



Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí
Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura
Carrera de Ingeniería Marítima

TESIS

Modalidad: Proyecto de Investigación

TEMA:

**Implementación de una estrategia de mantenimiento basado en
condición a motores principales y auxiliares instalados en el B/P
“ANDREA 1”**

AUTOR:

Sarmiento Centeno Jesús Jolao

TUTOR:

Ing. Zambrano Ascencio José Adrián, Mgtr.

Manta – Ecuador
Julio 2026

Certificación del Tutor

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí.

Certifico:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante SARMIENTO CENTENO JESÚS YOLAO, legalmente matriculado en la carrera de Ingeniería Marítima, período académico 2026-1, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es

“IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN A MOTORES PRINCIPALES Y AUXILIARES INSTALADOS EN EL B/P “ANDREA 1”.

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.



Ing. Zambrano Ascencio José Adrián, Mgtr.

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Quien suscribe Sarmiento Centeno Jesús Jolao, portador de la cédula de ciudadanía 1312008574, libre y voluntariamente declaro que el presente tema de investigación:

“IMPLEMENTACION DE UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO BASADA EN CODINACION A MOTORES PRINCIPALES Y AUXILIARES INSTALADOS EN EL BUQUE PESQUERO “ANDREA I””, su contenido, ideas, análisis, conclusiones y propuestas son originales, auténticos y personales.

En tal virtud son para efectos legales y académicos que se desprenden de la presente tesis es y será de mi exclusiva responsabilidad legal y académica, como autor de este.



Sarmiento Centeno Jesús Jolao

AUTOR



Ing. Zambrano Ascencio José Adrián, Mgtr

TUTOR

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo implementar una estrategia de mantenimiento basado en condición para los motores principales y auxiliares instalados en el B/P “ANDREA 1”, utilizando como fundamento el seguimiento e interpretación de parámetros técnicos registrados durante su funcionamiento. El estudio se desarrolló con un enfoque cuantitativo, descriptivo y aplicado. Los registros operacionales de cinco motores fueron organizados, depurados y tratados mediante estadística descriptiva, análisis de tendencias, comparación entre equipos y reconocimiento de comportamientos atípicos. Las variables evaluadas se asociaron principalmente en las presiones y temperaturas en sistemas de combustión, refrigeración y lubricación.

Los resultados permitieron caracterizar el régimen operacional e identificar patrones de estabilidad, transiciones y desviaciones con interés para el mantenimiento. Se evidenció una marcada sincronización entre las máquinas, una separación térmica sostenida entre los motores principales, variaciones prolongadas en parámetros de equipos auxiliares y relaciones presión-temperatura útiles para seguir la evolución de su condición. A partir de estos hallazgos se establecieron líneas de referencia, reglas de persistencia y niveles escalonados de atención integrados en un tablero de seguimiento. La estrategia propuesta facilita distinguir fluctuaciones propias de la operación de comportamientos que requieren verificación técnica. Se concluye que el uso sistemático de los parámetros operacionales fortalece la planificación del mantenimiento, mejora la identificación temprana de anomalías y proporciona una base objetiva para priorizar decisiones sobre los motores estudiados.

Palabras clave: mantenimiento basado en condición, motores diésel marinos, mantenimiento predictivo, monitoreo de condición, parámetros operacionales, buques pesqueros.

Abstract

Maintenance management on fishing vessels requires mechanisms capable of recognizing changes in machinery behavior before they develop into conditions that affect operational availability. Accordingly, this research aimed to implement a condition-based maintenance strategy for the main and auxiliary engines installed on the fishing vessel “ANDREA 1”, using the monitoring and analysis of operating parameters as its technical basis. The study followed a quantitative, descriptive, and applied approach through the collection, cleaning, and processing of operational records from five engines. Variables mainly associated with pressure and temperature in different systems were examined using descriptive statistics, trend analysis, comparison between equipment, and identification of atypical behavior.

The results made it possible to characterize the operating regime of the engines and to identify stability patterns, operating transitions, and relevant deviations. The main findings included a high degree of operational synchronization, a sustained thermal separation between the main engines, prolonged variations in selected auxiliary-engine parameters, and pressure-temperature relationships that provide useful information about condition evolution. The analysis distinguished normal operating fluctuations from behaviors that merit technical follow-up, avoiding the assumption that a single extreme reading is sufficient evidence of failure. Based on these findings, a maintenance strategy was structured around trends, reference conditions, and graded attention levels, supported by graphical tools that facilitate interpretation. The systematic use of operating parameters is therefore considered a practical means of strengthening maintenance planning, supporting early anomaly recognition, and improving technical decision-making for the engines studied.

Keywords: condition-based maintenance, marine diesel engines, predictive maintenance, condition monitoring, operating parameters, fishing vessels.

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado a mi familia, que ha sido mi apoyo constante a lo largo de la carrera universitaria. Su confianza, compañía y esfuerzo hicieron posible que pudiera llegar hasta esta etapa, por lo que este logro también les pertenece.

A mis padres, Delfín y Narciza, por ser mi ejemplo y mi principal impulso. Gracias por enseñarme a perseverar, por acompañarme en los momentos difíciles y por recordarme siempre la importancia de terminar aquello que uno se propone.

A mis hermanos, Josue, Neicker y Yaveth, por sus risas, consejos y respaldo incondicional; y a mi cuñada Johana, por estar pendiente de mi proceso y brindarme palabras de ánimo cuando más las necesitaba.

A los amigos que encontré durante este camino, porque cada conversación, experiencia y gesto de apoyo dejó algo valioso en mi formación. Finalmente, a mis profesores, cuyas enseñanzas y experiencias contribuyeron a que pueda mirar la ingeniería no solo como una profesión, sino como una responsabilidad.

Agradecimiento

A mi familia, por estar presente durante toda mi formación, por preocuparse por mi bienestar y por sostenerme en los momentos en que el cansancio o las dificultades hicieron más complejo el camino. Culminar esta etapa habría sido mucho más difícil sin su respaldo.

A la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, por brindarme la oportunidad de formarme académica y profesionalmente en sus aulas y por proporcionarme conocimientos, experiencias y herramientas que serán parte de mi desempeño como ingeniero.

Al Ing. Zambrano Ascencio José Adrián, Mgtr., por su acompañamiento durante esta investigación, por compartir sus conocimientos y experiencia, y por orientar el trabajo cuando fue necesario corregir el rumbo o profundizar el análisis. Su disposición fue importante para llevar este proyecto hasta su culminación.

Índice De Contenido

Introducción.....	1
Problema de investigación	6
Pregunta de investigación.....	6
Objeto de investigación	6
Campo de acción.....	7
Hipótesis	7
Objetivo general	70+
Variables de investigación	7
Tareas de investigación.....	7
Justificación De La Investigación.....	8
Capítulo I: Marco Teórico	10
1.1 Conceptualización y evolución del mantenimiento.....	10
1.2 Fundamentos para implementar una estrategia basada en condición.....	14
1.3 Motores diésel marinos principales y auxiliares.....	17
1.4 Técnicas de monitoreo de condición	19
1.5 Procesamiento e interpretación de la información	22
1.6 Confiabilidad, disponibilidad e indicadores de mantenimiento.....	24
1.7 Marco normativo y técnico	26
1.8 Antecedentes investigativos.....	27
1.9 Vacío de conocimiento y síntesis del marco teórico.....	29
Capítulo II. Marco Metodológico	30
2.1 Enfoque, tipo y diseño de la investigación.....	30
2.2 Método general de estudio.....	32
2.3 Delimitación del objeto, unidad de análisis, población y muestra	34
2.4 Variables y categorías de análisis	35
2.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	37
2.6 Validez, confiabilidad y control metrológico	40
2.7 Procedimiento de la investigación	41
2.8 Tratamiento, procesamiento y análisis de la información.....	45
2.9 Criterios para la clasificación de la condición y toma de decisiones.....	48
2.10 Estructura operativa de la estrategia propuesta.....	49
2.11 Indicadores para evaluar la implementación.....	50
2.12 Consideraciones éticas, de seguridad y confidencialidad	50
2.13 Limitaciones y medidas de control.....	51
2.14 Resultados del procedimiento metodológico	51
2.15 Conclusiones del capítulo	52
Capítulo III. Resultados Y Discusión	53
3.1 Criterios de interpretación y alcance del análisis.....	53
3.2 Organización de las señales analizadas	54
3.2.1 Equipos, parámetros y correspondencia funcional.....	54
3.2.2 Comportamiento bimodal y necesidad de comparar estados equivalentes.....	55
3.2.3 Patrón operacional conjunto de las cinco máquinas	56
3.3 Resultados de las máquinas principales.....	58
3.3.1 Simetría térmica global	58

3.3.2 Cambio térmico sostenido a partir del 29 de junio	60
3.3.3 Episodios térmicos de corta y larga duración.....	61
3.4 Resultados de la máquina auxiliar 1	62
3.4.1 Estabilidad de las presiones durante el estado alto	62
3.4.2 Evento de presión de combustible del 1 de julio	63
3.5 Resultados de la máquina auxiliar 2	64
3.5.1 Equilibrio térmico del combustible y el agua de alta temperatura	64
3.5.2 Lecturas extremas y episodios confirmados	65
3.6 Resultados de la máquina auxiliar 3	66
3.6.1 Línea base del sistema de lubricación.....	66
3.6.2 Relación inversa entre temperatura y presión.....	66
3.7 Análisis multivariable de eventos.....	68
3.7.1 Concentración de eventos prioritarios	68
3.7.2 Evento multivariable del 15 de mayo.....	69
3.7.3 Excursión térmica de las máquinas principales del 19 de junio.....	70
3.7.4 Evento coordinado del 1 de julio	71
3.8 Discusión integrada de los resultados.....	72
3.8.1 La línea base debe construirse por estado operacional	72
3.8.2 La persistencia y la coincidencia pesan más que el máximo aislado.....	72
3.8.3 Los indicadores relacionales son más informativos que los valores aislados	73
3.8.4 Aporte respecto de antecedentes del sector	73
3.9 Hallazgos consolidados y decisiones de mantenimiento	74
3.9.1 Reglas propuestas para el tablero de condición	75
3.9.2 Escalamiento de respuesta	75
3.10 Evaluación técnico-económica referencial de la estrategia MBC.....	76
3.10.1 Costos referenciales de implementación	76
3.10.2 Escenarios de ahorro y periodo de recuperación.....	77
3.11 Conclusiones parciales del capítulo	79
Conclusiones.....	80
Recomendaciones.....	82
Referencias.....	83

