

Aplicación de RCM y ARC para la Reducción de Fallas en Motores Fuera de Borda: Caso de Estudio en el Embalse Peñol-Guatapé, Colombia

Andrés Esteban Rivera Osorio¹, Fernando Jesús Guevara Carazas²

¹ Grupo de investigación en Gestión Operación de Mantenimiento de Activos GOMAC, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. ariveraos@unal.edu.co

² Grupo de investigación en Gestión Operación de Mantenimiento de Activos GOMAC, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. fjguevarac@unal.edu.co

Resumen

El objetivo de este trabajo se centra en analizar las causas de las fallas en los motores fuera de borda (MFB). Se identifican problemas como la acumulación de sedimentos en el combustible, daños en la unidad de trimado y falta de revisión del aceite de transmisión. Se recomienda la limpieza del tanque de combustible y la revisión regular del aceite de transmisión para un mantenimiento efectivo. La falta de revisión adecuada del aceite de transmisión y los daños por golpes en la unidad inferior resaltan la importancia de los hábitos de uso y mantenimiento. Estos hallazgos enfatizan la necesidad de mayor conciencia por parte de los propietarios de embarcaciones para prolongar la vida útil de los motores. La capacitación en mantenimiento preventivo por parte de las empresas distribuidoras podría abordar la falta de servicio técnico adecuado en la zona del embalse Peñol-Guatapé.

Palabras clave: RCM; Motores Fuera de Borda; Mantenimiento; Unidad de trimado.

Abstract

The aim of this work focuses on analyzing the causes of failures in outboard motors (MBF). Problems such as sediment accumulation in the fuel, damage to the trim unit, and lack of transmission oil inspection are identified. Cleaning the fuel tank and regularly checking the transmission oil are recommended for effective maintenance. The lack of proper transmission oil inspection and impact damage to the lower unit highlight the importance of usage and maintenance habits. These findings emphasize the need for greater awareness among boat owners to prolong the lifespan of the motors. Preventive maintenance training by distributor companies could address the lack of adequate technical service in the Peñol-Guatapé reservoir area.

Keywords: RCM; Outboard Motors; Maintenance; Trim Unit.

1. Introducción

Colombia posee un extenso litoral marítimo y vastas reservas de agua dulce, que representan recursos naturales significativos y a su vez influyen en diversas actividades económicas dentro de las diversas regiones del País. Se estima que aproximadamente el 50% del territorio colombiano está compuesto por agua, con un área marítima de aproximadamente 892.118

kilómetros cuadrados [1]. Además, Colombia ocupa el sexto lugar a nivel mundial en términos de disponibilidad de agua dulce, con una reserva estimada de alrededor de 2.132 kilómetros cúbicos de agua. Dentro de este entorno rico en recursos hídricos, los embalses se han convertido en un importante destino turístico, para el desarrollo de actividades recreativas y económicas relacionadas con el turismo, los deportes náuticos y otras actividades. Uno de los embalses más

destacados en términos de tamaño y actividad turística es el embalse Peñol-Guatapé, con una superficie de navegación de aproximadamente 6.240 hectáreas [2]. Se ha convertido en un destino de renombre en los últimos años. Este municipio del departamento de Antioquia (Noroeste de Colombia) semanalmente recibe más de 20.000 turistas y supera los 50.000 visitantes los fines de semana. [3].

Por otra parte, la Dirección General Marítima (Dimar), estima que en las aguas colombianas transitan alrededor de 56.306 naves, incluyendo 39.972 naves de pasajeros y 11.467 de recreo [4]. Según datos de la inspección fluvial del municipio de Guatapé, se estima que actualmente hay 2.000 embarcaciones registradas en el embalse, incluyendo lanchas, catamaranes, yates, botes, barcos, entre otros. De este gran número de embarcaciones alrededor de 1.600 están equipadas con motores fuera de borda (MFB). Por su facilidad de instalación y operación los MFB son predominantes y son foco central de nuestro estudio. El poco servicio especializado disponible, motivo esta investigación a fin de comprender y abordar los desafíos relacionados con la confiabilidad y el mantenimiento de estos motores, con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa y la seguridad de las actividades náuticas en la región.

