

Implementación De Metodologías RAM y LSA Para La Optimización Del Plan De Mantenimiento Del Sistema De Propulsión De La Patrullera Oceánica Colombiana (POC)

Víctor Gregorio Bacca Rodríguez¹, Joan Martin Suarez Loaiza¹, Jhonattan de Jesús Llamas Reinoso¹, Luis Fernando Mendoza Cardona¹

COTECMAR - Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval Marítima y Fluvial

Resumen

La Patrullera Oceánica Colombiana (POC) es una plataforma versátil diseñada para operaciones de seguridad marítima como patrullaje, vigilancia, interdicción y rescates, con capacidad para soportar helicópteros, botes interceptores y sistemas de inteligencia naval. Este artículo aborda la implementación de la metodología de Análisis de Soporte Logístico (LSA) y su integración con el Análisis de Fiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (RAM) para desarrollar un plan de mantenimiento óptimo al Sistema de propulsión de la POC. Utilizando herramientas como el Análisis Funcional de Fallas (FFA), Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), FMEA, LORA, y el Diagrama de Árbol de Fallos (FTD), así como modelos estocásticos y simulaciones con Diagramas de Bloques de Fiabilidad (RBD) y Diagramas de Fases Operativas (RPD), se optimizan repuestos, recursos y políticas de mantenimiento, maximizando la eficiencia operativa y reduciendo costos.

Introducción

El Análisis de Fiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (RAM) y el Análisis de Soporte Logístico (LSA) son metodologías clave en la ingeniería sistémica para la gestión de sistemas complejos, cuyo objetivo es optimizar el rendimiento y la sostenibilidad operativa de equipos y plataformas a lo largo de su ciclo de vida [1] Estos enfoques, siendo ambas metodologías contenidas dentro del Soporte Logístico Integrado (ILS), se complementan al proporcionar un marco analítico integral para mejorar la confiabilidad de los sistemas, identificando los factores integrales

como son la gestión de documentación por medio de la solicitud de los términos de referencia y minimización de los costos asociados con el mantenimiento y la logística pronosticados para la fase operacional.

Este análisis es abordado desde la etapa de diseño de la embarcación, siendo concebido como uno de los tres enfoques considerados en el Cuerpo del Conocimiento de la Ingeniería de Sistemas [2] lo cual ha conllevado a hacer uso de técnicas propias de la ingeniería de Fiabilidad tales como lo son la Predicción de la Fiabilidad [3], [4] y Predicción de la Mantenibilidad [5], [6], [7] para combinar estimaciones basadas en la experticia y en bases de datos genéricas.

En primer lugar, la aplicación del análisis RAM a nivel sistema, permite identificar puntos críticos dentro del mismo, predecir su comportamiento estocástico ante fallos o eventos indeseables y establecer estrategias de mantenimiento preventivo o correctivo que optimicen su desempeño [8]. Sin embargo, ante el planteamiento del modelado de sistemas complejos, definidos como aquellos de naturaleza dinámica y que no son modelables en el marco de un paradigma Cartesiano-Newtoniano [9] se ha conllevado a uso de técnicas más robustas y complejas que impliquen la diferenciación de estados múltiples y transitorios que confluyan en interdependencias e intervenciones tanto controladas como estocásticas. Estos sistemas, abarcados desde enfoques como lo son los modelos markovianos, también conocidos como modelos de espacio de estados [10], implican la evaluación de múltiples configuraciones, los

cuales aumentan exponencialmente en función de los elementos que comprenden el sistema y sus posibles intervenciones o estados. Para esto, haciendo uso de la directiva DoD 2018 (DOD-D-5000.59.) se ha enfrentado el problema desde la perspectiva del modelado y la simulación (M&S) para la prueba y evaluación de posibles escenarios y sus alternativas de respuesta comprendiendo un enfoque de modelado tipo 2: Simulaciones Constructivas, en la cual los sistemas se representan y se emplean mediante el uso de modelos matemáticos complejos, basados en decisiones, y técnicas estadísticas [11]. Este enfoque ha sido abordado por la Simulación de Eventos Discretos (DES, por sus siglas en inglés) y modelado en el Módulo RBD de la Suite Windchill Risk and Reliability 11.1.