Índice De Tablas

Tabla 1. Normas y documentos técnicos de interés para la estrategia MBC	26
Tabla 2. Síntesis del diseño metodológico	32
Tabla 3. Operacionalización de la estrategia de mantenimiento basado en condición	36
Tabla 4. Operacionalización del desempeño técnico y de mantenimiento.....	36
Tabla 5. Fuentes documentales y datos que se extrajeron	37
Tabla 6. Escala propuesta para la valoración de criticidad	40
Tabla 7. Campos de la ficha de caracterización de los motores	41
Tabla 8. Plan preliminar de monitoreo por técnica.....	43
Tabla 9. Criterios de calidad para aceptar una observación	46
Tabla 10. Niveles de condición y respuesta propuesta	48
Tabla 11. Responsabilidades básicas dentro del flujo MBC.....	49
Tabla 12. Indicadores de evaluación de la estrategia	50
Tabla 13. Síntesis cuantitativa de los resultados principales	54
Tabla 14. Variables operacionales incluidas en la evaluación	54
Tabla 15. Centros empíricos y línea base del estado operacional alto.....	55
Tabla 16. Distribución temporal del estado operacional alto	57
Tabla 17. Comparación pareada de las temperaturas de escape en estado alto	59
Tabla 18. Presiones de la auxiliar 1 durante el estado alto.....	62
Tabla 19. Balance térmico de la auxiliar 2 durante el estado alto	64
Tabla 20. Comportamiento del sistema de lubricación de la auxiliar 3	66
Tabla 21. Concurrencia de variables en condición estadística prioritaria	68
Tabla 22. Eventos de mayor relevancia técnica	72
Tabla 23. Matriz consolidada de hallazgos.....	74
Tabla 24. Reglas de evaluación para la estrategia MBC	75
Tabla 25. Niveles de respuesta de mantenimiento	75
Tabla 26. Estimación referencial de costos para implementar y sostener la estrategia MBC.....	76
Tabla 27. Sensibilidad económica de la estrategia bajo tres niveles de gasto anual	77

Índice De Figuras

Figura 1. Secuencia metodológica para la implementación de la estrategia MBC.....	33
Figura 2. Reducción de la dispersión al comparar estados equivalentes	56
Figura 3. Ocupación diaria del estado operacional alto	57
Figura 4. Distribución mensual del estado operacional alto	58
Figura 5. Comparación pareada de temperatura por mes.....	59
Figura 6. Evolución diaria de la simetría térmica entre máquinas principales.....	61
Figura 7. Comportamiento coordinado de las presiones de la auxiliar 1	63
Figura 8. Estabilidad del balance térmico de la auxiliar 2	65
Figura 9. Relación presión-temperatura del aceite en la auxiliar 3.....	67
Figura 10. Concentración temporal de eventos estadísticamente prioritarios.....	69
Figura 11. Secuencia multivariable del 15 de mayo.....	70
Figura 12. Evento coordinado del 1 de julio.....	71
Figura 13. Sensibilidad del ahorro anual bruto y neto de la estrategia MBC	78

Introducción

La continuidad operativa de una embarcación pesquera depende, en gran medida, de la confiabilidad de los equipos que sostienen la propulsión, la generación de energía y los servicios auxiliares. A diferencia de una instalación industrial situada en tierra, un buque desarrolla sus actividades durante periodos prolongados lejos de talleres, proveedores y asistencia técnica inmediata. En ese entorno, una anomalía que inicialmente parece menor puede adquirir mayor relevancia si compromete un motor principal, un grupo electrógeno o alguno de los sistemas que permiten mantener la operación a bordo. Por esta razón, el mantenimiento de la maquinaria marina no puede entenderse únicamente como la reparación posterior a una avería, sino como una actividad técnica que debe anticipar comportamientos desfavorables y aportar información suficiente para decidir cuándo, dónde y con qué prioridad intervenir.

Durante décadas, las políticas de mantenimiento se apoyaron principalmente en dos criterios: corregir el equipo una vez producida la falla o intervenirlo de acuerdo con horas de servicio y periodos definidos por el fabricante. Ambos enfoques conservan utilidad y continúan formando parte de la gestión de activos; sin embargo, presentan limitaciones cuando se emplean de manera aislada. Un componente puede alcanzar el intervalo programado sin mostrar deterioro significativo, mientras otro puede modificar su comportamiento antes de la fecha prevista debido a condiciones de carga, temperatura, contaminación, desgaste, calidad del combustible o antecedentes de reparación. Esta realidad ha impulsado el desarrollo de estrategias que incorporan la condición técnica del activo como un elemento directo de la planificación del mantenimiento (Moubray, 1997; Mobley, 2002).

El mantenimiento basado en condición (MBC) responde a esta necesidad mediante la observación sistemática de variables capaces de reflejar cambios en el estado de una máquina. Su finalidad no es sustituir indiscriminadamente las tareas preventivas ni esperar a que se

active una alarma de protección, sino reconocer desviaciones, tendencias y relaciones entre parámetros antes de que la degradación alcance un nivel que obligue a una intervención no planificada. La Norma ISO 17359:2018 plantea que un programa de monitoreo debe partir del conocimiento del equipo, sus funciones, modos de falla, condiciones de operación y variables sensibles. De manera semejante, los estudios realizados en maquinaria naval evidencian que los datos adquieren valor diagnóstico cuando se interpretan junto con el régimen de funcionamiento y el historial de mantenimiento, y no como lecturas independientes (Basurko & Uriondo, 2015; Jimenez et al., 2020).

En los motores diésel marinos esta perspectiva resulta especialmente pertinente. Las presiones de lubricación y combustible, las temperaturas de refrigeración, aceite o gases, la carga y otras magnitudes de servicio cambian durante arranques, maniobras, variaciones de potencia y periodos de funcionamiento estable. En consecuencia, un mismo valor puede tener interpretaciones distintas según el momento operacional en que se registra. Lazakis et al. (2018) señalan que el mantenimiento por condición puede complementar las políticas programadas cuando la información se estructura de forma coherente y se vincula con mecanismos de falla. Asimismo, Karatuğ y Arslanoğlu (2022) destacan que la utilidad de una estrategia de diagnóstico no depende solamente de disponer de datos, sino de convertirlos en criterios de decisión comprensibles para el personal responsable del equipo.

Esta consideración adquiere importancia en el sector pesquero, donde conviven motores de diferentes generaciones, sistemas de instrumentación heterogéneos y métodos de registro que pueden ser manuales, digitales o una combinación de ambos. En el contexto ecuatoriano, Zambrano-Ascencio y Pérez-Guerrero (2021) identificaron que una parte de la flota atunera estudiada disponía de información operacional registrada en bitácoras, pero que su aprovechamiento para análisis predictivo era todavía limitado. Este antecedente permite reconocer una oportunidad concreta: en muchos casos no es indispensable comenzar por una

plataforma de instrumentación compleja, sino por ordenar, contextualizar e interpretar técnicamente los datos que ya produce la maquinaria.

A partir de este planteamiento, el problema abordado en la presente investigación se relaciona con la necesidad de transformar los registros operacionales de los motores en información útil para el mantenimiento. La existencia de lecturas de presión o temperatura, por sí sola, no constituye un sistema de monitoreo de condición. Para que esos valores contribuyan a la gestión técnica es necesario establecer referencias, separar estados operacionales, identificar desviaciones persistentes, comparar equipos que cumplen funciones equivalentes y determinar cuándo una variación merece seguimiento, verificación instrumental o una intervención programada. El interés de la investigación se concentra, por tanto, en desarrollar un procedimiento que conecte la observación diaria de la maquinaria con decisiones de mantenimiento fundamentadas en evidencia.

El objetivo general consistió en implementar una estrategia de mantenimiento basado en condición aplicada a los motores principales y auxiliares instalados en el B/P “ANDREA 1”. Para alcanzar este propósito se tomó como punto de partida la información operacional disponible de cinco máquinas, examinando variables de presión y temperatura asociadas con sistemas de combustión, refrigeración, lubricación y alimentación. El análisis no se limitó a verificar máximos y mínimos; se orientó a reconocer el comportamiento normal de cada señal, su estabilidad durante estados equivalentes de operación, la duración de las desviaciones y la concurrencia de eventos entre diferentes equipos.

Metodológicamente, el trabajo se desarrolló como una investigación aplicada y un estudio de caso técnico, con predominio cuantitativo y apoyo de información documental y operacional. Los registros fueron organizados, depurados y analizados mediante estadística descriptiva, tendencias temporales, comparaciones entre máquinas y relaciones entre parámetros. Se distinguieron periodos de baja y alta condición operacional para evitar que los arranques, paradas o cambios de régimen distorsionaran la línea de referencia. A partir de esta

base se formularon criterios de seguimiento que consideran no solo la magnitud de una lectura, sino también su persistencia, repetición y coincidencia con otras variables. Este enfoque mantiene correspondencia con la lógica propuesta por ISO 17359:2018, en la cual la medición constituye una etapa de un proceso más amplio de evaluación de condición y toma de decisiones.

El tratamiento de los datos permitió reconocer comportamientos que resultan de interés para la gestión de mantenimiento. Las cinco máquinas presentaron una marcada concordancia entre sus estados operacionales, lo que facilitó diferenciar transiciones normales de eventos particulares. En las máquinas principales se observó una separación térmica que pasó de diferencias reducidas a una condición sostenida durante el tramo final del periodo analizado. En los auxiliares se identificaron, entre otros aspectos, una elevación prolongada de presión de combustible, un diferencial térmico estable entre dos variables de una misma máquina y una relación inversa consistente entre la temperatura y la presión del aceite. Estos resultados muestran que el hallazgo de mayor utilidad no siempre corresponde al valor extremo de una señal; en varios casos, la duración de la desviación y su relación con otras variables ofrecieron una interpretación más sólida que un máximo aislado.