Como se mencionó, uno de los problemas más relevantes que enfrenta esta comunidad es la ausencia de centros técnicos o empresas que ofrezcan un servicio especializado de mantenimiento para los MFB. Esta falta de soporte técnico puede resultar en daños imprevistos durante las actividades, interrumpiendo la generación de ingresos para los propietarios y aumentando el riesgo de accidentes con graves consecuencias. Además, la falta de centros especializados provoca una baja cultura de mantenimiento preventivo entre los propietarios, que enfocados en obtener recursos económicos para su subsistencia descuidan el mantenimiento de los MFB. Como consecuencia, los daños y fallas en los motores son frecuentes, incrementando la demanda de servicios de mantenimiento correctivo, inmovilizando las embarcaciones y consecuentemente afectando la economía de la comunidad [5].

En respuesta a la problemática identificada, se plantea una estrategia integral de mantenimiento para abordar efectivamente los desafíos que enfrentan los MFB. Esta estrategia combina las herramientas de Análisis de Modos de Falla y Efectos (FMEA), Análisis de Causa Raíz (ACR), permitiendo identificar y evaluar las posibles causas fundamentales de los problemas que afectan a estos motores, mejorando su confiabilidad y desempeño. La implementación del RCM se basa en la comprensión profunda de las funciones y modos de falla de los equipos, permitiendo diseñar planes de

mantenimiento específicos y eficientes que garanticen el óptimo funcionamiento de los MFB.

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), tiene entre otros el objetivo es identificar componentes críticos que, si fallan, ocasionan la parada inmediata del sistema [6][7]. En este caso de estudio el estudio de funciones se implementa para determinar más importantes, y de esta forma reducir tareas de mantenimiento innecesarias [8], [9]. Varios trabajos de investigación y libros especializados describen los conceptos del RCM y sus relaciones con la ingeniería de la confiabilidad [6]-[8], [10]-[11], destacando una metodología de análisis que incluye: selección del sistema y recolección de información, selección del límite del sistema, descripción funcional del sistema, definición de las funciones y fallas funcionales, FMEA, aplicación de los diagramas de decisión, selección de las tareas más adecuadas, consolidación de las tareas, y retroalimentación permanente.

2. METODOLOGIA

En la Figura 1, presentamos las etapas del método desarrollado para el estudio de mejora del mantenimiento y la confiabilidad de los MFB

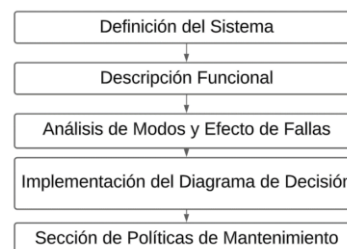


Figura 1. Método Basado en RCM, [12].

A continuación, se describe detalladamente cada etapa del método.

2.1 Definición del Sistema:

En esta etapa, se define claramente el sistema a estudiar y componentes que lo conforman. También se recopila toda la información posible, desde datos hasta actividades de mantenimiento.

2.2 Definición Funcional:

En esta etapa, se determinan las funciones de los sistemas, subsistemas y componentes del sistema en análisis. Una vez identificadas, se pueden evaluar las consecuencias de las fallas desde las perspectivas operativa, de seguridad y económica. El propósito de este análisis es reconocer los componentes críticos en los distintos niveles y subniveles del sistema [11]. Una técnica utilizada para el estudio funcional de sistemas es la creación de un árbol funcional, también conocido

como diagrama funcional de elementos o diagrama funcional de bloques [12].

2.3 FMEA:

El FMEA se presenta como un enfoque sistemático y detallado para explorar los diversos escenarios de fallo que podrían afectar el rendimiento y la confiabilidad de los MFB, buscando identificar subsistemas y componentes crítico, así como la causas raíz de los problemas para desarrollar estrategias de mitigación y prevención efectivas. En este trabajo, se utilizaron tres categorías básicas de severidad: alta, media y baja, cada una subdividida en tres niveles. A los componentes cuya falla provoca una mayor degradación de la condición operacional los MBF se les asigna un mayor índice de severidad. Cuanto mayor es el índice, mayor es la atención en el planeamiento de las actividades de mantenimiento, siguiendo la filosofía del RCM, para reducir la posibilidad de ocurrencia de fallas y de este modo, garantizar la alta disponibilidad del activo.

2.4 Implementación del diagrama de decisión:

Los diagramas de decisión del RCM permiten seleccionar políticas de mantenimiento enfocadas principalmente en cuatro criterios: seguridad (S), cuando la falla es evidente (H), falla que afecta el medioambiente o alguna regulación (E) y falla que afectar la operación (O) [10], [12]. La implementación de esta, como guía para caracterizar posteriormente las tareas más adecuadas de mantenimiento.

