
el comportamiento técnico-operativo del sistema, así como su grado de madurez para transitar hacia esquemas prescriptivos.

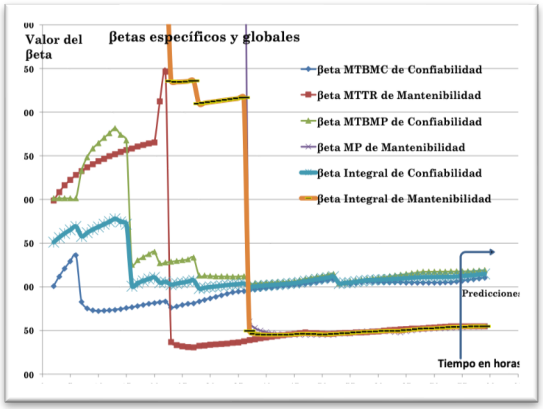
Figura 50

Acciones claves que definen el estado actual del proceso de mantenimiento a partir del estudio de caso motor propulsor.

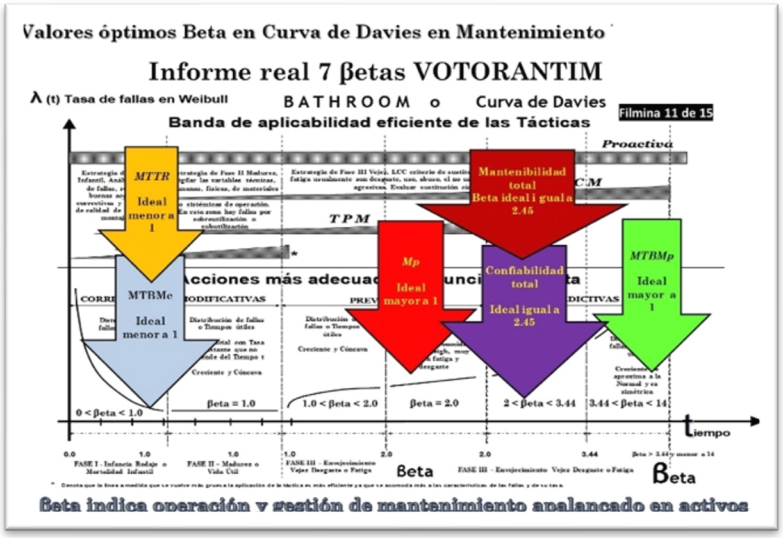


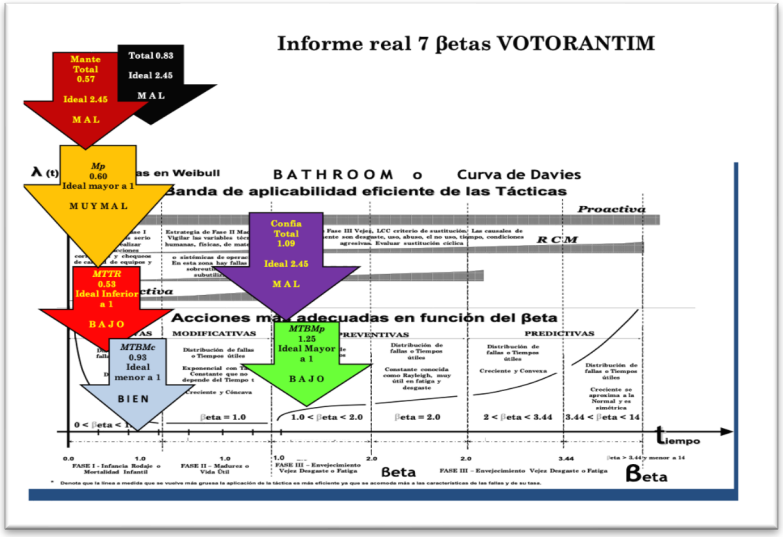




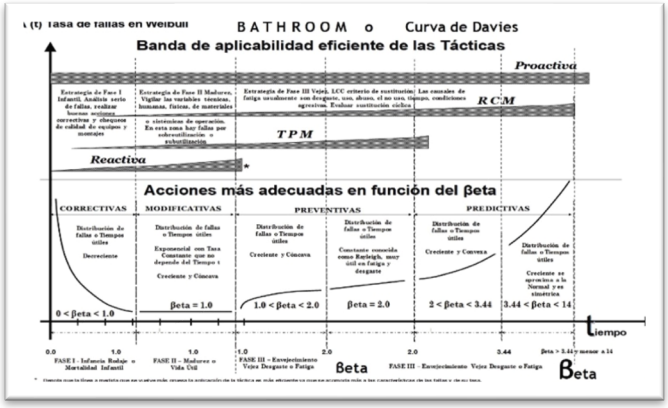
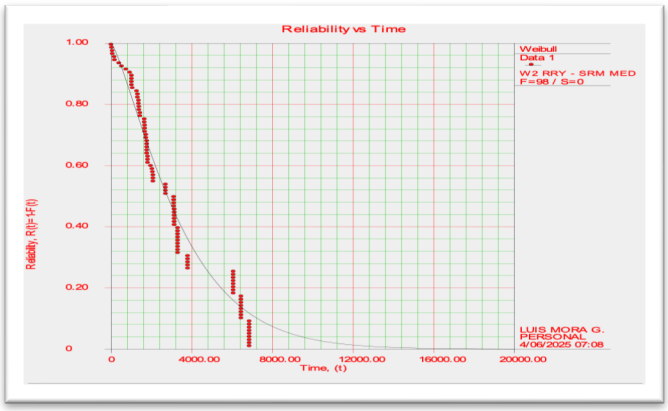
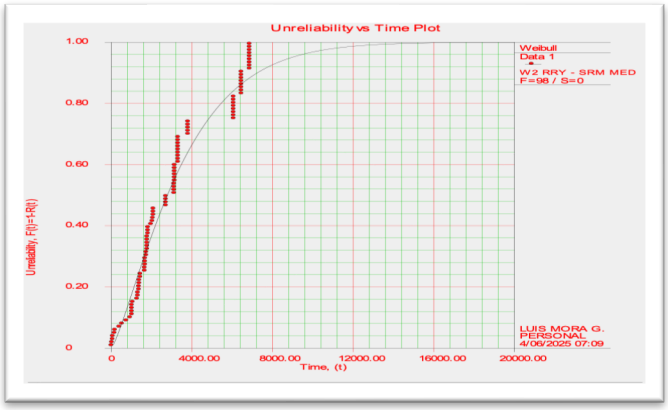