En concordancia, el Análisis de Soporte Logístico (LSA) es un enfoque orientado a planificar, gestionar y optimizar todos los aspectos relacionados con el soporte logístico de los sistemas, desde la adquisición de repuestos y herramientas hasta la formación del personal y la planificación de mantenimiento [1], [12]. El LSA tiene como objetivo reducir los costos a lo largo del ciclo de vida del sistema, mejorando la eficiencia y la efectividad de las actividades de mantenimiento, y garantizando que los recursos logísticos sean suficientes y estén disponibles cuando se necesiten. Apoyándose de técnicas cualitativas y semicuantitativas como lo son el Análisis Funcional de Fallas (FFA), Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) [13] y Diagramas de Árboles de Falla (FTD) [10] para deducir la estructura lógica funcional de eventos y sus causas, mientras que para técnicas de confección y análisis de estrategias de mantenimiento, fundamentadas propiamente en el contexto militar, se han empleado técnicas de mantenibilidad como lo son el Diagrama de Decisiones de RCM [13], [14] Análisis de la Tarea de Mantenimiento (MTA) [1] y el Análisis de Nivel de Reparación (LORA) [15] para establecer el conjunto de actividades, sus recursos

requeridos, su nivel de evaluación y su justificación.

Estas metodologías han sido empleadas de manera sinérgica para robustecer el modelado de los sistemas por medio de un enfoque jerárquico entre 2 a 4 niveles de profundidad [16] dependiendo de la clasificación de complejidad fenomenológica y esencialidad de los sistemas. Haciendo uso de técnicas de optimización por medio de la simulación Montecarlo se obtienen los intervalos de mantenimiento adecuados y la cantidad de repuestos y recursos abordado. A posteriori, se lleva cabo un análisis basado en las políticas propias de la institución para recomendar la mejor estrategia de mantenimiento que deban ser acobijadas por los Elementos Significativo-Funcionales más críticos estimados por métricas estructurales y de fiabilidad como lo es la medida de importancia de Fussell-Vesely [17].

Marco Teórico

Fiabilidad

La probabilidad de que un sistema, equipo, componente o proceso realice su función requerida sin interrupciones ni fallos durante un período de tiempo especificado, bajo un conjunto de condiciones operativas previamente definidas, incluyendo factores ambientales, de carga, de uso y de mantenimiento [4]. En sistemas no redundantes, esta definición se enfoca en el funcionamiento continuo del ítem sin interrupciones, mientras que en sistemas redundantes se extiende al concepto de fiabilidad de misión, considerando la capacidad del sistema para mantener su funcionalidad incluso en presencia de fallos parciales. La fiabilidad es una medida fundamental para garantizar el desempeño consistente, predecible y seguro del sistema a lo largo de su vida útil.

Pudiéndose expresar de la siguiente manera, asumiendo una tasa de falla constante:

$$R(t) = P(t < T) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Donde:

- T : Tiempo hasta el fallo.
- λ : Tasa de fallos (constante en sistemas con distribución exponencial).
- t : Tiempo operativo.

Disponibilidad operacional

Se entiende como la probabilidad de que un sistema o equipo esté en condiciones de realizar su función requerida, bajo condiciones específicas y en un momento dado o durante un período de tiempo especificado, considerando tanto los factores técnicos (como fiabilidad y mantenibilidad) como los factores logísticos, incluyendo los tiempos de retraso logístico e idealización de aspectos humanos [3]. Esta métrica integra el desempeño técnico del sistema con el soporte logístico disponible para garantizar su operatividad en el menor tiempo posible.

La fórmula base para calcular la disponibilidad operacional es:

$$A_{operacional} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MDLT} \quad (2)$$

Donde:

- $MTBF$: Tiempo Medio Entre Fallas
- $MTTR$: Tiempo Medio Para Reparar
- $MDLT$: Tiempo Medio de Retraso Lógico

Mantenibilidad

Se relaciona con la capacidad de un sistema o componente para ser restaurado a su estado funcional después de una falla, considerando el tiempo y los recursos necesarios para realizar tareas de mantenimiento preventivo o correctivo [5]. Esta métrica impacta directamente en la disponibilidad del sistema, debido a que reduce el tiempo en que el sistema está fuera de servicio.

Sin embargo, la mantenibilidad no sólo se refiere a la probabilidad de restauración, sino también a la facilidad de acceso para realizar las actividades de mantenimiento. Esto incluye factores como la disponibilidad de herramientas, la accesibilidad

del componente, la facilidad para instalar o desinstalar partes, y el nivel de entrenamiento necesario para los técnicos. Dado su carácter amplio y multidimensional, la mantenibilidad suele ser difícil de cuantificar [18], [19]. Por ello, se mide comúnmente a través del tiempo requerido para completar las tareas de mantenimiento, utilizando distribuciones de probabilidad para modelar la variabilidad en los procesos de reparación y mantenimiento.