Sobre esta base se estructuró una estrategia escalonada de mantenimiento basada en la condición observada. La propuesta utiliza líneas de referencia, análisis de tendencias y niveles de atención para orientar la revisión del personal de máquinas, sin reemplazar los límites de seguridad, alarmas o procedimientos definidos por el fabricante. De este modo, el tablero de seguimiento se plantea como una herramienta de apoyo: permite visualizar el comportamiento de los motores, reconocer cambios sostenidos y conservar trazabilidad de los hallazgos que deben ser verificados durante la operación o en las actividades programadas de mantenimiento.

El aporte práctico de la investigación reside en demostrar que los registros habituales de una sala de máquinas pueden adquirir un valor mayor cuando se analizan de manera

sistemática. La estrategia desarrollada no parte del supuesto de disponer de una embarcación completamente digitalizada, sino de utilizar de forma ordenada la información existente y convertirla en indicadores comprensibles. Esta característica favorece su aplicación en escenarios donde la modernización integral de la instrumentación no constituye una solución inmediata, pero sí existe la posibilidad de mejorar la vigilancia del estado técnico mediante procedimientos de análisis y seguimiento.

Desde el punto de vista académico, el estudio busca aportar una aplicación concreta del mantenimiento basado en condición dentro del ámbito de los motores diésel marinos, vinculando fundamentos de confiabilidad con datos reales de operación. La investigación se distancia de una interpretación puramente estadística: las variaciones detectadas se examinan desde el funcionamiento de cada sistema y se traducen en hipótesis de verificación técnica, manteniendo la distinción entre una anomalía de proceso, un posible desplazamiento de medición y un cambio que amerita inspección. Esta forma de análisis pretende reducir dos riesgos habituales: intervenir innecesariamente un equipo por una lectura aislada o normalizar una desviación que se mantiene en el tiempo.

El trabajo se organiza en tres capítulos principales. El primero desarrolla los fundamentos del mantenimiento, el mantenimiento basado en condición, las particularidades de los motores diésel marinos, las técnicas de monitoreo, los indicadores de confiabilidad y el marco técnico aplicable. El segundo expone la metodología empleada para organizar la información, definir el objeto de estudio, procesar los registros y establecer criterios de evaluación. El tercer capítulo presenta los resultados obtenidos, interpreta los patrones observados, discute los hallazgos frente a antecedentes académicos y formula las reglas que integran la estrategia propuesta. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio, orientadas a consolidar el uso de la información operacional como soporte para la planificación del mantenimiento.

Problema de investigación

Los motores principales y auxiliares representan elementos esenciales para la propulsión, la generación de energía y el sostenimiento de los servicios que permiten operar una embarcación pesquera. En este tipo de buques, una alteración no identificada oportunamente puede afectar la continuidad de la faena de pesca y obligar a tomar decisiones bajo condiciones menos favorables que las disponibles durante una intervención planificada.

El mantenimiento aplicado a la maquinaria se apoya tradicionalmente en horas de servicio, inspecciones programadas y acciones correctivas. Aunque estos criterios siguen siendo necesarios, por sí solos no siempre muestran el estado técnico de los equipos. Los registros de presión y temperatura generados durante la operación ofrecen la posibilidad de complementar esa práctica mediante referencias de comportamiento, tendencias y reglas de seguimiento.

En consecuencia, el problema de investigación se centra en cómo transformar los parámetros operacionales de los motores principales y auxiliares en información útil para reconocer desviaciones, priorizar verificaciones y respaldar decisiones de mantenimiento de acuerdo con la condición observada.

Pregunta de investigación

¿De qué manera la implementación de una estrategia de mantenimiento basado en condición, sustentada en el análisis de parámetros operacionales, puede fortalecer la gestión del mantenimiento de los motores principales y auxiliares instalados en el B/P “ANDREA 1”?

Objeto de investigación

El proceso de mantenimiento aplicado a los motores principales y auxiliares instalados en la embarcación objeto de estudio.

Campo de acción

La implementación del mantenimiento basado en condición mediante el seguimiento, análisis e interpretación de parámetros operacionales de los motores principales y auxiliares.

Hipótesis

La implementación de una estrategia de mantenimiento basado en condición, sustentada en el comportamiento real de los parámetros operacionales, favorecerá una gestión más oportuna de los motores principales y auxiliares, al facilitar el reconocimiento de desviaciones, la priorización de inspecciones y la planificación de intervenciones antes de que una anomalía evolucione hacia una falla funcional.

Objetivo general

Implementar una estrategia de mantenimiento basado en condición en los motores principales y auxiliares instalados en el Buque Pesquero “Andrea 1”.

Variables de investigación

Variable independiente: estrategia de mantenimiento basado en condición. Variable dependiente: comportamiento técnico y desempeño operativo de los motores principales y auxiliares, expresados mediante los parámetros seleccionados y los criterios de seguimiento definidos para la estrategia.

Tareas de investigación

- Analizar el estado de la gestión de mantenimiento y la documentación técnica vinculada con los motores estudiados.
- Identificar los parámetros operacionales con mayor utilidad para caracterizar el comportamiento de cada máquina.
- Definir un procedimiento de procesamiento y comparación que permita construir referencias por estado operacional.

- Interpretar tendencias, desviaciones persistentes y eventos concurrentes a partir de los registros recopilados.

- Estructurar reglas de seguimiento y niveles de respuesta que puedan incorporarse al tablero de mantenimiento basado en condición.

Justificación De La Investigación

La aplicación de mantenimiento basado en condición a motores diésel marinos posee relevancia operativa porque orienta la atención hacia el comportamiento real de la maquinaria. En una embarcación pesquera, donde la propulsión y la generación de energía deben mantenerse disponibles durante periodos prolongados, contar con criterios de seguimiento permite reconocer cambios que podrían pasar inadvertidos si la gestión se limita exclusivamente al calendario o a las horas acumuladas.

Desde la perspectiva económica, una intervención programada ofrece mejores condiciones para organizar repuestos, mano de obra y tiempo de parada que una reparación imprevista. La estrategia propuesta busca precisamente incrementar la anticipación: utilizar tendencias y relaciones entre parámetros para priorizar verificaciones y evitar que una desviación sostenida permanezca sin análisis. La literatura sobre motores diésel marinos señala que el monitoreo de condición puede contribuir simultáneamente a la confiabilidad, la eficiencia energética y la reducción de costos cuando los datos se procesan dentro de un procedimiento técnicamente estructurado (Basurko & Uriondo, 2015).

El trabajo también tiene una justificación metodológica. Los registros que normalmente se generan en sala de máquinas pueden adquirir mayor utilidad cuando se depuran, segmentan por condición operacional y comparan con una referencia coherente. De esta manera, el aporte no depende únicamente de incorporar nuevos sensores, sino de mejorar la forma en que la información disponible se transforma en evidencia para el mantenimiento.

Finalmente, la investigación posee valor académico y profesional porque desarrolla un caso aplicado a motores principales y auxiliares de una embarcación pesquera y vincula fundamentos de mantenimiento, estadística e interpretación de variables con decisiones concretas. La estrategia obtenida puede servir como punto de partida para futuros trabajos de ampliación instrumental, análisis de aceite, vibraciones o integración con sistemas de gestión de mantenimiento.

Capítulo I

Marco Teórico

El presente capítulo desarrolla los fundamentos conceptuales, técnicos y normativos que sustentan la implementación de una estrategia de mantenimiento basado en condición en motores diésel marinos. El análisis se orienta hacia los motores principales y auxiliares empleados en embarcaciones pesqueras, sin circunscribir la explicación teórica a una unidad específica. De esta manera, se busca construir una base general que permita posteriormente caracterizar los equipos instalados, seleccionar las variables de mayor valor diagnóstico y definir criterios de intervención compatibles con el contexto operacional de la embarcación objeto de estudio.

La revisión comprende la evolución de las políticas de mantenimiento, los principios del monitoreo de condición, las particularidades funcionales de los motores diésel marinos, las técnicas de diagnóstico aplicables y los indicadores necesarios para valorar la confiabilidad y la disponibilidad. Asimismo, se examinan normas internacionales, reglas de sociedades de clasificación y antecedentes académicos en español e inglés. Este enfoque permite diferenciar una estrategia basada en evidencia de una simple recopilación de lecturas, pues el mantenimiento basado en condición exige relacionar datos, modos de falla y decisiones técnicas dentro de un procedimiento ordenado.

1.1 Conceptualización y evolución del mantenimiento

El mantenimiento puede entenderse como la combinación de acciones técnicas, administrativas y organizativas encaminadas a conservar un activo, o restituirlo, a una condición en la que pueda ejecutar la función requerida. En el ámbito naval, este concepto comprende mucho más que la reparación de componentes: incorpora planificación, administración de repuestos, documentación, capacitación de la tripulación, control de riesgos y evaluación del desempeño de los sistemas.

La evolución del mantenimiento se encuentra vinculada con el incremento de la complejidad de las máquinas y con las consecuencias económicas, ambientales y de seguridad asociadas a las fallas. Las primeras prácticas se concentraban en reparar después de la avería. Posteriormente se incorporaron tareas periódicas definidas por horas de servicio y, con el desarrollo de la instrumentación, se consolidaron estrategias predictivas y basadas en condición. Esta evolución no implica que una política moderna suprima por completo a las anteriores; en la práctica, la estrategia adecuada combina acciones correctivas, preventivas y condicionales conforme a la criticidad y al comportamiento del activo (Moubrey, 1997).

1.1.1 Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo se ejecuta después de que el equipo ha perdido total o parcialmente su capacidad funcional. Puede ser no programado, cuando la intervención debe realizarse inmediatamente a causa de una avería, o diferido, cuando la reparación puede aplazarse sin comprometer la seguridad ni la continuidad del servicio.

Esta política puede resultar admisible para componentes económicos, redundantes o cuya indisponibilidad produzca consecuencias reducidas. Sin embargo, su aplicación indiscriminada en motores principales, grupos electrógenos, bombas de circulación o equipos esenciales puede ocasionar pérdida de propulsión, interrupción del suministro eléctrico y disminución de la capacidad operativa. En una travesía alejada de puerto, la severidad del problema aumenta por la limitada disponibilidad de repuestos, personal especializado y medios externos de asistencia.