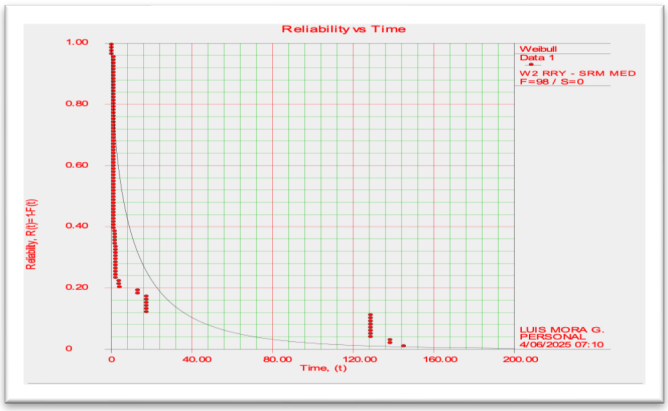
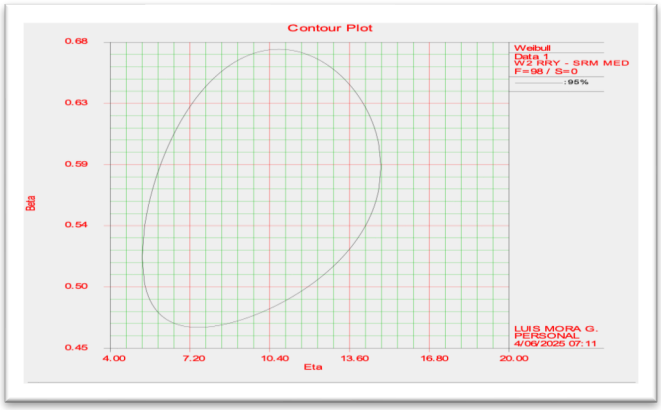
Los resultados muestran que, aunque algunas métricas como MTBMp y β total inician en niveles aceptables, todas convergen hacia valores bajos, inferiores a 1,5, lo que evidencia alta aleatoriedad técnica y pérdida de consistencia en la gestión del mantenimiento. Indicadores como MTTR y MP reflejan variabilidad crítica e inestabilidad operativa, lo que limita la eficacia del sistema. Esta tendencia descendente compromete la confiabilidad global y exige una reestructuración del plan de mantenimiento, priorizando acciones correctivas estructuradas, revisión de recursos y fortalecimiento del análisis técnico para habilitar un esquema prescriptivo sostenible.





La figura compara los valores óptimos de β para una gestión táctica eficiente según la curva de Davies con los β reales obtenidos para el motor propulsor babor. Mientras el valor ideal para una gestión prescriptiva se sitúa en torno a 2,45, los β obtenidos presentan desviaciones críticas: el β total es de 0,83, el de mantenibilidad es 0,57 y el de confiabilidad total apenas alcanza 1,09, todos lejos del umbral requerido. Solo el β de MTBMc se ubica dentro del rango deseable (<1), mientras que el β de MP (0,60) y el de MTTR (0,53) reflejan baja consistencia y planificación. Este contraste confirma que la unidad opera en un entorno reactivo, con capacidad limitada para adoptar tácticas proactivas como RCM o TPM.

	En la imagen representa los valores óptimos del parámetro β, los cuales permiten una implementación eficaz de acciones correctivas, modificativas, preventivas y predictivas. Asimismo, indican la ubicación táctica más adecuada para aplicar metodologías como TPM, RCM y otras estrategias de mantenimiento avanzadas según el comportamiento del activo.
	La gráfica muestra la curva de confiabilidad R(t) bajo el modelo Weibull, reflejando la probabilidad decreciente de funcionamiento sin fallas con el tiempo. La pendiente descendente y el valor de β<1.5 evidencian un comportamiento aleatorio de fallas, lo que resalta la necesidad de fortalecer las estrategias de mantenimiento predictivo.
	Esta gráfica representa la curva de no confiabilidad F(t), complementaria de la confiabilidad. Su crecimiento progresivo confirma que la probabilidad de falla aumenta con el tiempo, lo cual, junto con un β<1.5, reafirma la aleatoriedad de los fallos y la urgencia de optimizar los planes de mantenimiento preventivo.

	Esta curva de mantenibilidad M(t) muestra la probabilidad de éxito de las actividades de mantenimiento dentro de un tiempo dado. Su descenso pronunciado y el valor de β<1 reflejan alta aleatoriedad y poca eficiencia en los procesos de reparación, lo que evidencia debilidad en la capacidad de respuesta técnica.
	Esta gráfica de contorno presenta el intervalo de confianza del 95 % para la combinación de parámetros β y η del sistema. Su forma elíptica y dispersa sugiere alta incertidumbre estadística, lo que indica una variabilidad operativa significativa y refuerza la necesidad de mejorar la estabilidad técnica del mantenimiento.

Nota. Elaboración y cálculos del proyecto (Mora Gutiérrez & Villamil - Simancas, 2021) (Mora A. -G., 2022) (Weibull++ReliaSoft@, 2022)

Los análisis realizados confirman que el sistema opera con alta aleatoriedad y baja consistencia técnica. La mayoría de los valores β están por debajo de los umbrales ideales para una gestión proactiva, con desviaciones críticas en mantenibilidad y confiabilidad global. Este panorama exige la revisión estructurada del plan de mantenimiento, fortalecimiento del análisis de fallas y una transición progresiva hacia metodologías predictivas y prescriptivas como RCM o TPM, con el fin de estabilizar el desempeño técnico y optimizar la disponibilidad del activo.

Tabla 7

Matriz de integración del SISCP-C según escenarios institucionales.

Escenario	Dimensión evaluada	Indicador sugerido	Unidad de medida	Fuente/Soporte	Observación / Relevancia
Estratégico	Nivel de alineación estratégica	% de líneas de acción del PEN 2024-2027 soportadas por SISCP-C	Porcentaje (%)	PEN 2024-2027 / Objetivo 9.1 /10.5	Refuerza la consolidación del modelo de gestión de activos y control operativo integral.
	Madures del SGA	Mejorar la eficacia de la Gestión de Activos de la Armada	Porcentaje (%)	PEN 2024-2027 9/ PEE Objetivo 9.1/PIM Objetivo 6	Alineado con metas de consolidación de la gestión de activos.
	Gobernanza tecnológica	Nº de procesos sobre activos críticos	Número total	Indicadores de digitalización del PEN y PDN	Permite medir independencia tecnológica proveedores externos.
	Cultura organizacional	Nivel de apropiación técnica del modelo de GA	Encuestas y entrevistas	ISO 55001	Compromiso institucional la gestión de la información.
Operacional	Disponibilidad	Nivel de disponibilidad de unidades conectadas al SISCP-C	Porcentaje (%)	Manual SICSP-C	Verificación y análisis a nivel operacional de estados de unidades.
	Tiempo de respuesta	MTTR tras implementación del SISCP-C	Horas	Resultados CMD / Analítica Weibull	Permite contrastar mejoras en mantenibilidad tras integración.
	Efectividad preventiva	MP	Índice (%)	Manual de gestión de activos ARC / UNE EN ISO 14224 /Mantenimiento	Mide eficiencia mantenimiento basada en datos, actualización de

				planeación ejecución y control	planes de mantenimiento acuerdo al ciclo de vida.
	Jerarquía técnica	Porcentaje de unidades con estructura funcional cargada.	Porcentaje (%)	SAP-PM / Bitácoras / Auditorías	Total, cobertura jerárquica funcional ISO 14224
	Calidad de la información	Precisión, completitud y trazabilidad de los registros	Porcentaje (%) de calidad de datos	Validación de datos	Base consolidada, con imputación válida de vacíos y beta/eta calculables
Táctico	Interoperabilidad en tiempo real	Tiempo medio de actualización de datos técnicos	Horas/ Minutos	Logs de sensores / registros SCADA	Evalúa conectividad efectiva en buques y bases operativas.
	Cobertura táctica	% de subsistemas conectados por unidad operativa	Porcentaje (%)	Inventario técnico del formato CMD	Relacionado con la completitud estructural y técnica del sistema.
	Trazabilidad de eventos	Porcentaje de eventos con log de tiempo y usuario	Porcentaje (%)	Bitácoras SISCP-C / Auditorías de mantenimiento	Asegura seguimiento riguroso de intervenciones y decisiones en campo.
	Diagnóstico de fallas	# de alertas predictivas emitidas por subsistemas del SISCP-C	Conteo mensual	Dashboard analítico SISCP-C / ARIMA + M(t)	Mejora capacidad de actuar antes del evento técnico.
	Indicadores CMD	Generación mensual de MTBF, MTTR, DA, MTBMC, MP	Porcentaje (%)/h	Reportes del sistema / Power BI	Generación automatizada para tableros predictivos
	Capacidad predictiva del mantenimiento	Uso de análisis de β y η para MP, MTBMp, MTTR y MTBMc	Porcentaje (%)/h	Manual de gestión de activos ARC / UNE EN ISO 14224 /Mantenimiento	Implementación de bandas de Davies para decisiones prescriptivas

			planeación ejecución y control	
Capacidad analítica	Implementación de procesos ETL	Porcentaje (%) de calidad de análisis	Manual de gestión de activos ARC / UNE EN ISO 14224 /Mantenimiento planeación ejecución y control	Capacidad instalada para modelar comportamiento de activos