2.5 Sección de Políticas de Mantenimiento:

Los MFB normalmente reciben mantenimientos preventivos recomendados por los fabricantes y se limitan al cambio de aceites y filtros, por ejemplo. El enfoque RCM, permite diseñar nuevas actividades acordes con su contexto operacional y la evidencia de la presencia de fallas. Este enfoque permitiría ser más proactivos en el mantenimiento, optimizando la programación de actividades preventivas para maximizar su disponibilidad y la seguridad de las operaciones. Adicionalmente se identifican tareas de mantenimiento y se establecerían intervalos óptimos para su ejecución, lo que contribuiría a prolongar la vida útil del motor y minimizaría las posibilidades de fallas imprevistas.

3. APLICACION DEL METODO A LOS MFB.

3.1 Definición del Sistema:

Los MFB, caracterizados por su instalación en el espejo de la lancha, es decir, en la parte externa de la borda de la popa, deben su denominación a esta disposición peculiar. Equipados con hélices y sistemas

de dirección, estos motores son los que proporcionan el empuje necesario para impulsar la embarcación y permitir su navegación. Pertinentes al grupo de motores de combustión interna alternativos, estos dispositivos son alimentados por combustibles como diésel o gasolina. Estos motores son utilizados comúnmente en embarcaciones ligeras, se encuentran disponibles en ciclos de 2 o 4 tiempos, proporcionando una fuente de energía confiable y eficiente para la navegación marítima y fluvial. Además, los MFB se destacan por su capacidad de maniobra, lo que facilita la navegación en aguas restringidas y la ejecución de maniobras precisas en puertos y embarcaderos. Su versatilidad y facilidad de mantenimiento también contribuyen a su popularidad entre los navegantes [13]. Los MFB están diseñados para operar en un rango de 4.000 a 6.000 rpm, lo que les permite adaptarse a diversas condiciones de navegación y a las necesidades específicas de cada tipo de embarcación [13].

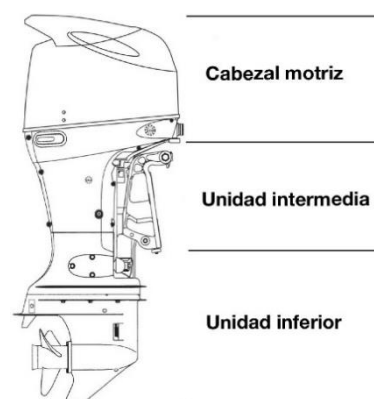


Figura 2. Partes del motor. Fuente: elaboración propia.

La Figura 2 ilustra las tres partes principales de un los MBF. El cabezal motriz alberga propiamente al motor de combustión interna y los sistemas de control, mientras que la unidad intermedia proporciona soporte estructural, y aloja los sistemas de transmisión. Por último, la unidad inferior alberga el convertidor o transmisión de potencia entre el cabezal y la hélice.

La expectativa de vida operativa de los MFB, según los fabricantes varía entre los 8 y 10 años, esto sujeto a múltiples variables como el régimen de utilización y las condiciones ambientales. Por ejemplo, el desempeño de estos motores puede verse afectada si se ven sometidos a entornos exigentes como áreas pantanosas, terrenos pedregosos o zonas densamente pobladas de malezas, debido al incremento de la carga de trabajo. En el caso particular de Guatapé se ha observado que los procesos de reparación de un MFB demandan un tiempo promedio de 15 días, siempre y cuando se cuente con todos los recursos necesarios, incluyendo repuestos y herramientas pertinentes [14]. Es importante destacar que la selección adecuada de accesorios, como la hélice correcta, también puede influir en la durabilidad y eficiencia del motor [15].

3.2 Elaboración del Árbol Funcional:

En la Figura 3 se muestran las tres partes que componen el motor. Para simplificar, se presentan tres árboles funcionales correspondientes al cabezal motriz, la unidad intermedia y la unidad inferior.

Cabe destacar que estas representaciones son basadas en las revisiones bibliográficas especialmente en los manuales de servicio. Las cuales tienen como finalidad demostrar la aplicación de la descripción funcional por medio de árboles funcionales [12].