1.1.2 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo se realiza antes de que ocurra la falla, de acuerdo con intervalos determinados por tiempo calendario, horas de funcionamiento, ciclos de operación o instrucciones del fabricante. Entre sus actividades habituales se encuentran la sustitución de

filtros, el cambio del lubricante, la regulación de válvulas, la inspección de inyectores, la limpieza de intercambiadores y la comprobación de dispositivos de protección.

Su fortaleza principal reside en la posibilidad de organizar anticipadamente los recursos y reducir fallas vinculadas con mecanismos de desgaste conocidos. No obstante, el intervalo prescrito no representa siempre la condición real del componente. Motores del mismo modelo pueden degradarse a velocidades diferentes debido a la carga, la calidad del combustible, la contaminación del aceite, el régimen térmico, el historial de reparaciones y las prácticas de operación. En consecuencia, una política exclusivamente cronológica puede conducir tanto a intervenciones tardías como al reemplazo prematuro de elementos todavía utilizables.

1.1.3 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo emplea mediciones y datos históricos para evaluar la evolución del estado técnico de un equipo y anticipar la aparición de una condición anómala. La intervención deja de depender únicamente de una fecha o cantidad acumulada de horas y se sustenta en manifestaciones físicas o químicas asociadas al deterioro.

Entre las técnicas predictivas de mayor difusión se encuentran el análisis de vibraciones, la termografía infrarroja, el análisis de lubricantes, el ultrasonido, la inspección de partículas de desgaste y el seguimiento de parámetros operacionales. Mobley (2002) señala que el empleo combinado de varias técnicas ofrece una interpretación más completa que el uso aislado de una sola magnitud, ya que cada método posee sensibilidad frente a mecanismos de falla diferentes.

1.1.4 Mantenimiento basado en condición

El mantenimiento basado en condición, denominado MBC o CBM por la expresión inglesa condition-based maintenance, establece que una tarea debe ejecutarse cuando la evidencia obtenida mediante el monitoreo indica que el activo se ha deteriorado o evoluciona hacia un estado no aceptable. La Norma ISO 17359:2018 proporciona directrices generales

para organizar programas de monitoreo y diagnóstico aplicables a diferentes clases de maquinaria (International Organization for Standardization [ISO], 2018).

Es necesario distinguir entre monitoreo, diagnóstico y pronóstico. El monitoreo recopila y examina información sobre el estado del equipo; el diagnóstico identifica la naturaleza probable de la anomalía; y el pronóstico estima la evolución futura del deterioro o la vida útil remanente. Por consiguiente, la lectura de una presión o una temperatura no constituye por sí sola una estrategia de mantenimiento basado en condición. El valor debe asociarse con un régimen operacional, compararse con una referencia y conducir a una decisión documentada.

El MBC tampoco exige necesariamente algoritmos de elevada complejidad. Una implementación inicial puede fundamentarse en bitácoras, gráficas de tendencia, desviaciones respecto de una línea base, análisis periódico de aceite y límites suministrados por el fabricante. Las herramientas de aprendizaje automático adquieren utilidad cuando existe un volumen suficiente de datos confiables, contextualizados y representativos del funcionamiento normal y anormal. La ausencia de modos de falla definidos, de registros consistentes o de datos de calidad puede disminuir la validez de un modelo, aunque se utilicen técnicas computacionales avanzadas (Jimenez et al., 2020).

1.1.5 Relación entre MBC, RCM y gestión de activos

El mantenimiento centrado en confiabilidad, conocido como RCM, se orienta a preservar las funciones de los activos mediante la identificación de fallas funcionales, modos de falla, efectos y consecuencias. Dentro de este marco, el monitoreo de condición se selecciona cuando existe un parámetro capaz de advertir la degradación con suficiente anticipación para ejecutar una acción técnica. De este modo, el RCM ayuda a decidir dónde conviene aplicar MBC, mientras que el MBC aporta la información necesaria para determinar cuándo intervenir (Moubray, 1997).

La gestión de activos amplía la perspectiva al considerar el equilibrio entre desempeño, riesgo y costo durante el ciclo de vida. La Norma ISO 55001:2024 establece requisitos para un sistema de gestión de activos y resalta la toma de decisiones sustentada en información, la planificación, el conocimiento organizacional y la gestión del ciclo de vida (ISO, 2024a). En consecuencia, una estrategia MBC debe integrarse con los objetivos operacionales de la embarcación y no funcionar como una actividad aislada de la gestión técnica.

1.2 Fundamentos para implementar una estrategia basada en condición

La implementación de una estrategia basada en condición debe comenzar con la delimitación del sistema. Esto implica identificar la función de cada motor, su régimen de servicio, los sistemas auxiliares asociados, la existencia de redundancias y las consecuencias de una eventual pérdida de capacidad. En una embarcación pesquera, un motor no debe valorarse únicamente por su potencia nominal, sino por la repercusión que tendría su indisponibilidad sobre la propulsión, la generación eléctrica, la refrigeración, el gobierno, la seguridad y la continuidad de la operación.

La etapa posterior consiste en examinar la criticidad y los modos de falla. Para cada activo se determinan las fallas funcionales, sus causas probables, efectos, consecuencias y señales observables. A partir de este examen se seleccionan las técnicas y variables de monitoreo. Por ejemplo, el deterioro de la lubricación puede manifestarse mediante cambios de presión, temperatura, viscosidad, humedad, contaminación, partículas metálicas o diferencial de presión en filtros. Una combustión irregular puede reflejarse en la temperatura de gases de escape, el consumo de combustible, la presión de cilindro o el comportamiento vibratorio.

La arquitectura del programa debe ser capaz de adquirir datos, validarlos, almacenarlos, transformarlos en indicadores, identificar estados y presentar información comprensible para el personal responsable. La familia ISO 13374 establece lineamientos para el procesamiento, la comunicación y la presentación de datos de monitoreo, mientras que ISO 13379-1:2025 e ISO

13381-1:2025 desarrollan criterios para diagnóstico y pronóstico, respectivamente (ISO, 2003, 2025a, 2025b).

1.2.1 Línea base y condiciones de referencia

La línea base representa el comportamiento considerado normal para un equipo bajo condiciones determinadas. Puede construirse mediante especificaciones del fabricante, pruebas posteriores a una intervención, datos históricos confiables o mediciones efectuadas durante un periodo de funcionamiento estable.

Su formulación debe considerar la carga, la velocidad, la temperatura ambiente, la temperatura del agua de mar, la calidad del combustible y la configuración de los sistemas auxiliares. Una temperatura de gases de escape, por ejemplo, no debe compararse de forma indiscriminada entre periodos de baja y alta carga. Basurko y Uriondo (2015) utilizaron parámetros térmicos, presiones, par del eje y consumo de combustible durante más de 10 000 horas de funcionamiento para establecer referencias en motores instalados en buques, lo que evidencia la importancia de interpretar cada lectura dentro de su régimen operacional.

Los niveles de alarma tampoco deben copiarse de una tabla genérica. En primera instancia se respetan los límites y protecciones establecidos por el fabricante. Posteriormente pueden incorporarse límites estadísticos, diferencias entre cilindros, tasas de variación y patrones históricos que permitan advertir cambios antes de que se alcance una condición de disparo.

1.2.2 Monitoreo en línea y fuera de línea

El monitoreo en línea utiliza sensores instalados permanentemente y permite adquirir información de manera continua o en intervalos breves. Es apropiado para magnitudes susceptibles de cambiar con rapidez o para equipos cuya falla produciría consecuencias severas. Las presiones de lubricación y combustible, las temperaturas de refrigeración y

escape, las revoluciones, la carga y los niveles de fluidos suelen formar parte de la instrumentación fija del motor.

El monitoreo fuera de línea se realiza mediante inspecciones o mediciones periódicas con equipos portátiles. El análisis de aceite, la termografía, el ultrasonido y determinadas mediciones de vibración pueden efectuarse con frecuencias semanales, mensuales o trimestrales, de acuerdo con la criticidad y la velocidad esperada de degradación. Esta modalidad requiere una inversión inicial menor y puede resultar particularmente adecuada en embarcaciones con instrumentación antigua o limitada capacidad de almacenamiento digital.

Ambas modalidades son complementarias. Las mediciones en línea permiten observar eventos transitorios y cambios súbitos, mientras que las técnicas fuera de línea aportan información que no siempre se obtiene mediante los sensores instalados. La selección debe responder al modo de falla que se desea detectar y no solamente a la disponibilidad o novedad del instrumento.

1.2.3 Calidad, integridad y trazabilidad de los datos

La confiabilidad de una estrategia MBC depende de la calidad de la información. Las lecturas deben poseer unidades definidas, fecha y hora, identificación del equipo, punto de medición y contexto de carga. También se requiere controlar errores de transcripción, cambios de instrumentos, valores faltantes y registros producidos durante arranque, parada o maniobras que no sean comparables con el funcionamiento estable.

La trazabilidad facilita reconstruir el comportamiento del equipo y verificar qué decisión se tomó ante una desviación. Por ello, las bitácoras deben relacionarse con órdenes de trabajo, resultados de laboratorio, reparaciones, sustituciones de componentes y observaciones de la tripulación. Sin esta relación, los datos pueden describir que ocurrió un cambio, pero difícilmente permiten comprobar su causa o valorar la efectividad de la intervención.

1.3 Motores diésel marinos principales y auxiliares

El motor diésel mantiene una posición predominante en la propulsión y la generación eléctrica naval por su eficiencia térmica, robustez, densidad de potencia y capacidad para operar durante periodos prolongados. En términos funcionales, el motor principal entrega la potencia destinada al desplazamiento del buque, directamente o mediante un reductor y una línea de ejes. Los motores auxiliares accionan normalmente generadores eléctricos y, según la disposición de la embarcación, pueden abastecer bombas, sistemas hidráulicos y otros servicios.