Nota. Elaboración propia.

La integración del SISCP-C representa un punto de inflexión en la transición de la Armada Nacional hacia un modelo de gestión de activos inteligente, eficiente y alineado con los principios de la ISO 55001, la UNE-EN 16646 y el Plan de Desarrollo Naval 2042.

La matriz consolidada articula indicadores claves en los niveles estratégico, operacional y táctico, permitiendo evaluar no solo el grado de madurez tecnológica y analítica de la institución, sino también su capacidad real de anticipación y respuesta técnica.

Métricas como la trazabilidad, el MTTR, MTBF, los parámetros β y η y la disponibilidad alcanzada, se convierten en ejes operativos de control continuo que habilitan un mantenimiento prescriptivo basado en data. Esta arquitectura no solo optimiza recursos y reduce incertidumbre, sino que fortalece la toma de decisiones en escenarios críticos y garantiza la gestión eficiente de los activos estratégicos incluido sus sistemas de alta criticidad.

La viabilidad y éxito del SISCP-C dependerán de la consolidación de una cultura organizacional basada en datos, del fortalecimiento del liderazgo institucional en torno a la gobernanza tecnológica, y de la capacidad analítica para convertir el dato en ventaja estratégica operativa. En síntesis, el SISCP-C no es solo una plataforma de supervisión: es el catalizador para una Armada más eficiente, resiliente y preparada para los desafíos del futuro.

Descripción de cómo se alcanza el logro de objetivos

UNO - Marco Normativo

Se analizaron las normas ISO 55000, ISO 55001, ISO 55002 y UNE-EN 16646 para identificar su implementación en la gestión de activos en la Armada nacional con enfoque a la flota de superficie. Este estudio permitió extraer principios esenciales relacionados con valor, riesgo y desempeño, alineados con los objetivos estratégicos de la institución.

El análisis se contrastó con la estructura actual del Sistema de Gestión de Activos, liderado por la Jefatura de Material. Se utilizó el modelo IAM 10-box para evaluar el nivel de madurez institucional, detectando brechas en liderazgo, integración de indicadores CMD y trazabilidad estratégica.

Se evidenciaron avances como la existencia de una política de gestión de activos y una jerarquía funcional consolidada. Sin embargo, persisten debilidades: falta de Planes de Gestión de Activos (PGA), bajo uso de métricas como MTBF, MTTR y LCC, y débil conexión entre niveles táctico y estratégico.

También se observó que el mantenimiento sigue siendo predominantemente reactivo y no existen auditorías estructuradas ni evaluación del riesgo como parte del ciclo de vida.

Como resultado, se propusieron acciones concretas: fortalecer el rol de la alta dirección, formalizar los PGA, integrar indicadores CMD y establecer mecanismos de mejora continua. La UNE-EN 16646 destaca como referencia clave para posicionar el mantenimiento como función estratégica, con impacto directo sobre la disponibilidad y sostenibilidad de los activos navales.

DOS - Caracterización de Equipos

Para alcanzar este objetivo se partió del análisis de la norma ISO 14224, identificando su estructura jerárquica y criterios de recolección de datos aplicables al entorno naval. Se revisó la documentación doctrinal de la Armada Nacional y se comparó la jerarquía técnica de los buques con los niveles definidos en la norma, verificando su equivalencia por grupos constructivos, subsistemas, conjuntos y partes.

Posteriormente, se aplicó el procedimiento MAN-PT-051-JEMAT a una unidad tipo OPV, lo que permitió organizar la información de 291 activos. Se analizaron criterios operativos, de seguridad, logísticos y funcionales para asignar niveles de criticidad. Esta caracterización se apoyó en matrices institucionales y registros técnicos de la unidad.

Durante el proceso, se evaluó la estructura funcional registrada en SAP-PM y se identificaron debilidades en el cargue de datos. Para complementar este análisis, se revisaron las metodologías OREDA, EsReDA y EIREDA como referentes externos, y se estudió su aplicabilidad a sistemas navales.

Finalmente, se incorporaron elementos de los enfoques sistémicos de Mora (Kant, Grant, Maslow y Wilson) para enriquecer la interpretación de la información técnica desde una perspectiva organizacional y estratégica. Todo el proceso permitió construir una base metodológica sólida para la caracterización de equipos críticos y su futura integración en plataformas como el SISCP-C.

TRES - ETL y Analítica Predictiva

Para cumplir este objetivo se seleccionó un motor propulsor de babor de una unidad tipo OPV como caso de estudio. El proceso inició con la recopilación de datos históricos de mantenimiento desde el módulo SAP-PM, bitácoras operativas y partes técnicas, consolidando ocho años de registros. Esta información se depuró y estructuró en una base de datos técnica estandarizada bajo el formato CMD, siguiendo las recomendaciones de Mora.

A continuación, se aplicó el proceso ETL (extracción, transformación y carga), que permitió depurar, homologar y clasificar los eventos por tipo de mantenimiento. Se organizaron las métricas CMD: MTBMc, MTTR, MTBMp y MP, facilitando el análisis técnico por series temporales.

Posteriormente, se desarrollaron análisis descriptivos y diagnósticos aplicando distribuciones Weibull, con cálculo de los parámetros β y η. Estos parámetros permitieron proyectar el comportamiento futuro del activo, evaluando su confiabilidad y mantenibilidad con base en tendencias técnicas verificables.

Durante la fase predictiva se aplicaron simulaciones y análisis probabilísticos para estimar escenarios operativos. Aunque no se alcanzaron las etapas prescriptiva y cognitiva por falta de datos económicos, se estableció una arquitectura analítica compatible con estos niveles futuros.

Este procedimiento permitió transformar datos crudos en información confiable, útil para modelar tendencias, anticipar fallos y establecer un esquema de mantenimiento predictivo replicable en otras unidades de superficie de la Armada Nacional.

CUATRO - Conclusiones e Integración del SISCP-C

Para alcanzar este objetivo se realizó una revisión estructurada de los hallazgos técnicos, normativos y analíticos generados en los tres objetivos anteriores. Esta revisión permitió identificar patrones recurrentes, vacíos institucionales y oportunidades de mejora en la gestión de activos navales.