Vectores de Corte mínimo

Es un conjunto de componentes en un sistema que, al fallar simultáneamente, causa la falla del sistema completo [9]. Se dice que este conjunto es mínimo si no se puede reducir (eliminar uno o más componentes del conjunto) sin que pierda su capacidad de causar la falla del sistema.

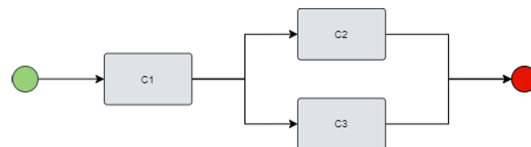


Figura 1. Diagrama de Bloques de Fiabilidad: Sistema Serie-Paralelo

El anterior sistema cuenta con los siguientes vectores de corte:

Tabla 1. Vectores de Corte clasificados por Grados

Grado 1	Grado 2	Grado 3
{C1}*	{C2, C3}* {C1, C2} {C1, C3}	{C1, C2, C3}

Nota: el grado de los vectores indica la cantidad de componentes con los que cuenta el vector. Los vectores de corte mínimos para el RBD que se observa en la Figura 1 corresponden a los que van acompañados por el símbolo “*”.

Importancia por Fussell-Vessely

Es una medida de importancia utilizada en análisis de riesgos y fiabilidad para cuantificar la contribución relativa de un componente o evento específico a la falla total de un sistema. Esta métrica se interpreta como la probabilidad de que, dado que ha ocurrido una falla crítica en el sistema, al menos un vector de corte mínimo que incluye el

elemento considerado haya contribuido a dicha falla [9].

Debido a que esta métrica identifica las fallas que probablemente conducirán a una falla crítica, a menudo se utiliza para la selección de candidatos para la mejora.

La Métrica se define de la siguiente manera:

$$I^{FV}(C_i) = \frac{Pr(\bigcup_{i=1}^{x_j} F_j^i)}{Pr(\bigcup_{k=1}^n F_k)} \approx \frac{\sum_{i=1}^{x_j} \prod_{j \in \Omega} \bar{A}_j^0(t)}{\sum_{k \in X_n} \prod_{k \in \Omega} \bar{A}_k^0(t)} \quad (3)$$

Esta, otorga a cada componente C_i (Elemento Significativo Funcional) un valor de importancia, basado en su rol ante la funcionalidad del sistema, acopla su ubicación física con su efecto sinérgico entre la mantenibilidad y fiabilidad. Es calculado tanto como para la disponibilidad estado estacionaria (inherente) como la disponibilidad puntual.

Metodología

A continuación, se detalla la metodología implementada para desarrollar el modelo de simulación y realizar los análisis necesarios, con el propósito de proponer un plan de mantenimiento óptimo:

1. Selección del Sistema

En esta etapa, se seleccionó uno de los múltiples sistemas presentes en la embarcación. Para este estudio, se eligió el sistema de propulsión de la POC, el cual está compuesto por siete subsistemas: aire de arranque, enfriamiento por agua de mar, relleno, trasiego y purificación de aceite lubricante, gases de escape, combustible, y finalmente, propulsión y transmisión.

2. Modelado Funcional del Sistema

Esta fase se centró en la comprensión funcional del sistema mediante esquemas P&ID, identificando los componentes clave de cada subsistema denominados Elementos Significativos

Funcionales (ESF). El análisis permitió establecer las relaciones y funciones de estos componentes, lo que resultó en la elaboración de Diagramas de Bloques Funcionales (FBD) [1]. Estos diagramas constituyen la base para el posterior modelado de los Diagramas de Bloques de Fiabilidad (RBD).



Figura 2. Diagrama de Bloques Funcionales del Sistema de Combustible.

3. Caracterización Estocástica

En esta etapa se determinaron los parámetros de las distribuciones que modelan la fiabilidad y mantenibilidad de los ESF. Dichos parámetros se obtuvieron a partir de bases de datos genéricas, como ROADS [20] (Reliability Automated Online Databook System) y OREDA [21] (Offshore Reliability Data), de valores proporcionados por los fabricantes a través de los términos de referencia del ILS y de criterios de expertos. A posteriori, fueron, en conjunto, ajustados con análisis estadísticos (Kolmogorov-Smirnov, máxima verosimilitud y Anderson-Darling) [9], [22]. A su vez, se consideraron el MIL-STD-217F [23] para la predicción de fiabilidad y MIL-HDBK-472 [5] en la predicción de mantenibilidad para validación y contraste.