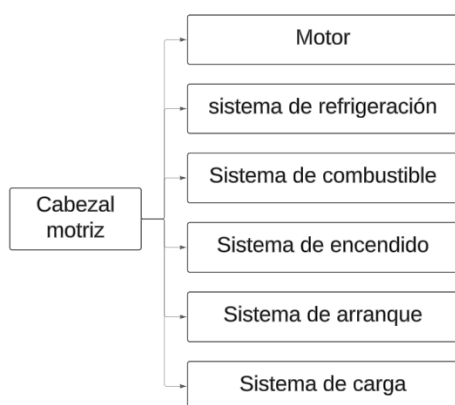


Figura 3. AF Cabezal motriz. Fuente: elaboración propia.

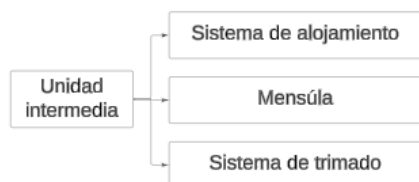


Figura 4. AF Unidad intermedia. Fuente: elaboración propia.

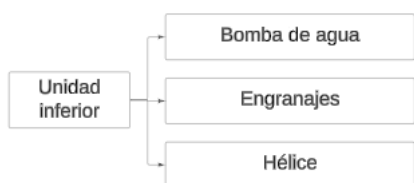


Figura 5. AF Unidad inferior. Fuente: elaboración propia.

3.3 Análisis de Modos y Efectos de Fallas

El desarrollo del FMEA permite identificar cuáles son las fallas más comunes que afectan a los MFB. Sin embargo, como no se cuenta con una base de datos histórica de las fallas más frecuentes, el estudio contó con la participación de proveedores y mecánicos de talleres del sector. Los proveedores proporcionaron datos sobre los repuestos que más se solicitaban, lo que permite identificar patrones de fallos recurrentes los cuales se pueden ver en las figuras 6, 7 y 8. Por lo tanto esto permite desarrollar estrategias de mantenimiento más

efectivas y dirigidas, mejorando la confiabilidad de los MFB. Además, esta información permite identificar políticas de mantenimiento preventivo y correctivo que reduzcan la ocurrencia de fallas y maximicen la disponibilidad operativa de los motores.

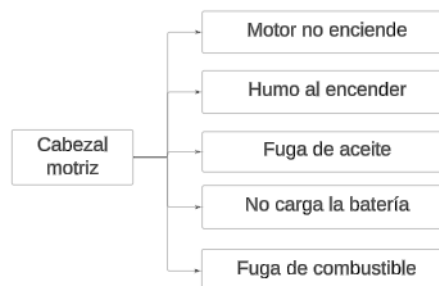


Figura 6. FMEA Cabezal motriz. Fuente: elaboración propia.



Figura 7. FMEA Unidad intermedia. Fuente: elaboración propia.

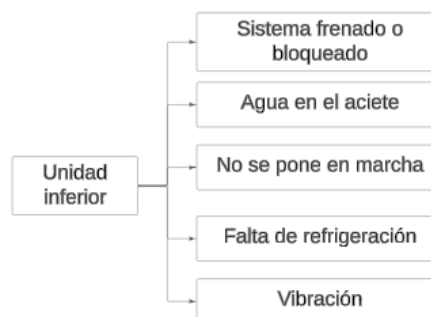


Figura 8. FMEA Unidad inferior. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se listan los repuestos más solicitados, los cuales nos ayudaron a realizar el FMEA. Esta información fue recopilada a través de la consulta con los proveedores de repuestos y técnicos locales, y es fundamental para identificar las fallas más comunes y los componentes críticos en los MFB.

Repuestos cabezal motriz:

- i) Bombas de baja presión y alta presión.
- ii) Filtros de combustible.
- iii) Anillos y pistones.
- iv) Retenedor Cigüeñal
- v) Empaques de culata, Carter y base.
- vii) Sensor de neutra.
- viii) Rectificador de corriente.
- ix) Válvulas, Sellos de válvulas y guías de válvulas.

Repuestos unidad intermedia:

- i) Escobillas.
- ii) Motor de Trimado.

Repuestos unidad inferior:

- i) Juego de piñones.
- ii) Retenedores.
- iii) Varilla de cambios.
- iv) Impeller.
- v) Hélice.

Se tomo como referencia la tabla de nivel de riegos de la norma ISO 9001 [18] para evaluar la severidad de las fallas presentadas en los MFB. Siendo los niveles más severos los de la numeración 7 al 9 como se muestra en la Tabla 1 [12].

Tabla 1. Clasificación de severidad.