Con base en estos insumos, se diseñó una matriz de integración que articula el SISCP-C con los niveles estratégico, operacional y táctico de la Armada Nacional. El proceso incluyó la categorización de variables críticas como la trazabilidad de eventos, la calidad de la información, la disponibilidad técnica alcanzada y los parámetros de confiabilidad (MTBF, MTTR, β, η), organizándolos por dimensión evaluada e indicador de desempeño.

Cada componente de la matriz fue vinculado a una fuente institucional verificable (SAP, PEGA, bitácoras, auditorías, dashboards), asegurando coherencia entre los resultados del análisis y los requerimientos funcionales del sistema. Se priorizaron indicadores que reflejaran capacidad analítica, respuesta técnica, madurez del SGA y alineación con el PDN 2042.

Esta matriz consolidada no solo resume la viabilidad técnica del SISCP-C, sino que establece las condiciones mínimas necesarias para su implementación efectiva como herramienta de supervisión, control y toma de decisiones en la gestión de activos de alta criticidad.

Referencias

Ahmed, I. A., & Asamoah, P. B. (2024). AI-driven predictive maintenance for energy infrastructure. *International Journal of Research and Scientific Innovation*. https://ideas.repec.org/a/bjc/journl/v11y2024i9p507-528.html

Ali, H. (2021). The Strategic Implementation Asset Management System Basis ISO 55000: A Case Study On Indonesian Railways Company. *Journal of Bone and Mineral Research*, 2, 226–244. https://profesionalmudacendekia.com/index.php/jbmr/article/view/102

Almeida, N., Trindade, M., Komljenovic, D., & Finger, M. (2022). A conceptual construct on value for infrastructure asset management. *Utilities Policy, 75*, 101354. https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101354

Andrade-Solórzano, C. L., & Herrera-Suárez, M. (2018). Análisis de la situación actual del mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación. ISSN: 2737-6249.*, *4*(8), 2–18. https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/31

Andrés Ricardo Pedraza Leguizamón, J. S. G. P. (2022). *Arquitectura de operación tecnológica de referencia para el piloto del Sistema Integrado de Supervisión y Control de Plataforma Colombiano (SISCP-C)*.

Antonenko, I. N. (2023). Risk-based dependability management in the context of ISO 55000 standards. *Upravlenie kachestvom (Quality management)*. https://panor.ru/articles/risk-orientirovannoe-upravlenie-nadezhnostyu-v-kontekste-standartov-iso-55000/98717.html#

Antonenko, I. N. (2024). 10 years of ISO 55000 standards: overview and development of the asset management ecosystem. *Quality management*, (6). https://doi.org/10.33920/pro-01-2406-03

Aremu, O., Cody, R. A., Hyland-Wood, D., & McAree, P. R. (2020). A relative entropy based feature selection framework for asset data in predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering, 145*, 106536. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835220302709?via%3Dihub

Armada Nacional de Colombia. (2021). *Plan Estratégico de Gestión de Activos de la Armada Nacional de Colombia 2021*. Documento interno institucional, Dirección de Implementación del SGA.

Armada Nacional de Colombia. (2021). *Plan Estratégico de Gestión de Activos (PEGA)*. Documento interno, Dirección de Mantenimiento de la Jefatura de Material Naval (JEMAT).

Armada Nacional de Colombia. (2022). *Manual de gestión de activos y soporte logístico* [Manual interno]. Dirección de Doctrina Naval.

Armada Nacional de Colombia. (2024). *Plan Estratégico Específico de Apoyo a la Fuerza 2024-2027*. Armada Nacional de Colombia - Dirección de Apoyo a la Fuerza.

Asociación Española de Normalización (UNE). (2015). *UNE-EN 16646:2015. Mantenimiento. Mantenimiento en la gestión de los activos físicos*. https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055155

Baker, W., Nixon, S., Banks, J., Reichard, K., & Castelle, K. M. (2020). Degrader Analysis for Diagnostic and Predictive Capabilities: A Demonstration of Progress in DoD CBM+ Initiatives. *Procedia Computer Science, 168*, 257–264. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920303926?via%3Dihub

Bolton, M., Waterworth, S., & McClurg, R. J. (2018). Enabling, Equipping and Empowering the Support Enterprise through Digital Transformation. *Proceedings of the*

International Naval Engineering Conference and Exhibition (INEC). https://library.imarest.org/record/7625?v=pdf

Branco, C. T. N. M., & Fontanela, J. M. (2024). A design methodology to employ digital twins for remaining useful lifetime prediction in electric vehicle batteries. *SAE Technical Paper Series*. https://www.sae.org/content/2023-36-0132

(BSI), B. S. I. (2016). *BS EN ISO 14224:2016 Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos*. BSI Standards Limited.

Capela, M., Santos, A., & Luís, A. (2020). ISO 55001 certification at EPAL – The pains and the gains. *Water Practice & Technology, 15*(2), 321–326. https://doi.org/10.2166/wpt.2020.015

Chen, Z., & Liu, X. (2018). Roadway Asset Inspection Sampling Using High-Dimensional Clustering and Locality-Sensitivity Hashing. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 34*. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/mice.12405

Ciliberti, V. A., Ostebo, R., Selvik, J., & Alhanati, F. (2019). Optimize safety and profitability by use of the ISO 14224 standard and big data analytics. *Day 4 Thu, May 09, 2019.* https://onepetro.org/OTCONF/proceedings-abstract/19OTC/19OTC/D041S055R003/181435

Condo Palomino, R. A., & Cruz Barreto, L. R. (2024). Propuesta de mejora de mantenimiento para incrementar el factor de rendimiento utilizando la metodología de mantenimiento productivo total para una empresa pyme en el sector agroindustrial. http://hdl.handle.net/10757/672420

Cubides, D. M., Castaño, A. M., & Vergara, H. D. (2024). Perspectives for the development of unmanned surface vehicles in Colombia: Cotecmar case. *Ciencia y tecnología de buques*. https://shipjournal.co/index.php/sst/article/view/247

Cuervo, P., Paipa, E., Acevedo, F., & Garavito, J. (2025). Cartografiando el Horizonte Tecnológico: Una Revisión de Literatura sobre Mantenimiento 5.0 en Sistemas Navales. *Grupo de Investigación En Diseño y Manufactura – DIMA, Universidad Industrial de Santander*.

Cunha, D., Andrade, M., Prado, L. A., Santana, L. O., & Gonçalves da Silva, M. P. (2021). Risk assessment in airport maintenance runway condition using MCDA-C. *Journal of Air Transport Management*, 90, 101948. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969699720305317?via%3Dihub

Dávila Hernández, G. J. (2019). Análisis y mejora de la confiabilidad en intercambiadores de calor tipo AES en la refinería de petróleo Ecopetrol en Barrancabermeja. https://repositorio.uis.edu.co/

Da Silva, R. F., & De Souza, G. D. (2021). Modeling a maintenance management framework for asset management based on ISO 55000 series guidelines. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/jqme-08-2020-0082/full/html

Da Silva, R. F., & De Souza, G. F. M. (2020). *Asset management system (ISO 55001) and Total Productive Maintenance (TPM): A discussion of interfaces for maintenance management*. GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, 15(2), 1–15. https://doi.org/10.15675/gepros.v15i2.2528

Daya, A. A., & Lazakis, I. (2024). Systems Reliability and Data Driven Analysis for Marine Machinery Maintenance Planning and Decision Making. *Machines*, *12*(5), 294. https://doi.org/10.3390/machines12050294