4. Modelado RBD

Una vez elaborados los Diagramas de Bloques Funcionales, se tradujeron a Diagramas de Bloques de Fiabilidad (RBD), respetando la lógica

funcional y el tipo de comportamiento dado por su fenomenología del sistema (sistemas uniformes o de distribución [24]). Este modelado incluyó configuraciones estáticas tales como serie, redundancias pasivas y activas, y K-out-of-n y condiciones complejas como lo son la carga compartida y el ciclo de trabajo [25], [26]. Se utilizó un software de simulación de eventos discretos, en el que se configuraron los bloques correspondientes a los componentes del sistema con los parámetros de fiabilidad y mantenibilidad obtenidos previamente. En este caso, el software empleado fue PTC Windchill, utilizando su módulo RBD. Para la traducción del análisis FMEA a un RBD de jerarquía 3 y 4, se efectuó la construcción lógica causal de la relación Causa-Modo de falla, con un Diagrama de Árboles de fallas que posteriormente sería traducido como el modelo negativo de un RBD [27].

5. Modelado de Políticas de Mantenimiento

Basándose en la información obtenida del LSA sobre repuestos, costos, recursos logísticos y actividades de mantenimiento, se configuraron las políticas de mantenimiento en PTC Windchill para cada bloque del sistema. Este proceso permitió evaluar la respuesta del sistema en términos de fiabilidad y disponibilidad y, al mismo tiempo, sirvió como base para determinar la cantidad óptima de recursos necesarios durante el tiempo de operación y establecer el intervalo de mantenimiento más adecuado para los distintos escenarios de operación de la embarcación.

Cálculo de Importancia

Tras la simulación de los sistemas y el análisis de los resultados tanto de disponibilidad de los componentes como de los vectores de corte mínimo, se calculó la métrica de Fussell-Vesely para determinar la importancia de cada componente. Los resultados se representaron en un diagrama de Pareto, identificando los componentes críticos para focalizar las actividades

de mantenimiento basados en la regla del Pareto óptimo.

Caso de Estudio: Patrullera Oceánica Colombiana

La Patrullera Oceánica Colombiana (POC), desarrollada por COTECMAR, es una plataforma versátil diseñada para cumplir con una amplia gama de operaciones de seguridad marítima, como patrullaje, vigilancia, interdicción y rescates. Su capacidad para soportar helicópteros, botes interceptores y sistemas de inteligencia naval refuerza su rol estratégico en el entorno marítimo colombiano. Para ésta, se ha determinado evaluar el sistema de propulsión y sus subsistemas.

El diseño de la POC le permite adaptarse a un perfil de navegación asociado a misiones de larga duración, con una distribución de actividades definida que abarca un total de 1080 horas operativas, y se distribuyen como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2. Perfil de navegación de la POC.

	Días	Horas	% Global
NAVEGACIÓN	45	1.080	29%
<i>Max. Velocidad</i>	4	86,40	8%
<i>Patrulla</i>	7	162,00	15%
<i>Escolta</i>	7	162,00	15%
<i>Transito</i>	17	399,60	37%
<i>Baja Velocidad</i>	7	162,00	15%
<i>Stationing</i>	5	108,00	10%

Análisis y Conclusiones

El análisis en cuestión ha sido contemplado de manera global considerando cada uno de los 7 sistemas como independientes, pero que, aún así, interactúan de manera lineal, es decir, la invalidación de la función de alguno de ellos causaría la indisponibilidad del sistema, debido a su núcleo, el cual se consideró para este estudio, el conjunto de motores de combustión interna.