Aunque su finalidad sea distinta, ambos tipos de motores comparten sistemas fundamentales: alimentación e inyección de combustible, lubricación, refrigeración, admisión de aire, sobrealimentación, escape, arranque, regulación y dispositivos de seguridad. Una estrategia basada en condición debe examinarlos como conjuntos interrelacionados. Una elevada temperatura de escape puede asociarse con inyección deficiente, restricción de aire, alteración del turbocompresor, enfriamiento insuficiente o deterioro mecánico del cilindro; por ello, una variable aislada rara vez permite establecer un diagnóstico concluyente.

1.3.1 Contexto operacional de una embarcación pesquera

Los motores de las embarcaciones pesqueras están sometidos a un contexto operacional variable. Durante una travesía pueden alternarse navegación, búsqueda, maniobra, operación de equipos de pesca, periodos de espera y funcionamiento a carga parcial. Estas transiciones modifican las solicitaciones térmicas y mecánicas, así como el consumo de combustible y el comportamiento de los sistemas auxiliares.

La interpretación de los datos debe diferenciar el régimen de operación. Comparar una lectura tomada en ralentí con otra obtenida durante carga elevada puede generar una falsa anomalía. Por esta razón, la clasificación de los registros por revoluciones, potencia, condición de mar o fase de operación constituye un requisito para construir tendencias consistentes. Las

investigaciones en motores de buques pesqueros muestran que es posible implantar soluciones de costo moderado aprovechando sensores disponibles y parámetros ya registrados, siempre que se establezca una estrategia coherente de adquisición y comparación (Basurko & Uriondo, 2015).

1.3.2 Modos de falla de interés

Los modos de falla que deben considerarse dependen del diseño, la antigüedad, el régimen de servicio y el historial de cada motor. De forma general, pueden agruparse en los siguientes conjuntos:

Pérdida de presión o capacidad de lubricación por desgaste de bombas, fugas, obstrucción de filtros, degradación del aceite o aumento de holguras.

Sobrecalentamiento por reducción de caudal, incrustaciones, obstrucción de intercambiadores, fallas de termostatos o deterioro de bombas de refrigeración.

Combustión deficiente por inyectores deteriorados, suministro irregular, baja presión, contaminación del combustible o insuficiencia de aire.

Desgaste de cojinetes, camisas, anillos y mecanismos de válvulas, manifestado mediante partículas, vibración, ruido, consumo de lubricante o pérdida de rendimiento.

Defectos del turbocompresor asociados con contaminación, desequilibrio, desgaste de cojinetes, fugas y elevación de temperatura.

Fallas de sensores, cableado, indicadores, sistemas de alarma o protección que impiden representar correctamente la condición real del motor.

La identificación previa de estos modos permite seleccionar parámetros sensibles y evitar la instalación indiscriminada de sensores. Las guías de clasificación también recomiendan vincular cada técnica con una falla potencial y con el intervalo disponible entre la detección y la pérdida funcional (American Bureau of Shipping [ABS], 2023).

1.4 Técnicas de monitoreo de condición

La selección de técnicas debe responder a la criticidad, a los modos de falla y a la capacidad de intervención disponible. Ninguna técnica permite detectar todas las formas de deterioro; por ello, la integración de señales operacionales, vibración, lubricantes, temperatura e inspección física produce una evaluación más consistente.

1.4.1 Seguimiento de parámetros operacionales

El seguimiento de parámetros operacionales constituye la alternativa de acceso más inmediato para motores que ya disponen de instrumentos analógicos, sensores electrónicos o sistemas de alarma. La utilidad diagnóstica no reside solamente en comprobar si una lectura permanece dentro de un intervalo, sino en observar tendencias, diferencias entre cilindros, rapidez de cambio y relaciones entre variables.

Las variables de mayor interés suelen comprender presión y temperatura del aceite lubricante; temperatura y presión del refrigerante; presión y temperatura del aire de admisión; presión de sobrealimentación; temperatura de gases de escape por cilindro; velocidad de giro; carga; consumo y presión de combustible; diferencial de presión en filtros; niveles de fluidos; y horas de funcionamiento.

Una reducción progresiva de la presión acompañada por aumento de la temperatura del aceite tiene mayor significado que una lectura aislada, pues puede indicar modificación de viscosidad, holguras, caudal o capacidad de enfriamiento. Del mismo modo, la dispersión de temperaturas de escape entre cilindros puede ser más reveladora que el valor promedio del conjunto.

Zambrano-Ascencio y Pérez-Guerrero (2021) identificaron en una muestra de buques atuneros una utilización frecuente de variables como presión de aceite, presión y consumo de combustible y temperaturas de los sistemas de enfriamiento. También observaron una dependencia considerable de registros físicos y una aplicación limitada del análisis posterior.

Este antecedente respalda la conveniencia de aprovechar la información ya disponible antes de proponer una instrumentación extensa.

1.4.2 Análisis de vibraciones

El análisis de vibraciones examina el comportamiento dinámico de la maquinaria y puede contribuir a detectar desequilibrio, desalineación, holguras, defectos de rodamientos, alteraciones de engranajes y determinadas irregularidades de combustión. En un motor alternativo, la señal es compleja porque combina excitaciones de combustión, movimiento de pistones y bielas, fuerzas de inercia y transmisión estructural.

La Norma ISO 10816-6:1995 establece condiciones para medir y evaluar vibraciones en partes no rotativas de máquinas alternativas con potencia superior a 100 kW e incluye como ejemplos motores de propulsión marina y motores de grupos electrógenos (ISO, 1995). Sin embargo, su aplicación exige considerar potencia, tipo de soporte, banda de frecuencia, punto de medición y condición de carga. Por esta razón, no es técnicamente apropiado adoptar un único valor de velocidad RMS como límite universal para cualquier motor.

El criterio de mayor solidez consiste en comparar mediciones repetidas tomadas en puntos, direcciones y condiciones operacionales equivalentes. Los cambios de amplitud, forma de onda o contenido frecuencial pueden advertir una modificación de la condición, pero el diagnóstico debe contrastarse con temperaturas, presiones, análisis de aceite e inspecciones.

1.4.3 Análisis del aceite lubricante

El lubricante circula por superficies sometidas a fricción y constituye una fuente de información sobre la condición interna del motor. Su evaluación puede incluir viscosidad, contenido de agua, dilución por combustible, oxidación, reserva alcalina, contaminación, número y tamaño de partículas y concentración de elementos de desgaste.

La Norma ISO 14830-1:2019 establece requisitos y orientaciones para el monitoreo y diagnóstico basado en tribología, incluyendo el análisis de aceites lubricantes, fluidos

hidráulicos y grasas (ISO, 2019a). Los resultados deben interpretarse mediante tendencias y relaciones entre elementos, no únicamente a partir de una cifra aislada expresada en partes por millón.

La concentración metálica depende del diseño del motor, volumen de aceite, horas de servicio, reposiciones, consumo y técnica analítica. Por ello, no resulta metodológicamente correcto establecer un límite universal de hierro, aluminio o cromo para todos los motores. La línea base individual y los criterios del laboratorio constituyen referencias más apropiadas.

1.4.4 Termografía infrarroja

La termografía infrarroja permite registrar la distribución superficial de temperaturas sin contacto directo. En una sala de máquinas puede utilizarse para localizar conexiones eléctricas recalentadas, aislamiento deteriorado, diferencias térmicas en tuberías, intercambiadores obstruidos, rodamientos calientes y variaciones entre colectores o cilindros.

La Norma ISO 18434-1:2008 establece procedimientos generales para el uso de termografía en monitoreo de condición, mientras que ISO 18434-2:2019 orienta la interpretación de termogramas y la evaluación de anomalías (ISO, 2008, 2019b). La lectura exige considerar emisividad, temperatura reflejada, distancia, ángulo de observación, carga y condiciones ambientales. Sin la corrección de estos factores, la imagen puede inducir a conclusiones erróneas.

1.4.5 Ultrasonido e inspección acústica

Las técnicas ultrasónicas pueden aplicarse a la detección de fugas de aire o gases, comprobación de trampas, inspección de válvulas y medición de espesor en tuberías y componentes. En los sistemas asociados a motores marinos, la medición de espesores resulta útil para evaluar pérdidas en líneas de agua de mar, escape, combustible o lubricación.

Los valores admisibles de pérdida no deben fijarse de forma genérica. Es necesario comparar el espesor medido con el espesor nominal, la tolerancia de fabricación, las reglas de

clasificación y la función del componente. La inspección acústica también puede complementar la evaluación de inyectores, rodamientos y fugas, aunque su interpretación requiere personal entrenado y repetibilidad en el punto de medición.

1.4.6 Análisis del rendimiento del motor

El análisis de rendimiento relaciona el consumo de combustible, la potencia, las revoluciones, la presión de admisión y las temperaturas de escape con el estado del motor. Una disminución de potencia para un consumo equivalente, o un incremento del consumo para una carga comparable, puede revelar deterioro de la combustión, pérdida de compresión, restricción de aire o problemas de inyección.

Castresana Larrauri (2022) estudió metodologías de modelado para diagnosis y mantenimiento de motores diésel marinos, utilizando miles de horas de operación para caracterizar el funcionamiento considerado correcto. Este tipo de enfoque demuestra que el desempeño normal debe definirse antes de atribuir una desviación a una falla. En embarcaciones con datos limitados, pueden emplearse modelos simplificados basados en tendencias y relaciones entre variables, sin necesidad de desarrollar inicialmente un gemelo digital completo.

1.5 Procesamiento e interpretación de la información

Una estrategia basada en condición debe transformar lecturas dispersas en información técnicamente interpretable. La primera fase incluye validación de unidades, identificación de valores faltantes, eliminación de errores manifiestos y asociación de cada registro con la carga, las revoluciones y las horas acumuladas. Los datos de arranque, parada y maniobra deben diferenciarse de los datos obtenidos durante operación estable.

Posteriormente pueden aplicarse medidas de tendencia central y dispersión, como media, mediana, rango, desviación estándar y coeficiente de variación. Estas herramientas permiten caracterizar la estabilidad de un parámetro, pero no sustituyen los límites funcionales

del fabricante. Una desviación estadísticamente inusual no siempre representa una falla, así como una lectura dentro del límite de alarma puede mostrar una tendencia progresivamente desfavorable.