Farinha, J. T., Raposo, H. D. N., de-Almeida-e-Pais, J. E., & Mendes, M. (2023). Physical Asset Life Cycle Evaluation Models—A Comparative Analysis towards Sustainability. *Sustainability*, *15*(22), 15754. https://doi.org/10.3390/su152215754

Fernández, E. C., Márquez, A. C., Guillén López, A. J., & Hidalgo Fort, E. (2025). Framework for Asset Digitalization: IoT Platforms and Asset Health Index in Maintenance Applications. *Applied Sciences*. https://www.mdpi.com/2076-3417/15/3/1524

Figueroa, F. A. (2023). *Propuesta de un modelo de gestión de activos para astilleros y maestranzas de la Armada.*

Garzón Párraga, C. J., Alonso Romero, M. L., & Vélez Herrera, D. S. (2024). *Modelo para la Gestión de Mantenimiento de Activos Críticos en el Laboratorio de CAD CAM*. https://libertadores.edu.co/

Gharib, H., & Kovacs, G. (2024). Reliability analysis of marine diesel engines vs. industrial diesel engines: a comparative approach. *Acta Logistica*, *11*(02), 325–337. https://doi.org/10.22306/al.v11i2.516

Glenn, J., Dube, P., Bain, K., Brooks, D., & Howell, J. (2022). *Reliability and Maintainability Engineering Guidebook*. Secretary of the Navy. https://www.dau.edu/sites/default/files/Migrated/CopDocuments/SECNAV%20RME%20GuideBook.pdf

Golovan, A., Mateichyk, V., Gritsuk, I., Lavrov, A., Smieszek, M., Honcharuk, I., & Volska, O. (2024). Enhancing Information Exchange in Ship Maintenance through Digital Twins and IoT: A Comprehensive Framework. *Computers*, *13*(10), 261. https://doi.org/10.3390/computers13100261

Gomaa, A. (2024). Digital twins for improving proactive maintenance management. *Engineering Science*. https://www.sciencepublishinggroup.com/article/10.11648/j.es.20240903.12

Gomaa, A. H. (2022). Enhancing maintenance management of critical equipment using digital twin. *Global Journal of Research in Engineering and Technology, 1*(1), 46–

54. https://gsjournals.com/gjret/content/enhancing-maintenance-management-critical-equipment-using-digital-twin

Guillarme, S., Clave, N., & Bason, P. (2024). Data-driven reliability: Insights from field to headquarters. ADIPEC. https://onepetro.org/SPEADIP/proceedings-abstract/24ADIP/24ADIP/D041S136R001/585785

Hastings, N. A. J. (2021). Life cycle planning and costing. *Physical Asset Management*. 169-185. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62836-9_8

Ihemegbulem, I., & Baglee, D. (2020). The Implementation of ISO 55000 in Small and Medium Enterprises: Requirements and Constraints. *Springer Proceedings*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-48021-9_1

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 55002:2018 Gestión de activos — Sistemas de gestión — Directrices para la aplicación de la ISO 55001* (2.ª ed.). https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:55002:ed-2:v2:es:fig:1

International Organization for Standardization. (2024). *ISO 55000:2024 – Gestión de activos: vocabulario, descripción general y principios* (2.ª ed.). https://www.iso.org/standard/83053.html

International Organization for Standardization. (2024). *ISO 55001:2024 – Gestión de activos — Sistema de gestión de activos — Requisitos* (2.ª ed.). https://www.iso.org/standard/83054.html

Judijanto, L., Uhai, S., & Suri, I. (2024). The Influence of Business Analytics and Big Data on Predictive Maintenance and Asset Management. *The Eastasouth Journal of Information System and Computer Science*. https://esj.eastasouth-institute.com/index.php/esiscs/article/view/243

Kalafatelis, A. S., Nomikos, N., Giannopoulos, A., Alexandridis, G., Karditsa, A., & Trakadas, P. (2025). Towards Predictive Maintenance in the Maritime Industry: A

Component-Based Overview. *Journal of Marine Science and Engineering*, *13*(3), 425. https://doi.org/10.3390/jmse13030425

Kalghatgi, U. S. (2022). Creating value for reliability centered maintenance (RCM) in ship machinery maintenance from BIG Data and Artificial Intelligence. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 104*, 449–453. https://doi.org/10.1007/s40032-022-00900-1

Kant, R., & Gurung, H. (2024). *Industry 4.0: Concepts, Processes and Systems*. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC. https://doi.org/10.1201/9781003246466

Khakhar, D. (2023). Predictive Maintenance Strategies for Engineering Assets using Data Analytics. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. https://www.ijraset.com/best-journal/predictive-maintenance-strategies-for-engineering-assets-using-data-analytics

Kijak, R. (2021). A system for managing assets throughout their life. En *Water asset management in times of climate change and digital transformation* (pp. 125–144). https://doi.org/10.1007/978-3-030-79736-2_7

Lemerande, T. (2020). Managing competence in naval asset management: Professionalising Defence's cadre of asset managers for ships and submarines. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-48021-9_53

Lemerande, T. (2020). Predictive Life Cycle Forecasting: Innovative Decision-Making for Complex Asset Management in the Naval Environment. En *Advances in Manufacturing, Production Management and Process Control*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-48021-9_41

Langseth, H., Haugen, K., & Sandtorv, H. (1998). Analysis of OREDA data for maintenance optimisation. Reliability Engineering & System Safety, 60(2), 103–110. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0951-8320(98)83003-2

Luxhøj, J. (1991). Sensitivity Analysis of Maintained Systems Using a Population Model: A Case Study. *International Journal of Quality & Reliability Management, 8*. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/02656719110001614/full/html

Maherdianta, D., Ramadhan, E., & Edwantiar, G. A. (2019). Optimizing EAM & APM Supported by ISO 55001 Implementation. *2019 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 1–6. https://ieeexplore.ieee.org/document/8769009

Maholchic, R. A. (1986). Random Sampling for Extrapolated Deductions in Navy Maintenance Service Contracts. *Naval Postgraduate School Thesis*. https://support.arraynetworks.net/prx/000/https/upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Random_sampling_for_extrapolated_deductions_in_Navy_maintenance_service_contracts._%28IA_randomsamplingfo00maho%29.pdf

Maletič, D., Maletič, M., Al-Najjar, B., & Gomišček, B. (2020). An Analysis of Physical Asset Management Core Practices and Their Influence on Operational Performance. *Sustainability*, *12*(21), 9097. https://doi.org/10.3390/su12219097

Manu, E., Akotia, J., Sarhan, S., & Mahamadu, A.-M. (2021). Identifying and sourcing data for secondary research. https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003000532-2/identifying-sourcing-data-secondary-research-emmanuel-manu-julius-akotia-saad-sarhan-abdul-majeed-mahamadu

Medancich, M. M. (2023). *Técnicas de mantenimiento predictivo en unidades navales de más de 25 años de la Armada Argentina*. https://cefadigital.edu.ar/handle/1847939/2888

Menon, M. K., & Tuladhar, R. (2024). Asset Management decision-making through data-driven Predictive Maintenance – an overview, techniques, benefits and challenges.

Maintenance, Reliability and Condition Monitoring. https://www.extrica.com/article/24232

Migliore, L., & Killian, J. M. (2018). Ethical Considerations for Nursing Research With Military Populations. *Annual Review of Nursing Research, 36*, 107–129. https://connect.springerpub.com/content/sgrarnr/36/1/107

Mohanraj, E., Eniyavan, N., Sidarth, S., & Sridharan, S. (2024). Digital twins for automotive predictive maintenance. *2024 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, 1579–1584. https://ieeexplore.ieee.org/document/10544392

Mora-Gutiérrez, A. (2022). *Mantenimiento Vanguardia & Analytics, generador de competitividad*. CIMPRO SAS.