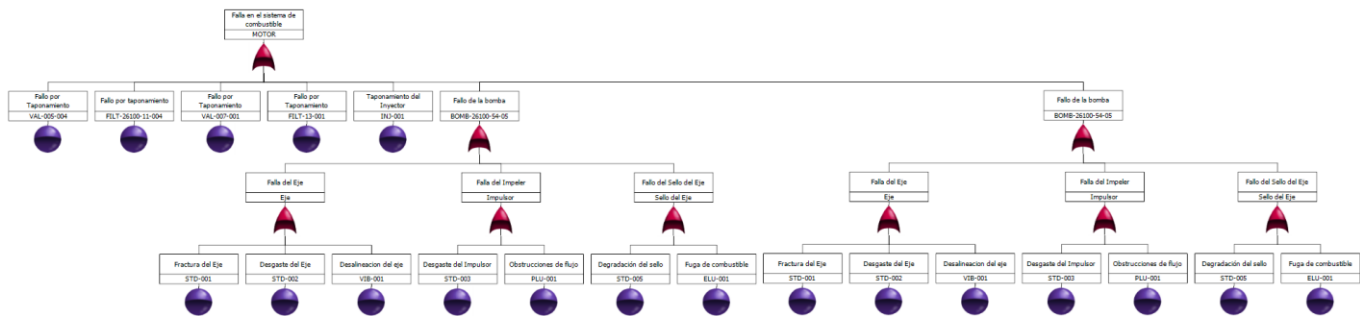


Figura 3. Diagrama de Árbol de Fallas del Sistema de Combustible del Motor Propulsor.

Quienes interactúan sinérgicamente con los 7 subsistemas mencionados previamente.

El análisis detallado para este artículo ha sido focalizado en el sistema de combustible del sistema de propulsión debido a la compleja tarea de efectuar todos los análisis en paralelo para los sistemas se resumen los resultados obtenidos para un sistema de distribución, evaluando los resultados obtenidos a partir de las simulaciones y el modelado estocástico realizados en el software. Se ha utilizado la regla 80-20 de Pareto para la identificación de los Elementos Significativo-Funcionales considerados como cuellos de botella, siendo éstos los que causan mayor impacto en la disponibilidad del sistema, permitiendo así focalizar las estrategias de mantenimiento hacia los elementos más relevantes.

La Figura 3 presenta el modelado del árbol de fallas del sistema de combustible de los motores propulsores, representando un nivel de desglose jerárquico que va hasta el nivel de modo de falla. En este modelo, se establecen las relaciones lógicas que conllevan al incumplimiento de la función principal del sistema, proporcionando una visión clara de las posibles causas de falla. Los modos de falla representados fueron identificados a través del análisis FMEA desarrollado como parte de la metodología LSA, un proceso que permitió documentar las fallas funcionales, modos y efectos de falla de los elementos que componen el sistema.

Este enfoque en el modelado facilita la identificación de áreas críticas dentro del sistema y, del mismo modo, permite evaluar las interacciones entre los componentes y el efecto acumulativo de las fallas en la operación del sistema de propulsión. Al proporcionar un mayor nivel de granularidad en la representación de los fallos, este análisis permitió fortalecer la capacidad para diseñar estrategias de mantenimiento orientadas a mitigar los riesgos operativos y sus respectivas causas.

Por otro lado, yendo a un nivel superior de jerarquía, la Figura 4 presenta el RBD del sistema de combustible. Este diagrama, derivado del análisis funcional realizado durante la creación de los Diagramas de Bloques Funcionales, permitió identificar configuraciones como standby y carga compartida en algunos de los nodos del sistema.

Posteriormente, se evaluó la configuración respectiva en las condiciones operativas diferentes basándose en el concepto de operaciones (CONOPS) e ilustrándose en el Diagrama de Bloques de Fases (RPD). Con estas configuraciones definidas, el software de simulación proporcionó resultados que guían la toma de decisiones para la optimización de la soportabilidad y mantenibilidad del sistema. Donde primero, se identificaron los cuellos de botella ante la situación operativa más crítica (esto es, cuando todos los componentes son no reparables y las configuraciones nodales exigen la

máxima capacidad del sistema) y se ilustraron por un diagrama de Pareto:

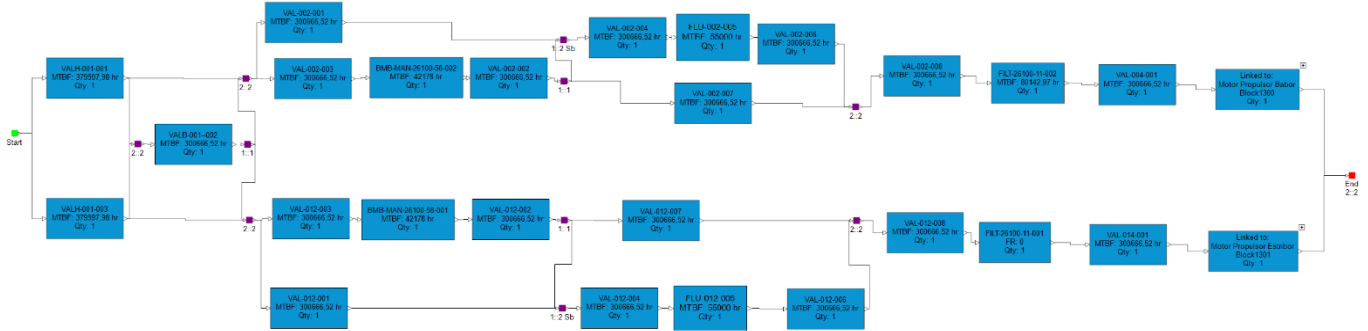


Tabla 3. Resultados obtenidos en la simulación:

Figura 4. Diagrama de Bloques de Fiabilidad del Sistema de Combustible.