1.5.1 Desviación respecto de la referencia

Una expresión útil para comparar el valor observado con una referencia correspondiente al mismo régimen operacional es la desviación porcentual:

$$D_i = [(x_i - x_{ref}) / x_{ref}] * 100$$

donde D_i representa la desviación porcentual, x_i el valor observado y x_{ref} el valor de referencia. Esta relación facilita comparar variables de magnitudes diferentes, aunque la selección de la referencia debe justificarse mediante manuales, pruebas o datos históricos estables.

1.5.2 Detección estadística de observaciones inusuales

Cuando existe una muestra histórica representativa del funcionamiento estable, puede emplearse un valor normalizado:

$$z_i = (x_i - \mu) / \sigma$$

donde μ es la media histórica y σ la desviación estándar. El indicador permite reconocer valores alejados del comportamiento habitual, pero debe interpretarse junto con el conocimiento técnico, el régimen de carga y otras variables. Una alarma estadística constituye una señal de revisión, no un diagnóstico definitivo.

1.5.3 Diagnóstico, pronóstico y apoyo a la decisión

El diagnóstico busca relacionar síntomas con causas probables. Para ello puede emplearse una matriz en la que cada modo de falla se vincule con parámetros, técnicas complementarias y acciones de verificación. Una disminución de presión de aceite, por ejemplo, puede asociarse con bajo nivel, pérdida de viscosidad, desgaste de la bomba,

obstrucción de aspiración, aumento de holguras o error del sensor. La acción no debe limitarse a cambiar el aceite sin comprobar las demás causas plausibles.

El pronóstico pretende estimar la evolución futura de la degradación. En una implementación básica puede consistir en calcular la pendiente de una tendencia y proyectar cuándo alcanzaría un umbral. En sistemas avanzados pueden emplearse modelos físicos, redes neuronales o métodos híbridos. ISO 13381-1:2025 advierte que el proceso de pronóstico debe documentar datos, supuestos, incertidumbre, limitaciones y nivel de confianza (ISO, 2025b).

El resultado final debe traducirse en una decisión: continuar en servicio, aumentar la frecuencia de medición, efectuar una prueba confirmatoria, programar una intervención, limitar la carga o detener el equipo. Jimenez et al. (2020) y Karatuğ y Arslanoğlu (2022) coinciden en que la utilidad del modelo depende de su relación con los modos de falla y con acciones que el operador pueda ejecutar.

1.6 Confiabilidad, disponibilidad e indicadores de mantenimiento

La confiabilidad expresa la probabilidad de que un activo cumpla una función durante un periodo y bajo condiciones definidas. La disponibilidad representa la proporción de tiempo en que el equipo se encuentra apto para operar. Ambos conceptos requieren registros consistentes de horas de funcionamiento, fallas, reparaciones y tiempos de indisponibilidad.

La Norma ISO 14224:2016 proporciona una taxonomía para recopilar datos de confiabilidad y mantenimiento. Su ámbito formal corresponde a las industrias petrolera, petroquímica y de gas natural; sin embargo, su estructura puede emplearse como referencia metodológica para organizar información de equipos reparables, siempre que se adapte al contexto marítimo (ISO, 2016).

1.6.1 Tiempo medio entre fallas

El tiempo medio entre fallas, MTBF, relaciona las horas de funcionamiento con el número de fallas registradas:

$$MTBF = (Horas\ totales\ de\ funcionamiento)/(Numero\ de\ fallas)$$

Su aumento puede sugerir una mejora de confiabilidad, siempre que exista un criterio uniforme para definir y registrar las fallas.

1.6.2 Tiempo medio de reparación

El tiempo medio de reparación, MTTR, expresa la duración promedio de las intervenciones correctivas:

$$MTTR = (Tiempo\ total\ empleado\ en\ reparaciones)/(Numero\ de\ reparaciones)$$

Este indicador se encuentra influido por la mantenibilidad del diseño, la disponibilidad de repuestos, la competencia del personal, el acceso al componente y la calidad de la planificación.

1.6.3 Disponibilidad inherente

Para un sistema reparable, una aproximación de la disponibilidad inherente es:

$$A = MTBF / (MTBF + MTTR)$$

La expresión no incorpora todos los tiempos logísticos ni administrativos, pero permite relacionar frecuencia de fallas y rapidez de reparación. Para una evaluación operacional conviene incluir espera de repuestos, tiempos de movilización, permisos y otras demoras reales.

1.6.4 Indicadores complementarios

La estrategia puede evaluarse además mediante la proporción de tareas ejecutadas a tiempo, cantidad de fallas repetitivas, consumo de repuestos, horas de mantenimiento, costo por intervención, porcentaje de alarmas confirmadas y tiempo transcurrido desde la detección

hasta la acción. Estos indicadores permiten determinar si el programa genera decisiones útiles o solamente incrementa el volumen de datos.

1.7 Marco normativo y técnico

La aplicación del mantenimiento en una embarcación debe relacionarse con los requisitos de seguridad operacional, prevención de la contaminación, reglas de la administración y disposiciones de clasificación que correspondan. Las normas ISO aportan procedimientos técnicos, pero no reemplazan las instrucciones del fabricante, los reglamentos de bandera ni las reglas de la sociedad clasificadora.

El Código Internacional de Gestión de la Seguridad, incorporado mediante el capítulo IX de SOLAS para los buques a los que resulta aplicable, establece la necesidad de un sistema de gestión de seguridad y de procedimientos para mantener el buque y sus equipos conforme a las normas pertinentes (International Maritime Organization [IMO], s. f.). En el caso de embarcaciones pesqueras, el Fishing Safety Management Code 2023 proporciona una guía armonizada para la gestión segura y la prevención de la contaminación, aunque su aplicación concreta depende de la administración y del régimen jurídico del buque (IMO, 2023).

Tabla 1

Normas y documentos técnicos de interés para la estrategia MBC

Documento	Aplicación dentro de la investigación
ISO 17359:2018	Directrices generales para establecer el programa de monitoreo de condición.
ISO 13374-1:2003	Arquitectura general para procesamiento, comunicación y presentación de datos.
ISO 13379-1:2025	Interpretación de datos y desarrollo de procedimientos de diagnóstico.
ISO 13381-1:2025	Desarrollo y aplicación de procesos de pronóstico.
ISO 14830-1:2019	Monitoreo y diagnóstico basado en tribología y análisis de lubricantes.
ISO 18434-1:2008 e ISO 18434-2:2019	Procedimientos e interpretación de termografía infrarroja.
ISO 10816-6:1995	Medición y evaluación de vibración en máquinas alternativas de potencia superior a 100 kW.
ISO 14224:2016	Referencia metodológica para estructurar datos de confiabilidad y mantenimiento.
ISO 55001:2024	Integración del mantenimiento con la gestión de activos, riesgo, desempeño y costo.

Documento	Aplicación dentro de la investigación
ABS Guide, 2023	Criterios de confiabilidad, RCM, monitoreo, modos de falla y técnicas aplicables a maquinaria naval.
Bureau Veritas NI684, 2024	Orientaciones para implementar esquemas CBM y diseñar sistemas de monitoreo a bordo.

Nota. La aplicabilidad obligatoria de cada documento debe verificarse según la administración marítima, la clasificación, las características del buque y las instrucciones del fabricante.

1.7.1 Reglas de sociedades de clasificación

Las sociedades de clasificación han desarrollado procedimientos para reconocer programas de mantenimiento apoyados en confiabilidad y condición. ABS dispone de una guía que relaciona criticidad, RCM, bases de datos de falla, análisis de aceite, termografía, vibración y otras técnicas con los programas de inspección de maquinaria (ABS, 2023).

Bureau Veritas publicó la guía NI684 en julio de 2024, destinada a orientar la implementación de esquemas CBM a bordo y el diseño de sistemas de monitoreo de condición (Bureau Veritas, 2024). Estas reglas no deben presentarse como obligatorias para toda embarcación, ya que su empleo depende de la sociedad de clasificación, las notaciones asignadas y la aceptación de la administración correspondiente.

1.8 Antecedentes investigativos

1.8.1 Estudios internacionales

Basurko y Uriondo (2015) desarrollaron una estrategia para motores diésel de velocidad media instalados en buques en operación. El estudio utilizó parámetros adquiridos durante más de 10 000 horas y demostró la viabilidad de un sistema asequible para embarcaciones pesqueras, fundamentado en modelado del rendimiento y detección de condiciones anormales.

Lazakis et al. (2018) combinaron herramientas de confiabilidad con redes neuronales para estimar la condición de sistemas de maquinaria naval. Los autores evidenciaron que el mantenimiento basado en condición puede complementar al mantenimiento programado y mejorar la oportunidad de las intervenciones cuando los modos de falla y los datos se encuentran adecuadamente estructurados.

Jimenez et al. (2020) analizaron información procedente de sensores de maquinaria naval y propusieron una secuencia para desarrollar mantenimiento predictivo. El trabajo resalta que, antes de entrenar un modelo, deben definirse la criticidad, los modos de falla y la correspondencia entre anomalías, registros de mantenimiento y condición real.

Karatuğ y Arslanoğlu (2022) propusieron una estrategia para el diagnóstico de motores de buques mediante redes neuronales y análisis de modos y efectos de falla. Su investigación confirma que el valor de un modelo depende no solo de la precisión matemática, sino de la posibilidad de convertir sus resultados en decisiones comprensibles para el personal de máquinas.

1.8.2 Estudios en español y antecedentes regionales

Castresana Larrauri (2022) estudió metodologías de modelado de motores diésel marinos para su diagnosis y mantenimiento basado en condiciones. El trabajo procesó un volumen extenso de datos operacionales y examinó la capacidad de diferentes modelos para representar el funcionamiento correcto y detectar desviaciones.

En el contexto ecuatoriano, Zambrano-Ascencio y Pérez-Guerrero (2021) caracterizaron el estado de aplicación de técnicas predictivas en una muestra de embarcaciones atuneras que operaban en el Pacífico Oriental. La investigación identificó una fuerte dependencia de registros manuales, diferencias en las variables anotadas y una limitada utilización de los datos para decisiones predictivas.