Mora-Gutiérrez, A (2009). *Mantenimiento: Planeación, Ejecución y Control*. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

Moubray, J. M. (2004). RCM: Reliability Centered Maintenance. In B. Limited (Ed.), *Industrial Press Inc.* (1a en castellano). Aladon Limited.

Ng, C. K. P., Ramdzani, R. A., & Seah, Y. H. (2024, October 11). *Triumph of the digital twin frontier: An odyssey unleashing integrated asset modelling for intelligent well & reservoir management* (SPE-221153-MS). Paper presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition (APOGCE 2024), Perth, Australia. https://doi.org/10.2118/221153-MS

Özcan, M. M., & Kutbay, U. (2024). Improving Predictive Maintenance Performance with Limited Data under Different Operating Conditions with Transfer Learning. *2024 15th National Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 1–5. https://ieeexplore.ieee.org/document/10847137/

Pala Diaz, A. A. S., & Aguirre Ruiz, J. L. (2024). *Modelo de mejora para incrementar la disponibilidad mecánica de perforadoras hidráulicas usando el Mantenimiento*

Centrado en la Confiabilidad (RCM) y la distribución de Weibull en una empresa del sector minero. http://hdl.handle.net/10757/682663

Panegossi, A. C. G., & Chiari da Silva, E. C. (2021). *Asset management policy for equipment replacement*. En Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. IEOM Society. https://www.ieomsociety.org/brazil2020/papers/723.pdf

Parra, C., González-Prida, V., Candón, E., De La Fuente, A. D., Martínez-Galán, P., & Crespo, A. (2020). Integration of Asset Management Standard ISO55000 with a Maintenance Management Model. *Springer International Publishing*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-64228-0_17

Pérez Torrado, W. A. (2023). *La inteligencia artificial y su aplicación en el mantenimiento industrial.*

Petersen, B., & Efatmanesknik, M. (2024). *Optimising warship lifecycle value: A real options approach*. En 2024 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE). IEEE. https://ieeexplore.ieee.org/document/10741125

Pineau, J.-P. (1998). Directory of ESReDA accident databases. *16. ESReDA Seminar*, 21–28.

Polimac, V., & Polimac, J. (2016). Holistic approach to asset management with new ISO 55000. https://chooser.crossref.org/?doi=10.1049%2Fcp.2016.1011

Procaccia, H., Aufort, P., Arsenis, S., & de France (EDF), 92 - Clamart (France). Direction des Etudes et Recherches. (2024). *The European industry reliability data bank EIReDA*.

Pupo Malabet, I. E. (2014). *Estrategias de mantenimiento y operación en línea de trituración y apilamiento Cerro Matoso SA Montelíbano-Colombia, desde el análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad alcanzada*.

Rodríguez Padial, N. (2020). *Sistema asistido para la decisión estratégica y planificación de procesos de mantenimiento en plantas industriales*.

Rotta, G. (2023). Aproximación al diseño de una estrategia de gobernanza para el aprovechamiento sostenible del océano colombiano, a partir del análisis de la estrategia pentagonal de la Armada Nacional. *Scientific Journal of Applied Social and Clinical Science*. https://atenaeditora.com.br/catalogo/artigo-revista/aproximacion-al-diseno-de-una-estrategia-de-gobernanza-para-el-aprovechamiento-sostenible-del-oceano-colombiano-a-partir-del-analisis-de-la-estrategia-pentagonal-de-la-armada-nacional

Sala, R., Pirola, F., Pezzotta, G., & Cavalieri, S. (2022). Data-Driven Decision Making in Maintenance Service Delivery Process: A Case Study. *Applied Sciences*, *12*(15), 7395. https://doi.org/10.3390/app12157395

Sánchez Barroso, D. F. (2016). Análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad del sistema de compresión de gas, en la Central de Facilidades de Producción del Bloque 15, Petroamazonas, Cantón Shushufindi.

Saxena, A. (2025). Benefits of RCM (Reliability-centered Maintenance) in the Maritime Industry. International Journal For Multidisciplinary Research. https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i01.37054

Scott, M. J., Verhagen, W., Bieber, M., & Marzocca, P. (2022). A Systematic Literature Review of Predictive Maintenance for Defence Fixed-Wing Aircraft Sustainment and Operations. *Sensors (Basel, Switzerland), 22*. https://www.mdpi.com/1424-8220/22/18/7070

Segura-Monge, M. Á., Gómez-Ramírez, G. A., Barahona-Guzmán, G., Montero-Jiménez, J. J., Segura-Monge, M. Á., Gómez-Ramírez, G. A., Barahona-Guzmán, G., & Montero-Jiménez, J. J. (2024). Hacia el mejoramiento de la gestión de activos de

equipos críticos en Pymes: propuesta de metodología e implementación. *Revista Tecnología En Marcha*, *37*(2), 95–108. https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6699

Selvik, J., & Bellamy, L. (2020). Addressing human error when collecting failure cause information in the oil and gas industry: A review of ISO 14224: 2016. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 194, 106418. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832018311062?via%3Dihub

Sepe, M., Ruggiero, G., Leto, A., Mordacci, G., & Agresta, A. (2022). Maintenance Scope Optimization, through a Real Time Prediction of Risk of Failure. *Day 4 Fri, March 25, 2022*. https://onepetro.org/OTCASIA/proceedings-abstract/22OTCA/4-22OTCA/482993

Silva, R. F., Melani, A. H. A., Michalski, M. A. C., de Souza, G. F. M., & Nabeta, S. I. (2024). Risk Management of Physical Assets Supported by Maintenance Performance Indicators. *Sustainability*. https://www.mdpi.com/2071-1050/16/14/6132

Southgate, J. M., Groth, K., Sandborn, P., & Azarm, S. (2024). *Cost-Benefit Analysis using Modular Dynamic Fault Tree Analysis and Monte Carlo Simulations for Condition-based Maintenance of Unmanned Systems*. https://arxiv.org/abs/2405.09519

Suryadarma, E. H. E., & Ai, T. J. (2020). Predictive Maintenance in SCADA-Based Industries: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, *2*(1), 57–70. https://doi.org/10.24002/ijieem.v2i1.4368

Svadkovsky, V. A. (2024). The use of digital twins to improve the operational efficiency in the extractive industries. *Strategic Decisions and Risk Management*. https://www.jsdrm.ru/jour/article/view/1075

Szatkowski, J. M., Li, Y., & Du, L. (2022). Enabling Reconfigurable Naval SCADA Network through Software-Defined Networking. *2022 IEEE Transportation Electrification*

Conference & Expo (ITEC), 214–218. https://ieeexplore.ieee.org/document/9813872

Tavakoli, P., Yitmen, I., Sadri, H., & Taheri, A. (2023). Blockchain-based digital twin data provenance for predictive asset management in building facilities. *Smart and Sustainable Built Environment*. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/sasbe-07-2023-0169/full/html

Tripathi, A., & Hari Prasad, M. (2024). RCM based optimization of maintenance strategies for marine diesel engine using genetic algorithms. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, *15*(8), 3757–3775. https://doi.org/10.1007/s13198-024-02374-z

Ukato, A., Sofoluwe, O. O., Jambol, D. D., & Ochulor, O. J. (2024). Optimizing maintenance logistics on offshore platforms with AI: Current strategies and future innovations. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. https://wjarr.com/content/optimizing-maintenance-logistics-offshore-platforms-ai-current-strategies-and-future

Unal, P., Albayrak, Ö., Jomâa, M., & Berre, A. J. (2022). Data-Driven Artificial Intelligence and Predictive Analytics for the Maintenance of Industrial Machinery with Hybrid and Cognitive Digital Twins. In *Technologies and Applications for Big Data Value*. 299–319. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78307-5_14

Valencia, A., & Pinzón, J. D. (2021). Asset Management Model of SCADA Infrastructure of Power Control Centers based on Indicators. *2021 IEEE PES ISGT Latin America*. https://ieeexplore.ieee.org/document/9543089

Van Dinter, R., Tekinerdogan, B., & Catal, C. (2022). Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 151, 107008.