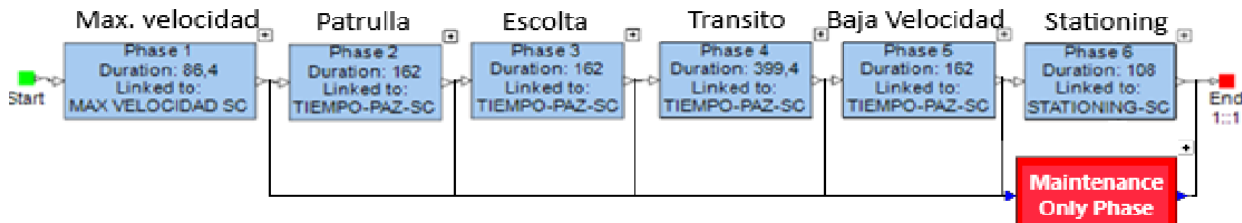


Figura 5. Diagrama de Fases de Fiabilidad del Sistema de Combustible.

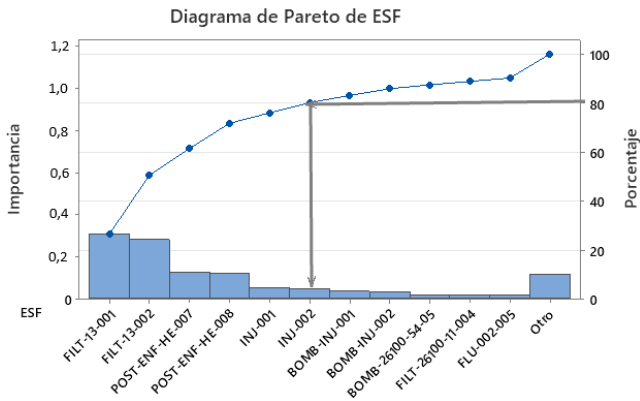


Figura 6. Diagrama de Pareto por Métrica de Fussell-Vesely.

Posteriormente, al identificar los cuellos de botella, se han realizado las simulaciones donde se han dispuesto diferentes estrategias de mantenimiento caracterizadas por la cantidad de repuestos abordo, intervalos de mantenimiento y los recursos disponibles. Los resultados obtenidos para tres diferentes escenarios de simulación fueron los siguientes:

Primera Estrategia de Políticas de mantenimiento y soportabilidad para un tiempo de simulación de la primera misión (1080 horas).

Disponibilidad Operacional del Sistema	65%	
Fiabilidad del Sistema	60%	
ESF	Disponibilidad	Fiabilidad
FILT-13-001	0.6948	0.6928
FILT-13-002	0.6930	0.7050
POST-ENF-HE-007	0.7087	0.7078
POST-ENF-HE-007	0.7097	0.7079
INJ-001	0.7195	0.7099
INJ-001	0.7193	0.7199

Tabla 4. Resultados Obtenido en la simulación: Segunda Estrategia de Políticas de mantenimiento

y soportabilidad para un tiempo de simulación de la primera misión (1080 horas)

Disponibilidad Operacional del Sistema	71%	
Fiabilidad del Sistema	68%	
ESF	Disponibilidad	Fiabilidad
FILT-13-001	0.7929	0.7000
FILT-13-002	0.7339	0.7040
POST-ENF-HE-007	0.7660	0.7220
POST-ENF-HE-007	0.76649672	0.7220
INJ-001	0.7719659	0.7540
INJ-001	0.7784939	0.7540

Tabla 5. Resultados Obtenidos en la simulación: Tercera Estrategia de Políticas de mantenimiento y soportabilidad para un tiempo de simulación de la primera misión (1080 horas)

Disponibilidad Operacional del Sistema	90%	
Fiabilidad del Sistema	80%	
ESF	Disponibilidad	Fiabilidad
FILT-13-001	0.9111	0.8300
FILT-13-002	0.9223	0.8440
POST-ENF-HE-007	0.9608	0.8220
POST-ENF-HE-007	0.9664	0.8220
INJ-001	0.9719	0.8540
INJ-001	0.9784	0.8540