Este antecedente es relevante porque demuestra que la principal restricción no es siempre la ausencia absoluta de información. En numerosas embarcaciones existen presiones, temperaturas, consumos y horas de funcionamiento registrados; el problema radica en la falta de depuración, contextualización, análisis y criterios de actuación. Por tanto, una estrategia escalonada puede comenzar con los datos disponibles y ampliar la instrumentación únicamente donde el análisis de criticidad lo justifique.

1.9 Vacío de conocimiento y síntesis del marco teórico

La literatura internacional ha avanzado hacia plataformas de monitoreo continuo, modelos de diagnóstico y pronóstico, sistemas de apoyo a la decisión y herramientas de inteligencia artificial. Sin embargo, una parte importante de estas propuestas presupone la existencia de sensores digitales, grandes volúmenes de datos, registros de falla normalizados y conectividad estable.

Existe menor desarrollo de procedimientos asequibles para embarcaciones pesqueras con motores de distintas generaciones, instrumentación heterogénea, bitácoras parcialmente manuales y restricciones para instalar plataformas permanentes. En este escenario, el vacío no consiste únicamente en seleccionar una tecnología, sino en establecer un método que transforme registros operacionales en información de condición, defina referencias por régimen de carga, integre técnicas periódicas y genere criterios de intervención aplicables a bordo.

La revisión permite concluir que el mantenimiento basado en condición constituye una estrategia sustentada en la observación sistemática del estado técnico. Su implementación requiere delimitar funciones, identificar modos de falla, seleccionar parámetros sensibles, construir líneas base, asegurar la calidad de los registros y definir reglas de decisión. Ninguna técnica aislada permite diagnosticar todos los mecanismos de deterioro; la integración de parámetros operacionales, análisis de lubricante, vibraciones, termografía e inspección técnica ofrece una apreciación más consistente.

Para la investigación propuesta, la alternativa técnicamente razonable consiste en aprovechar la instrumentación existente, completar las variables de mayor valor diagnóstico y organizar los registros en un procedimiento de análisis periódico. La estrategia deberá relacionar la condición observada con acciones concretas de mantenimiento, evitando tanto la sustitución prematura de componentes como la permanencia en servicio de equipos que presentan una tendencia de deterioro comprobable.

Capítulo II

Marco Metodológico

El presente capítulo establece la ruta metodológica para diseñar, aplicar y evaluar una estrategia de mantenimiento basado en condición en los motores diésel principales y auxiliares de la embarcación seleccionada como caso de estudio. La propuesta se estructura de manera progresiva: inicia con el diagnóstico de la gestión existente, continúa con la identificación de los equipos y modos de falla relevantes, define un plan de monitoreo compatible con la instrumentación disponible y culmina con la implementación piloto y la valoración de sus resultados.

La metodología no reproduce de forma literal el procedimiento utilizado en investigaciones precedentes. Se retoman únicamente sus aportes generales —revisión de bitácoras, clasificación de variables y análisis de datos operacionales— y se los reorganiza para responder al propósito específico de implementar una estrategia en una sola embarcación. La secuencia se apoya en el estudio de caso, la integración de evidencia cuantitativa y cualitativa, y las directrices de la Norma ISO 17359:2018 para el establecimiento de programas de monitoreo de condición (International Organization for Standardization [ISO], 2018).

Por tratarse de una investigación aplicada a maquinaria en servicio, no se indujeron fallas ni se modificaron los sistemas de protección del motor. Los datos se obtuvieron durante condiciones normales de operación, paradas programadas y actividades de mantenimiento autorizadas. Cualquier recomendación derivada del análisis queda subordinada a los manuales del fabricante, a los procedimientos de seguridad de la embarcación y al criterio del jefe de máquinas.

2.1 Enfoque, tipo y diseño de la investigación

La investigación adoptó un enfoque mixto con predominio cuantitativo. El componente cuantitativo se concentró en el registro y análisis de variables físicas de los motores, horas de

funcionamiento, fallas, tiempos de intervención e indicadores de disponibilidad. El componente cualitativo permitió comprender cómo se registran los datos, qué criterios utiliza el personal para decidir una intervención y cuáles son las limitaciones operativas que pueden afectar la aplicación de la estrategia. La integración de ambos tipos de evidencia evita interpretar las lecturas de los sensores sin considerar la experiencia del personal y el contexto de servicio. Creswell y Creswell (2018) sostienen que los métodos mixtos resultan pertinentes cuando la comprensión de un problema requiere vincular resultados numéricos con información contextual.

Por su finalidad, el estudio fue aplicado y de desarrollo tecnológico, debido a que respondió a una necesidad concreta de mantenimiento mediante un procedimiento utilizable a bordo. En cuanto a su alcance, fue descriptivo, diagnóstico y evaluativo: describió los motores y la gestión vigente; diagnosticó la condición mediante registros históricos y mediciones; y valoró el desempeño de la estrategia después de su implementación.

El diseño se organizó en dos momentos complementarios. La fase diagnóstica fue no experimental, documental y de campo, puesto que se observaron las variables sin provocar alteraciones deliberadas en el funcionamiento de los equipos. La fase de implementación se abordó como una intervención preexperimental de un solo caso, con comparación antes-después cuando existió información comparable. Esta comparación no buscó atribuir causalidad absoluta, sino determinar si la estrategia mejoró la calidad de los registros, la oportunidad de las alertas y determinados indicadores de mantenimiento dentro del periodo estudiado.

La dimensión temporal fue longitudinal. Los registros se organizaron a lo largo del periodo operacional disponible, procurando diferenciar navegación, maniobra, faena, carga parcial, parada y permanencia en puerto cuando esa condición pudo reconocerse en la serie. Los registros históricos se utilizaron como referencia retrospectiva, mientras que la captura

posterior permitió observar la evolución de los parámetros bajo un procedimiento estandarizado.

Tabla 2

Síntesis del diseño metodológico

Componente	Definición adoptada	Aplicación en el estudio
Enfoque	Mixto con predominio cuantitativo	Integra parámetros técnicos, registros de mantenimiento y apreciaciones del personal.
Finalidad	Aplicada y de desarrollo tecnológico	Diseña e implementa una estrategia susceptible de uso operativo.
Alcance	Descriptivo, diagnóstico y evaluativo	Caracteriza, identifica desviaciones y valora la utilidad de la intervención.
Diseño	Estudio de caso; fase diagnóstica no experimental y fase piloto preexperimental	Se trabaja con una embarcación y se comparan indicadores cuando los datos lo permitan.
Temporalidad	Longitudinal, con apoyo retrospectivo	Analiza registros históricos y la evolución de las mediciones a lo largo del periodo observado.
Entorno	Documental y de campo	Utiliza manuales, bitácoras, inspección a bordo y mediciones autorizadas.

Nota. La fase piloto no sustituye una prueba experimental controlada; su propósito es verificar la factibilidad y utilidad de la estrategia dentro del caso estudiado.

2.2 Método general de estudio

El método rector fue el estudio de caso técnico, ya que la investigación examina con profundidad una unidad operacional delimitada y sus motores instalados. Esta elección facilita relacionar los parámetros de condición con el historial de mantenimiento, las características constructivas, el régimen de trabajo y las decisiones adoptadas por la tripulación. La literatura sobre mantenimiento de maquinaria naval muestra que los modelos desarrollados con datos reales deben conservar la información del régimen operacional y de los eventos de mantenimiento para evitar diagnósticos descontextualizados (Basurko & Uriondo, 2015; Jimenez et al., 2020).

De manera complementaria se emplearon los métodos analítico-sintético, inductivo-deductivo y sistémico. El análisis permitió descomponer cada motor en sistemas funcionales y modos de falla; la síntesis integró las variables en indicadores de condición; la inducción sirvió para reconocer patrones a partir de observaciones repetidas; la deducción contrastó dichos

patrones con límites del fabricante y criterios técnicos; y el enfoque sistémico permitió examinar la interacción entre combustible, lubricación, refrigeración, admisión, escape, control y carga.

Figura 1

Secuencia metodológica para la implementación de la estrategia MBC



Nota. El proceso es iterativo. Las frecuencias, límites y variables pueden ajustarse cuando la evidencia demuestre que una medición no aporta valor diagnóstico o que un modo de falla requiere mayor vigilancia.

2.3 Delimitación del objeto, unidad de análisis, población y muestra

2.3.1 Objeto y campo de estudio

El objeto de estudio estuvo constituido por la gestión del mantenimiento de los motores diésel instalados a bordo. El campo de investigación se concentró en la aplicación del mantenimiento basado en condición como mecanismo para vigilar el estado técnico, sustentar decisiones de intervención y mejorar la trazabilidad de los registros.

La embarcación se identificó por su nombre únicamente en la portada, la delimitación del caso y las secciones donde sea indispensable distinguirla. En tablas de medición y análisis se utilizaron códigos alfanuméricos para los motores, por ejemplo MP-01 para motor principal y MA-01 para motor auxiliar. Esta codificación reduce la exposición innecesaria de información comercial y permite organizar los datos de forma uniforme.

2.3.2 Unidad de análisis

La unidad primaria de análisis fue cada motor principal o auxiliar incluido en la investigación. Como unidades secundarias se consideraron sus sistemas de lubricación, refrigeración, combustible, admisión de aire, sobrealimentación, escape, arranque, control y protección. Las observaciones se registraron por motor, sistema, punto de medición, fecha, hora y condición de carga.

2.3.3 Población y muestra

La población estuvo formada por la totalidad de los motores principales y auxiliares que se encontraron operativos y accesibles durante el periodo de trabajo. Debido a que el número de equipos es reducido y todos intervienen en funciones esenciales de propulsión o generación, se aplicó un muestreo censal. Por consiguiente, la muestra técnica coincidió con la población de motores que cumplieron los criterios de inclusión.

Los informantes estuvieron constituidos por el personal que participa directamente en la operación y mantenimiento: jefe de máquinas, oficiales o ingenieros de guardia, mecánicos y, cuando existió disponibilidad, responsable técnico en tierra. Su selección fue intencional, porque se requirió experiencia directa con los equipos y acceso a los registros.