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950584922001331?via%3Dihub

Velandia, G. (2023). A Truly Sustainable Digital Transformation Model for the Naval Sector. *Ciencia y tecnología de buques*. https://shipjournal.co/index.php/sst/article/view/97

Velásquez, M. I. (2021). *Metodología de aplicación de la familia de normas ISO 55000 a la gestión de activos intangibles* [Tesis de maestría, Universidad de Sevilla]. Repositorio Bibing. https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/72133/fichero/TFM-2133+VELÁSQUEZ+CUEVAS%2C+MATÍAS+IGNACIO.pdf

Villamil, M. A. (2021). *Strategic analytical dashboard architectural framework approach of the management maintenance-Palermo Sociedad Portuaria con norma europea UNE PNE-en-15341*.

Villumsen, A. M., Rosholm, M., Bodilsen, S., Toft, S. D., Berg, L. S., & Nirmalarajan, L. (2024). Ethical considerations in research when building predictive risk modelling in child and family welfare. *Journal of Comparative Social Work*. https://journals.uis.no/index.php/JCSW/article/view/619

Von Bertalanffy, L. (1996). *Teoría general de los sistemas*.

Walha, A., Ghozzi, F., & Gargouri, F. (2024). Data integration from traditional to big data: main features and comparisons of ETL approaches. *The Journal of Supercomputing*, *80*(19), 26687–26725.

Wilson, E. (2020). The differences between descriptive, diagnostic, predictive & cognitive analytics. *The Institute of Business Forecasting & Planning*.

Wireman, T. (2004). *Total Preventive Maintenance*. Industrial Press Inc.

Zahera, P., & González-Prida, V. (2021). 55000 implementation proposal integrated with a risk management system for a water utility case. En V. González-Prida & P. Zahera (Eds.), *Advanced models and tools for effective decision making under uncertainty*

and risk contexts (pp. 261–282). IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-3246-1.ch011

Zimmerman, P., Gilbert, T., & Salvatore, F. (2019). Digital engineering transformation across the Department of Defense. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 16(4), 325–338. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1548512917747050

Glosario de Definiciones técnicas

Analytics Cognitiva

Aplicación avanzada de algoritmos de inteligencia artificial, semántica y técnicas de aprendizaje como machine learning y deep learning, que permiten transformar datos en sabiduría operativa. Con cada interacción, el sistema mejora su capacidad de tomar decisiones acertadas y adaptativas, evolucionando hacia una inteligencia cognitiva que guía estratégicamente la gestión de activos y mantenimiento.

Analytics Predictiva

Disciplina analítica que utiliza métodos matemáticos, estadísticos y estocásticos para proyectar valores futuros de variables o fenómenos, a partir del análisis de sus comportamientos históricos. Emplea técnicas como series temporales y simulaciones científicas, apoyadas en plataformas de Business Intelligence (BI) y software especializado. Estima escenarios de corto plazo con componentes de probabilidad, riesgo y ocurrencia, transformando información en conocimiento.

Analytics Time

Horizonte temporal de aplicación de la analítica de datos. En los estadios descriptivo y diagnóstico se analiza el pasado para comprender eventos y sus causas; en los estadios predictivo y prescriptivo se utilizan datos históricos para anticipar y diseñar escenarios futuros. Las organizaciones con visión estratégica emplean enfoques analíticos integrados, incluyendo la analítica cognitiva, para generar decisiones autónomas y adaptativas que conduzcan a ventajas competitivas sostenibles.

Availability

Indicador que mide el tiempo que un activo está disponible para operar. Se clasifica en: genérica, inherente (solo correctivos), alcanzada (incluye preventivos), operacional (considera todas las demoras) y operacional generalizada (activos operativos a baja capacidad).

βeta

Parámetro que describe cómo fallan o funcionan los equipos según su mantenibilidad o confiabilidad. Es inversamente proporcional a la desviación estándar de los tiempos entre fallas. Valores bajos indican alta variabilidad y ausencia de control; valores altos reflejan mantenimientos estructurados y controlados.

CMD

Conjunto de métricas clave en la gestión de activos. La confiabilidad mide el tiempo medio entre fallas, la mantenibilidad evalúa la rapidez para restaurar el activo tras una falla, y la disponibilidad se calcula como: confiabilidad / (confiabilidad + mantenibilidad), integrando ambas para estimar la operatividad del sistema.

Confiabilidad

Probabilidad de que un activo funcione sin fallas durante un período definido, bajo condiciones normales de operación. Depende del diseño, materiales, tecnología, ensamblaje, principios operativos y contexto geográfico. Representa una medida integral del desempeño en manufactura, operación y mantenimiento.

Criticidad

Referida a un equipo o activo, es el grado de importancia que tiene dentro del proceso productivo y de mantenimiento, existen metodologías estándares de medición, de varias casas

internacionales: OREDA, Aladon, SAE, Gestión de activos, etcétera; sirve para jerarquizar las acciones correctivas, predictivas o preventivas de mantenimiento, usualmente se calcula a partir de las variables de severidad de la falla y de su frecuencia o probabilidad de ocurrencia. Hazard o riesgo se asocian a la criticidad de la máquina.

Disponibilidad

Grado de importancia de un activo en el proceso productivo. Permite jerarquizar acciones de mantenimiento según la severidad y la probabilidad de ocurrencia de fallas. Se determina mediante metodologías como OREDA, SAE y Aladon. Está asociada al riesgo (hazard) del equipo.

Distribuciones

Modelos matemáticos utilizados para calcular con precisión variables de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD), como MTBF, MTTR, MTBMP y MP. Entre las más aplicadas están Weibull, LogNormal, Gamma, Normal y Rayleigh, seleccionadas según el comportamiento estadístico de fallas y reparaciones del activo.

Estacionalidad

Frecuencia con la que se repiten ciertos eventos o comportamientos dentro de un periodo menor a doce meses. Es una propiedad clave en las series temporales, ya que afecta la precisión de los pronósticos al introducir patrones cíclicos como estaciones climáticas o eventos recurrentes.

Estrategia

En mantenimiento, gestión de activos u operación, es el arte de implementar tácticas, decisiones y planes orientados a maximizar los indicadores CMD, alcanzar factores clave de éxito y generar ventajas competitivas mediante acciones logísticas y técnicas estructuradas.