Clasificación	Efecto
9.Efecto peligroso	Grave efecto ambiental, a las personas y a los equipos. Parada total. Quiebra de contratos.
8. Efecto severo	Severo efecto a los equipos, necesidad de reparo y cambio de componentes. Posibles daños a personas y al ambiente. Parada de máquina.
7. Efecto serio	Serio efecto a la operación normal, parada de máquina, posibilidad herir a las personas y dañar el ambiente.

Fuente: [12].

Como fue mencionado, para la ejecución del FMEA, se contó con el apoyo de técnicos de la comunidad y dueños de las embarcaciones, quienes brindaron información sobre falla recurrentes, y problemas a los que se enfrentan en la cotidianidad de la operación.

3.3.1 Caso de estudio

Después de recopilar y analizar la información proporcionada, se llevó a cabo una investigación de campo adicional en cuatro embarcaciones. Tras planificar y validar las fallas reportadas por los propietarios, quienes describieron, como falla más frecuente presencia de fluctuaciones constantes en las revoluciones mientras los motores estaban en funcionamiento, se indujo que la cavitación podría ser el origen del problema en los MFB por ello, se realizaron análisis de laboratorio para determinar el porcentaje de agua y sedimentos en el combustible presentados apoyados por el laboratorio de Fenómenos y Nanotecnología de la Universidad Nacional en la Tabla 2. Se presentan los resultados para las pruebas. El resultado muestra el porcentaje de agua y sedimentos en la muestra (BSW). El procedimiento que se aplica se empieza usando tolueno para homogeneizar la muestra luego centrifugar y medir el volumen de agua y sedimento. Así evitando alteraciones en la composición y por último se repite el centrifugado hasta obtener una lectura constante es recomendable [19].

Tabla 2. %BSW.

Crudos	Horas desde último servicio	BSW
Motor DF115BTL	50	0.1%
Motor DF115	100	0%
Motor DF115A	200	0%
Motor DF115BTL	400	0.2%
Estación de servicio	-	0%

Fuente: Laboratorio Fenómenos y Nanotecnología.

De los resultados de la tabla 2 se observa que de los cuatro motores de los cuales se tomaron muestras, se encontró que dos de ellos presentaban sedimentos en el combustible. Este resultado sugiere que la acumulación de sedimentos no es un problema aislado, sino que podría ser una tendencia generalizada entre los MBF.

3.3.2 Desarrollo del Análisis de Causa Raíz

En el desarrollo normal del FMEA se busca identificar la causa raíz del problema. En este sentido, para complementar el estudio, se llevó a cabo el ACR. Este proceso se enfocó en el uso del método de los "5 whys" [20], un método consolidado que permite profundizar en las causas subyacentes de los problemas. El ACR proporciona una explicación detallada del origen de los fallos identificados durante el FMEA, ayudando a desarrollar soluciones más efectivas y duraderas. Los resultados se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. %ACR.

Modo de falla	Causa
Falla en las bombas de alta y baja presión	Posible ruptura en el diafragma debido al paso de sedimentos en el combustible.
Falla en el motor de arranque	Corrosión por agua
Falla en el rectificador regulador de corriente	Ocasionado un cortocircuito o una sobrecarga eléctrica.
Falla en el sistema de engranajes y varilla de cambios de la unidad inferior	Golpes durante la navegación.
Falla en la hélice	Golpes durante la navegación.
Deformación en la hélice	Golpes durante la navegación.
Falla en el sistema de dirección	Humedad y el uso intensivo, contaminación por agua

Fuente: elaboración propia.

Los modos de falla seleccionados nivel 9 de severidad, por consiguiente, se deben crear estrategias de

mantenimiento específicas las cuales se van a seleccionar en los diagramas de decisión del RCM [12].

3.4 Implementación del diagrama de decisión de RCM

3.5 Selección de Políticas de Mantenimiento

A partir de los resultados de la implementación obtenidos de estos diagramas de decisión, se pueden hacer las siguientes recomendaciones:

ajustes necesarios para garantizar que el motor esté en condiciones óptimas de funcionamiento. Esto puede incluir la revisión del nivel de aceite, la inspección visual de las conexiones y componentes, así como la verificación de la correcta operación de sistemas como el de arranque y la dirección. Una vez finalizada la navegación, se llevan a cabo otras tareas de mantenimiento para proteger el motor y preservar su rendimiento a largo plazo. Estas acciones pueden incluir la limpieza del motor para eliminar cualquier residuo y la aplicación de lubricantes en puntos clave para garantizar un funcionamiento suave y eficiente

Tabla 4. Implementación del diagrama de decisión.