Para efectos prácticos del modelado se consideró el esquema de reparabilidad As Good As New (AGAN) donde se define un proceso de renovación 100% exitoso, se modeló el retraso pre-logístico como constante basado en ubicaciones y criterios de recepción del astillero, esto debido a que en navegación es más complejo la restauración y por ende se desea realizar en condiciones controladas en puerto. Los criterios de cuadrillas o equipos de mantenimiento disponibles

para efectuar las acciones son finitos y se considera que no pueden redistribuirse hasta finalizar un proceso.

Conclusiones

Para la toma de decisiones basadas en datos, es imperativo conocer la esencia y trasfondo del origen de los datos. Proyectar su consecuencia implica extrapolar a condiciones que puedan ser lo más acercadas posibles a la realidad sin emplear necesariamente prototipos físicos a escala, es por esto, que la simulación de diversos escenarios de operación con modelos constructivos del mantenimiento y soporte permitieron conocer la dinámica del sistema previendo su estado con el fin de anticipar y determinar las acciones preventivas y prolongar la fiabilidad y disponibilidad de los sistemas. Cabe destacar, que no sólo el aspecto de la mantenibilidad puede ser sujeto a optimización, sino a su vez, el aspecto del diseño y las configuraciones en el manejo de redundancias pueden ser abarcados desde fases tempranas del ciclo de vida de un proyecto, optimizando, por ejemplo, el diseño del sistema.

Tras diversas iteraciones, apoyadas en el modelado de analistas RAM basados en un enfoque de Simulación de Eventos Discretos, se logró identificar con la información disponible el escenario 3 como el más adecuado posible de políticas de mantenimiento y la identificación de aquellos Elementos críticos que deben ser priorizados en caso de ocurrencia de eventos indeseables.

Referencias

- [1] B. S. Blanchard, "LOGISTICS ENGINEERING AND MANAGEMENT -SIXTH EDITION," 2004. [Online]. Available: https://archive.org/details/logisticsengineeOOOoblan_o6f0
- [2] N. Hutchison and C. Hoffman, "Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) Contents Articles Front Matter," 2023. [Online]. Available: www.sebokwiki.org

- [3] A. Birolini, *Reliability Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. doi: 10.1007/978-3-662-54209-5.
- [4] Department of defense Washington D.C., "MIL-HDBK-338B: Electronic Reliability Design Handbook," 1998. [Online]. Available: <http://www.everyspec.com>
- [5] D. of defense W. D. C., "MILITARY STANDARDIZATION HANDBOOK MAINTAINABILITY PREDICTION - MIL-HDBK-472," *Department of defense Washington D.C.*, 1966.
- [6] C. Ebeling, *An Introduction To Reliability and Maintainability Engineering (1996, McGraw-Hill) - libgen.li (1)*. 2003.
- [7] Department of defense Washington D.C., "MIL-HDBK-470: DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK DESIGNING AND DEVELOPING MAINTAINABLE PRODUCTS AND SYSTEMS - VOLUME 1," 1995.
- [8] F. A. Joel Nachlas *et al.*, *Publicaciones de Ingeniería de Sistemas*. Isdefe, 1994.
- [9] Marvin. Rausand, Anne. Barros, and Arnljot. Høyland, *System reliability theory: models, statistical methods, and applications*. John Wiley & Sons, Inc., 2021.
- [10] R. Sahner, K. S. Trivedi, and A. Puliafito, *Performance and Reliability Analysis of Computer Systems*. Springer US, 1996. doi: 10.1007/978-1-4615-2367-3.
- [11] Farr and John V, "Systems Life Cycle Costing Economic Analysis, Estimation, and Management," 2011.
- [12] J. V Jones, "Integrated Logistics Support Handbook," 1987.
- [13] I. García Vaca, (2016). *Anatomía de sistemas: Su análisis y su apoyo*. Madrid, España: , I., vol. I. Madrid: Díaz de Santos, 2016.
- [14] J. Moubray, "Mantenimiento Centrado en Confiabilidad," 1991.
- [15] Department of defense Washington D.C., "MIL-HDBK-1390 LEVEL OF REPAIR ANALYSIS," 2015. [Online]. Available: <http://www.everyspec.com>
- [16] Relex Software Corporation, "Reliability: A Practitioner's Guide," 2003. [Online]. Available: <http://www.intellectuk.org/relc>
- [17] R. Pascual, "El Arte de Mantener," 2008. [Online]. Available: <http://pascual.ing.uchile.cl>
- [18] Jezdimir. Knezevic, "Mantenimiento," p. 211, 1996.
- [19] J. Knezevic, "Mantenibilidad," *isdefe*, 1996.
- [20] Quanterium, "ROADS (Reliability Online Automated Databook System."
- [21] SINTIEF, *Offshore and Onshore Reliability Data*, Sixth., vol. 2. 2016.
- [22] H. Bruel and K. Inc, "System Analysis Reference," 1992.
- [23] Department of defense Washington D.C., "MIL-HDBK-217F: RELIABILITY PREDICTION," 1990.
- [24] Relex Software Corporation, "Reliability: A Practitioner's Guide," 2003. [Online]. Available: <http://www.intellectuk.org/relc>
- [25] H. Bruel and K. Inc, "System Analysis Reference," 1992.
- [26] Marvin. Rausand, Anne. Barros, and Arnljot. Høyland, *System reliability theory: models, statistical methods, and applications*. John Wiley & Sons, Inc., 2021.
- [27] S. Bracke, *Reliability Engineering: Data analytics, modeling, risk prediction*. Springer, 2024.