Eta η

Conocido como factor de escala en análisis de confiabilidad, representa el tiempo característico de funcionamiento continuo de un activo bajo condiciones operativas determinadas. Refleja cómo se gestionan y explotan los equipos en operación, producción o mantenimiento, y es fundamental en la modelación con distribuciones como Weibull.

ETL

Proceso fundamental en inteligencia de negocios y análisis de Big Data que consiste en extraer, transformar y cargar datos. Se aplica a lo largo de toda la evolución del conocimiento (data, información, conocimiento, sabiduría e inteligencia), y es clave en cada estadio de la analítica integral (descriptiva, diagnóstica, predictiva, prescriptiva y cognitiva).

Maintainability

Probabilidad de que un equipo en falla sea restaurado a su estado funcional mediante acciones de mantenimiento adecuadas. Representa la eficacia del área de mantenimiento y depende directamente del factor humano, a diferencia de la confiabilidad, que depende del diseño del equipo.

Mantenimiento

Conjunto de acciones técnicas, organizativas y humanas destinadas a conservar o restablecer la funcionalidad de los activos, asegurando su disponibilidad operativa bajo

condiciones técnicas y tecnológicas requeridas. Su misión es garantizar que los equipos cumplan su función cuando se necesiten, en apoyo al objetivo social de la organización.

Metodología

Se le conoce como la ciencia de los métodos, usualmente se entiende como un conjunto de métodos, que siguen o prosiguen una investigación científica (o su aplicación como en el caso de las predicciones, en este proyecto) o en una disertación doctrinal o técnica.

M

Maintenance - Tiempo de mantenimiento promedio. Es la media de los tiempos de reparaciones y/o mantenimientos planeados (predictivos o preventivos) en los cálculos CMD de la disponibilidad alcanzada, usada en este trabajo. Es una medida de mantenibilidad general de la máquina.

MP

Maintenance Planning Proactive Predictive Preventive - Mantenimiento planeado preventivo predictivo - Es la media de los tiempos de mantenimientos planeados (predictivos o preventivos) en los cálculos CMD de la disponibilidad alcanzada, usada en este proyecto. Es una medida de mantenibilidad preventiva predictiva planeada.

MTBMc

Mean Time Between Maintenance Corrective - Es la media de los tiempos útiles entre reparaciones, se usa en los cálculos CMD de la disponibilidad alcanzada, utilizada en este trabajo. Es una medida de confiabilidad correctiva.

MTBMP

Promedio de los tiempos útiles entre mantenimientos planeados, preventivos, predictivos y proactivos. Es una métrica clave en el cálculo de la disponibilidad alcanzada y refleja la confiabilidad asociada a estrategias de mantenimiento anticipadas y estructuradas.

MTTR

Mean Time To Repair - Es la media de los tiempos de reparación en una máquina durante un intervalo de tiempo con múltiples eventos de correctivos. Se utiliza en los cálculos CMD de la disponibilidad alcanzada, realizada en este trabajo empresarial. Es una medida de mantenibilidad correctiva.

MTBM

Mean Time Between Maintenance - Es la medida que refleja la confiabilidad general de una máquina, se toma como la media de los tiempos útiles entre correctivos, por un lado, y los preventivos predictivos por el otro.

Modelos

Expresión utilizada en el método científico de predicción para los diferentes procesos de cálculos de predicción o modelos (agrupados en una metodología científica aplicada a ORBIS Reductor Tereftálico, que se lleva a cabo en este proyecto) de cálculos que se usan, existen modelos clásicos y modernos, los primeros son casos particulares de los segundos.

No confiabilidad

Función que representa la probabilidad acumulada de que un activo falle después de un tiempo específico de operación continua. Se conoce también como curva de fallas (Failure

Curve) y es complementaria a la curva de confiabilidad R(t), cumpliéndose que R(t) + F(t) = 1. F(t) se usa principalmente en estudios correctivos dentro del análisis CMD.

Parámetros

Variables clave que permiten medir la funcionalidad y efectividad de un activo en el análisis CMD. Incluyen valores como MTBF, MTTR, MTBMP, MP, β (beta), η (eta) y disponibilidad alcanzada, y se utilizan para evaluar el desempeño presente y proyectar el comportamiento futuro de los activos.

Previsión

Es lo mismo que predicción, es ver o decir un valor futuro de una variable o fenómeno estudiado, antes de que ocurra, es decir en el presente, antes de llegar a ese tiempo del valor en el futuro.

Prospectiva (Foresight)

Ciencia orientada al estudio del futuro a mediano y largo plazo, con aplicaciones en las fases prescriptiva y cognitiva de la analítica. Se basa en métodos matemáticos, estocásticos y futurísticos para construir escenarios posibles en horizontes de 2 a 22 años, especialmente en entornos inestables. Su eficacia radica en seleccionar combinaciones metodológicas que garanticen escenarios viables y sostenibles.

RCM

Estrategia de mantenimiento que busca maximizar la confiabilidad de los activos mediante una jerarquización rigurosa de tareas. Su enfoque está centrado en garantizar la funcionalidad continua para el cliente, aplicando metodologías normalizadas para análisis de

fallas y priorización de intervenciones. Es ideal en entornos organizacionales maduros y con alta cultura técnica.

Series temporales

Time Series - Secuencia de datos de una variable registrados cronológicamente, utilizada para analizar comportamientos pasados y proyectar valores futuros. Se aplican métodos estadísticos, matemáticos y estocásticos, tanto clásicos como modernos, bajo estándares internacionales, para apoyar la toma de decisiones en gestión y operación.

Supervivencia

Función que representa la probabilidad de que un activo continúe operando sin fallas tras un tiempo determinado. Conocida como curva de confiabilidad (Reliability Curve), es complementaria a la curva de no confiabilidad F(t), cumpliendo que R(t) + F(t) = 1. Se emplea en estudios predictivos dentro del análisis CMD para estimar la vida útil remanente de los activos.

Tareas planeadas o no

En gestión de activos y mantenimiento, las tareas no planeadas son las que activan reparaciones o sea las correctivas y las modificativas, y las planeadas o denominadas también proactivas son las preventivas y predictivas. Las no planeadas se realizan antes de la falla y son aleatorias, sobre todo las correctivas, las tareas planeadas se realizan antes de que ocurra la falla y su misión es garantizar que nunca se llegue al estado de falla, ellas propenden para que no se pierda nunca la funcionalidad. Por su lado la función de las no planeadas es proveer los recursos necesarios uy la tecnología para recuperar el estado perdido de su funcionalidad a la brevedad posible.

TPM

Total Productive Maintenance – En castellano es mantenimiento productivo total, es una de las tácticas de mantenimiento más utilizada, genera organización y estabilidad en el tema de mantenimiento, es imperativa en empresas donde hay conflictos de tipo RRHH, personal insatisfecho y el área de mantenimiento está sola con toda la responsabilidad de las máquinas. Es muy humana y motivadora, propende el orden y los primeros pasos de la tecnificación del mantenimiento y de la gestión de activos.

UT

Up Time - Es el tiempo en la máquina funciona plenamente y tiene la funcionalidad plena vigente, se pierde por fallas o por mantenimientos planeados (preventivos o predictivos) que requieren el paro de la máquina, mientras se realizan.

Valores vista

Es el tiempo o umbral al cual se le apunta en tiempo a los valores deseados del porvenir, mediante métodos científicos de predicciones o prescripciones, es un umbral de tiempo, se recomienda hasta dos meses en predicciones y hasta veintidós años en prescripciones, con recálculos de esta última cada cinco años vista.