RCM II			SISTEMA: Motor fuera de borda										Facilitador: Andrés Esteban Rivera		Fecha: 19/06/2024	
HOJA DE DECISIÓN													Auditor: Fernando Guevara Carazas		Fecha: 24/06/2024	
Referencia Información			Evaluación de Consecuencias				H1 S1	H2 S2	H3 S3	Tareas a falta de			Tarea Propuesta	Intervalo Inicial	Responsable	
F	FF	MF	H	S	E	O	O1 N1	O2 N2	O3 N3	H4	H5	S4				
1	A	2	Y	N	Y	Y	Y						Limpiar el deposito de combustible Verificar la presión de la bomba Aplicar liquido lubriante e inspeccionar las escobillas Revisar el estado del aceite de engranajes Inspeccionar la hélice Aplique grasa	8 semanas	Técnico	
2	A	2	Y	N	Y	Y	N	Y						12 semanas	Técnico	
3	A	5	Y	N	N	Y	N	Y						1 año	Técnico	
5	A	1	Y	N	Y	Y	N	N	N	Y				7 dias	Técnico	
6	A	1	Y	N	N	Y	Y							1 día	Operador	
7	A	1	Y	N	N	Y	N	Y						8 semanas	Técnico	

Fuente: [10].

- i) Se evidenció la presencia de sedimentos en el combustible. Estos sedimentos se generan en los depósitos de combustible de las embarcaciones y su cantidad puede aumentar significativamente dependiendo de las condiciones de almacenamiento. Los depósitos que no se limpian regularmente o que están expuestos a condiciones ambientales adversas tienden a acumular sedimentos con mayor rapidez. Por lo tanto, se recomienda implementar una política de mantenimiento que incluya la limpieza regular de los depósitos de combustible y la inspección frecuente para detectar y remover sedimentos.
- ii) El cambio periódico del aceite del cabezal motriz cada 100 horas es una práctica de mantenimiento preventivo. Se podría complementar esta rutina con la revisión del filtro de aceite para detectar la presencia de partículas metálicas. Este análisis adicional permite identificar el desgaste prematuro o el inicio del desgaste de las partes mecánicas del MFB. Detectar estas partículas a tiempo facilita la implementación de medidas preventivas y el mantenimiento necesario antes de que ocurra una falla mayor, garantizando así la longevidad y el buen funcionamiento del motor.
- iii) Una práctica fundamental en el mantenimiento de motores fuera de borda es la puesta a punto, tanto antes como después de cada sesión de navegación. Esta rutina implica seguir una serie de recomendaciones establecidas por el fabricante, las cuales suelen estar detalladas en el manual de usuario. Antes de iniciar la navegación, se realizan una serie de verificaciones y

- [16].
- iv) Debido a que con frecuencia se presentan fallos en la unidad de trimado, la tarea de revisar la hélice se complica considerablemente. Como resultado, la unidad inferior permanece constantemente sumergida, lo que provoca que los propietarios de los MFB no revisen regularmente el estado de la hélice ni el aceite de los engranajes de la unidad inferior. Esta falta de mantenimiento puede llevar a problemas serios que afectan la eficiencia y la vida útil del motor. Por lo tanto, se establecen unas políticas de mantenimiento que incluye revisiones periódicas de la hélice y del aceite de los engranajes, incluso si la unidad de trimado presenta fallos, para asegurar el buen funcionamiento del motor y prevenir daños mayores.
- v) Resaltar el sistema eléctrico de los MBF que, por su instrumentación, es posible prevenir fallas y garantizar un rendimiento confiable de los motores.

4. Resultados

El análisis detallado de los repuestos más solicitados revela una tendencia significativa hacia aquellos ubicados en la unidad intermedia y la unidad inferior de los MFB. En la unidad intermedia, destaca la presencia crucial de la unidad de trimado, la cual juega un papel fundamental en la capacidad de ajuste del motor en relación con el agua. Esta unidad permite realizar elevaciones y descensos según las necesidades