Hoja de Vida

Víctor Gregorio Bacca Rodríguez, tecnólogo naval electromecánico con énfasis en motores Diesel de la Escuela Naval de Suboficiales "ARC Barranquilla", profesional de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Antonio Nariño. Especialista tecnológico en diseño y construcción de sistemas electrohidráulicos y electroneumáticos de la Escuela Naval de Suboficiales "ARC Barranquilla". Actualmente, se desempeña como Ingeniero de Confiabilidad en la Gerencia de Diseño e Ingeniería de la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Marítima, Naval y Fluvial (COTECMAR).

Cel: +57 (310) 222-3233

Residencia: Colombia, Bolívar, Cartagena de Indias D. T y C.

Email: vbacca@cotecmar.com

Joan Martin Suarez Loaiza, profesional de ingeniería mecánica egresado de la Universidad Tecnológica de Bolívar en 2023. Ha desarrollado prototipos de Softwares para la empresa

COTECMAR, usando Python, QTdesigner, Tkinter y librerías de optimización para cálculos de la ruta óptima en el ámbito del transporte de carga, usando algoritmos genéticos, y simulación de eventos discretos para optimización en toma de decisiones usando motor de números pseudoaleatorios con análisis RAM. Ha participado en el congreso de matemáticas “Encuentro Matemático del Caribe” con aportes a la resolución de anti transformadas por medio de cálculos analíticos usando integrales de variable compleja. Actualmente se encuentra laborando como Ingeniero de Confiabilidad en COTECMAR.

Cel: +57 (304) 672-4616

Residencia: Colombia, Bolívar, Cartagena de Indias D.T. y C.

Email: jmsuarez@cotecmar.com

Jhonattan de Jesús Llamas Reinoso, profesional en Ingeniería Mecánica e Ingeniería Mecatrónica egresado de la Universidad Tecnológica de Bolívar (UTB). Durante mi experiencia en COTECMAR, he desarrollado un software especializado para el cálculo de escantillonado en embarcaciones pequeñas. También he participado en la elaboración de planes de mantenimiento para botes de operaciones fluviales, asegurando la

confiabilidad y operatividad en sus misiones. Además, he contribuido al diseño de análisis de soporte logístico para diversas embarcaciones, integrando metodologías que fortalecen la gestión y operación a lo largo del ciclo de vida de los proyectos.

Cel: + +57 (314) 697-4974

Residencia: Colombia, Bolívar, Cartagena de Indias D.T. y C.

Email: jllamas@cotecmar.com

Luis Fernando Mendoza Cardona, estudiante de Ingeniería Mecatrónica, actualmente en etapa de prácticas profesionales en la División de Soporte Logístico Integrado (ILS) de COTECMAR. Cuenta con un año de experiencia en ingeniería de confiabilidad, con un enfoque especial en estudios RAM (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad). A lo largo de las prácticas ha estado trabajando en el desarrollo de una metodología para implementar estos estudios en diversas etapas del ciclo de vida de proyectos, para apoyar en la fase de diseño, compra y adquisición y fase de servicio.

Cel: +57 (305) 936-7730

Residencia: Colombia, Bolívar, Cartagena de Indias D.T. y C.

Email: luism110803@gmail.com