de navegación. Sin embargo, cuando esta unidad experimenta daños o fallas, aunque el funcionamiento general del motor no se vea comprometido, se pierde la capacidad de elevación, un aspecto que no es de importancia para los propietarios de embarcaciones debido a que no afecta la operatividad. Por otro lado, en la unidad inferior se encuentran componentes igualmente vitales, como la transmisión de potencia y la hélice. Estas partes están constantemente expuestas a golpes y abrasiones debido a su posición y función en el sistema. Como resultado, la demanda de repuestos en esta área es significativamente alta, reflejando la necesidad de mantener estas partes en condiciones óptimas para garantizar un rendimiento continuo y seguro del motor. Además, la complejidad del acceso al aceite de transmisión en la unidad inferior agrava aún más la situación debido a que mayoría de los MFB permanecen sumergidos de manera continua, la inspección y el mantenimiento preventivo del aceite de transmisión se vuelven una tarea considerablemente difícil. Se recomienda la extracción del bote del agua para realizar esta tarea de manera efectiva, sin embargo, este privilegio es escaso entre los propietarios de embarcaciones. Como consecuencia, los problemas en la unidad de trimado del motor, que suelen ocurrir con mayor frecuencia, dificultan aún más la posibilidad de revisar y mantener adecuadamente el aceite de transmisión. Esta combinación de factores contribuye a la alta demanda de repuestos en la unidad inferior, convirtiéndola en un área importante en la gestión de mantenimiento de los MFB.

Al realizar una inspección detallada de las bujías, de uno de los motores del caso de estudio se identificó la presencia de un depósito conductor sobre el aislamiento eléctrico. Esta condición perturbaba el salto regular del arco eléctrico entre los electrodos, generando una dispersión errática que alteraba la temperatura de operación de la bujía y obstaculizaba la combustión completa del combustible [17]. Este proceso no solo impactaba negativamente en la eficiencia del motor, sino que también propiciaba la acumulación de depósitos de carbón en la bujía, agravando aún más la situación. Al identificar esta causa raíz, procedimos con un análisis de raíz exhaustivo para abordar el problema desde su origen. Siguiendo rigurosamente las pautas del manual de servicio, ejecutamos una limpieza minuciosa de los inyectores y una inspección detallada de los filtros de combustible, evidenciando una acumulación considerable de sedimentos.

Al analizar los datos presentados en la Tabla 2, se comprende mejor la situación. Centrándose en el motor DF115BTL Modelo 2022, que fue el punto de partida de la investigación debido a los restos de carbono detectados en las bujías, se reveló que el 0.1% de la muestra de 50 ml de combustible contenía sedimentos.

Este hallazgo permite identificar la causa raíz detrás de los problemas experimentados por este motor, proporcionando una comprensión más clara de la situación. Sin embargo, esta investigación no se detuvo aquí, ya que el interés era identificar cualquier tendencia o patrón común entre los diferentes motores. De los cuatro motores de los cuales se tomaron muestras, se encontró que dos de ellos presentaban sedimentos en el combustible.

Durante el análisis de los repuestos de la unidad inferior, también se examinaron las hélices de estos motores, revelando daños ocasionados por impactos con piedras, arena y otros objetos presentes en el agua. Estos golpes causaban daños significativos, lo que explica en parte la alta demanda de repuestos para la transmisión, como los piñones. La naturaleza de estos objetos encontrados en el agua genera impactos muy fuertes en las hélices, lo que conduce a una necesidad frecuente de reemplazo de estas piezas.

5. Conclusiones

Como resultado de la implementación de RCM en los MFB, hemos identificado la necesidad de incluir nuevas actividades de mantenimiento que no figuran tradicionalmente en las recomendaciones del fabricante. A través de un análisis exhaustivo y la consulta con proveedores y técnicos locales, se han determinado áreas clave que requieren atención para mejorar la confiabilidad y el desempeño de estos motores. Estas actividades adicionales de mantenimiento permiten anticipar fallos, prolongar la vida útil de los componentes y garantizar una operación más eficiente y segura de las embarcaciones.

La implementación de este caso de estudio logra un impacto significativo en 40 embarcaciones que operan en el embalse de Guatapé. Al adoptar estas estrategias de mantenimiento, los propietarios y operadores de estas embarcaciones pueden esperar una reducción en las fallas inesperadas, una mayor disponibilidad operativa y una mejora general en la seguridad y eficiencia de sus actividades náuticas. Este enfoque proactivo no solo beneficia a los usuarios directos de los MFB, sino que también contribuye positivamente a la economía local, al garantizar que las embarcaciones estén en funcionamiento y disponibles para actividades turísticas y comerciales.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen:
A los proveedores de repuestos.
Estaciones de servicio
Técnicos de los MFB
Laboratorio Fenómenos y Nanotecnología.

7. Referencias

- [1] INVEMAR, "50 años de investigación marina," 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.invemar.org.co/50-mar>. [Accedido: 19 de junio de 2024].
- [2] N. J. Aguirre Ramírez, J. Palacio Baena, and J. J. Ramírez Restrepo, "Características limnológicas del embalse el Peñol-Guatapé, Colombia," *Rev. Ingenierías Univ. Medellín*, vol. 6, no. 10, pp. 53-66, 2007.
- [3] M. A. Correa, "Guatapé figuró como el único pueblo latinoamericano de los más bellos del mundo," *La República*, 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/ocio/guatape-el-pueblo-latino-entre-los-mas-bellos-del-mundo-3815206>. [Accedido: 19 de junio de 2024].
- [4] DIMAR, "60685 embarcaciones se han movilizado en puertos colombianos durante el primer semestre del 2022," 24 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.dimar.mil.co/60685-embarcaciones-se-han-movilizado-en-puertos-colombianos-durante-el-primer-semestre-del-2022>. [Accedido: 19 de junio de 2024].
- [5] J. I. Rocafuerte Tumbaco, "Creación de una microempresa de servicios de mantenimiento a motores fuera de borda en la comuna San Pedro, provincia de Santa Elena, año 2018," B.S. thesis, Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Ecuador, 2019.
- [6] M. Rausand, "Reliability centered maintenance," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 60, pp. 121-132, 1998.
- [7] A. J. Mokashi, J. Wang, and A. K. Vermar, "A study of reliability-centred maintenance in maritime operations," *Marine Policy*, vol. 26, no. 5, pp. 325-335, 2002.
- [8] A. M. Smith and G. R. Hinchcliffe, *RCM--Gateway to World Class Maintenance*. Elsevier, 2003.
- [9] Black & Veatch, *Power Plant Engineering*. Chapman & Hall, 1996.
- [10] J. Moubray, *Reliability-Centered Maintenance II*. Industrial Press Inc., 2001.
- [11] Z. Cheng, X. Jia, P. Gao, S. Wu, and J. Wang, "A framework for intelligent reliability Centered maintenance analysis," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 93, no. 6, pp. 806-814, 2008.
- [12] F. J. G. Carazas, "Análisis de disponibilidad de turbinas a gas empleadas en usinas termoeléctricas a ciclo combinado," 2006.
- [13] F. O. Cobos and M. R. Gámez, "Mantenimiento y puesta a punto de motores fuera de borda que operan en la costa ecuatoriana," *593 Digital Publisher CEIT*, vol. 8, no. 5, pp. 449-464, 2023.
- [14] E. J. Ortega Valdez, "Gestión por procesos de mantenimiento de motores fuera de borda con propuesta de mejoramiento de desarrollo tecnológico en el Taller de la Base Naval Sur de la Armada del Ecuador. Periodo 2013," B.S. Tesis, Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Ecuador, 2014.
- [15] MB Marine, "What is the average life of an outboard motor?" 9 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://mbmarine.co.uk/what-is-the-average-life-of-an-outboard-motor/>. [Accedido: 20 de junio de 2024].
- [16] F. O. Cobos and M. R. Gámez, "Mantenimiento y puesta a punto de motores fuera de borda que operan en la costa ecuatoriana," *593 Digital Publisher CEIT*, vol. 8, no. 5, pp. 449-464, 2023.
- [17] A. O. Prado, J. L. Romero, E. R. Trejo, and R. S. Franssens, "Determinación de las causas que provocan pérdidas de potencia en la operación de motores de gasolina," 2008.
- [18] HASIBOVIC, Ajla Cerimagic; TANOVIC, Anel. Review of ISO 9001: 2015 and ISO 27001: 2013 Implementation in Financial Institution—Case Study. En *2024 47th MIPRO ICT and Electronics Convention (MIPRO)*. IEEE, 2024. p. 1520-1525.
- [19] Studocu. (n.d.). ASTM-96 AGUA Y Sedimentos POR Centrifugación - 1. OBJETO Este método tiene por objeto establecer el - Studocu. <https://www.studocu.com/es-mx/document/utel-universidad-en-linea-de-mexico/quimica/astm-96-agua-y-sedimentos-por-centrifugacion/60927100>
- [20] Card, A. J. (2017). The problem with '5 whys'. *BMJ quality & safety*, 26(8), 671-677.