2.3.4 Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyó los motores que cumplan las siguientes condiciones:

- Encontrarse instalados y destinados a propulsión, generación eléctrica o servicio auxiliar relevante.
- Contar con acceso autorizado a la placa de identificación, manuales, bitácoras o registros de mantenimiento.
- Disponer de variables medibles mediante instrumentación fija o equipos portátiles sin alterar la seguridad operacional.
- Presentar un periodo de funcionamiento suficiente para construir una referencia o, en su defecto, permitir una caracterización inicial documentada.

Se excluyeron mediciones tomadas durante fallas de sensores no verificadas, pruebas sin registro del régimen de carga, periodos con intervención simultánea no documentada o situaciones en las que la medición pueda exponer al personal o al equipo a un riesgo. Las lecturas excluidas no se eliminaron sin dejar constancia; se marcaron como no válidas y se conservó la razón de su rechazo.

2.4 Variables y categorías de análisis

La variable de intervención fue la estrategia de mantenimiento basado en condición. Esta se entendió como un conjunto ordenado de actividades para seleccionar equipos críticos, capturar datos, validar mediciones, interpretar tendencias, emitir alertas, ejecutar acciones y retroalimentar el programa. La variable de resultado fue el desempeño técnico y de

mantenimiento de los motores, expresado mediante condición operacional, confiabilidad, disponibilidad, oportunidad de detección y calidad documental.

Dado que la investigación incorpora información cualitativa, también se utilizaron categorías vinculadas con la cultura de registro, el uso de los datos, la comunicación entre guardias, la disponibilidad de instrumentos y la percepción de factibilidad. Estas categorías no sustituyen a los indicadores técnicos; permiten explicar por qué una estrategia puede funcionar o fracasar aun cuando existan sensores suficientes.

Tabla 3

Operacionalización de la estrategia de mantenimiento basado en condición

Dimensión	Definición operativa	Indicadores	Instrumento	Escala
Planificación	Definición de alcance y responsabilidades	Motores inventariados; documentos disponibles; responsables designados	Ficha de inventario y revisión documental	Nominal / porcentaje
Análisis de riesgo	Priorización por función y consecuencia	Criticidad; modos de falla identificados; NPR o categoría de riesgo	Matriz de criticidad y AMEF	Ordinal / índice
Monitoreo	Obtención repetible de variables	Cobertura de puntos; frecuencia cumplida; datos válidos	Hoja de ruta y registro de parámetros	Razón / porcentaje
Procesamiento	Conversión de lecturas en indicadores	Tendencia; desviación; dispersión; alarmas generadas	Base de datos y hoja de cálculo	Razón
Decisión	Respuesta ante desviaciones	Tiempo de verificación; acción sugerida; orden de trabajo	Registro de alertas y acciones	Tiempo / nominal
Mejora continua	Revisión periódica del sistema	Alertas confirmadas; falsas alarmas; ajustes realizados	Acta de revisión del programa	Conteo / porcentaje

Nota. AMEF: análisis de modos y efectos de falla. NPR: número de prioridad de riesgo. Los indicadores definitivos se ajustaron a la información realmente disponible a bordo.

Tabla 4

Operacionalización del desempeño técnico y de mantenimiento

Dimensión	Indicadores principales	Fuente o instrumento	Expresión
Condición operacional	Presión y temperatura de lubricación; refrigerante; gases de escape; carga; vibración; condición del aceite	Sensores existentes, instrumentos portátiles y análisis de laboratorio	Unidades físicas y desviación respecto a referencia
Confiabilidad	Horas de funcionamiento y cantidad de fallas funcionales	Historial de fallas y bitácoras	MTBF, tasa de fallas
Mantenibilidad	Duración de reparaciones y recursos requeridos	Órdenes de trabajo y entrevistas	MTTR, horas-hombre
Disponibilidad	Tiempo apto para servicio respecto al tiempo requerido	Historial operacional	Porcentaje
Calidad documental	Registros completos, legibles y asociados a régimen de carga	Lista de verificación	Porcentaje de cumplimiento

Dimensión	Indicadores principales	Fuente o instrumento	Expresión
Oportunidad de respuesta	Tiempo entre detección, verificación y acción	Registro de alertas	Horas o días
Eficacia de alertas	Alertas confirmadas, descartadas y repetitivas	Matriz de seguimiento	Porcentaje y conteo

Nota. Los valores nominales y límites de seguridad no se establecieron mediante cifras genéricas. Se tomaron de manuales del fabricante, sistemas de protección, reglas aplicables y línea base del motor.

2.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

2.5.1 Revisión documental

La revisión documental permitió reconstruir el comportamiento de los motores antes de la intervención. Se examinaron bitácoras de máquinas, hojas de guardia, planes preventivos, órdenes de trabajo, reportes de avería, consumo de repuestos, análisis de aceite, informes de inspección y manuales del fabricante. El antecedente ecuatoriano revisado evidenció que una parte importante de la información de las embarcaciones pesqueras se conserva en registros físicos y que su potencial predictivo suele desaprovecharse cuando no se procesan las tendencias (Zambrano-Ascencio & Pérez-Guerrero, 2021).

La información se transcribió mediante una ficha de revisión documental. Cada dato conservó la referencia del documento original, fecha, motor, unidad y observaciones. Cuando existieron discrepancias entre registros, se contrastaron con la tripulación y no se escogió arbitrariamente una de las versiones.

Tabla 5

Fuentes documentales y datos que se extrajeron

Documento	Información de interés
Manual del fabricante	Valores nominales, alarmas, intervalos, puntos de inspección y procedimientos.
Bitácora de máquinas	Parámetros operacionales, horas, carga, eventos y observaciones de guardia.
Plan de mantenimiento	Tareas programadas, frecuencia, responsables y cumplimiento.
Órdenes de trabajo	Falla reportada, diagnóstico, repuestos, duración y acción ejecutada.
Reportes de laboratorio	Viscosidad, contaminación, agua, combustible, metales y recomendaciones.
Informes de inspección	Hallazgos de clase, bandera, auditoría, termografía, vibración o ultrasonido.
Inventario de repuestos	Consumo, recurrencia y disponibilidad de componentes críticos.

Nota. La inclusión de cada fuente dependió de su existencia y de la autorización concedida por el armador o responsable de la embarcación.

2.5.2 Observación técnica e inspección de campo

La observación fue directa, estructurada y no participante. Se inspeccionaron el estado general de los motores, identificación de instrumentos, accesibilidad de puntos de medición, presencia de fugas, condición de tuberías, conexiones, filtros, intercambiadores, alarmas y prácticas de registro. Los hallazgos se consignaron en una lista de verificación y, cuando existió autorización, mediante fotografías técnicas sin incluir personas ni información comercial sensible.

La inspección no reemplazó un peritaje ni una encuesta de clasificación. Su finalidad fue reconocer condiciones que afecten la calidad de los datos o la factibilidad del monitoreo: manómetros sin identificación, sensores fuera de servicio, escalas ilegibles, puntos inaccesibles, diferencias de unidades y ausencia de referencias nominales.

2.5.3 Registro de parámetros operacionales

Se utilizó una ficha normalizada de registro que incluya motor, fecha, hora, horas acumuladas, fase operacional, revoluciones, carga estimada, variables de lubricación, refrigeración, combustible, admisión y escape, así como cualquier alarma o intervención reciente. El formato evitó mezclar lecturas obtenidas bajo regímenes incompatibles.

Las variables se capturaron mediante la instrumentación instalada y, cuando existió disponibilidad, mediante equipos portátiles. Antes de iniciar la serie se comprobó la unidad, resolución, rango y estado aparente de cada instrumento. Una lectura proveniente de un sensor dudoso se verificó con una fuente independiente antes de ser utilizada para emitir una recomendación.

2.5.4 Entrevista semiestructurada

La entrevista se aplicó al personal seleccionado para conocer la política de mantenimiento, criterios de alarma, frecuencia de registros, fallas recurrentes, disponibilidad de repuestos y obstáculos para analizar los datos. Se empleó una guía semiestructurada, de modo

que todos los participantes respondan un núcleo común de preguntas, pero puedan ampliar situaciones técnicas relevantes.

Las respuestas se registraron por escrito o mediante audio únicamente con autorización. El análisis se organizó en categorías: planificación, monitoreo, tratamiento de datos, toma de decisiones, comunicación y capacitación. No se utilizaron las entrevistas para calificar individualmente al personal.

2.5.5 Matriz de criticidad y AMEF

La criticidad se evaluó combinando la probabilidad o frecuencia estimada de la falla con sus consecuencias sobre seguridad, ambiente, producción y costo. Posteriormente se aplicó un análisis de modos y efectos de falla para relacionar cada función con una falla funcional, causa, efecto, mecanismo detectable y acción recomendada. Este procedimiento permite seleccionar variables por su utilidad frente a fallas concretas y no por la mera disponibilidad de sensores.

$$C = P * Co$$

donde C representa la criticidad, P la probabilidad o frecuencia estimada y Co la consecuencia. Para el AMEF se utilizó, como apoyo de priorización:

$$NPR = S * O * D$$

donde S corresponde a severidad, O la ocurrencia y D la dificultad de detección. El NPR no se interpretó de forma aislada: una falla de seguridad con baja frecuencia sigue siendo prioritaria aunque su producto numérico no sea el mayor.

Tabla 6
Escala propuesta para la valoración de criticidad

Nivel	Criterio orientativo de consecuencia
1	Consecuencia menor; no interrumpe la función principal; corrección rutinaria.
2	Degradación leve; requiere ajuste o reparación sin pérdida prolongada de servicio.
3	Pérdida parcial de función; afecta producción o redundancia; intervención prioritaria.
4	Pérdida relevante de propulsión, generación o servicio esencial; riesgo operacional alto.
5	Consecuencia potencial sobre seguridad, contaminación o pérdida total de una función crítica.

Nota. La misma escala de cinco niveles puede adaptarse a ocurrencia y detectabilidad. Los criterios finales deben revisarse con personal técnico conocedor de los equipos.

2.6 Validez, confiabilidad y control metrológico

Los instrumentos documentales —ficha de revisión, lista de verificación, guía de entrevista y matriz de criticidad— se plantearon con criterios de claridad, pertinencia, coherencia y suficiencia, y se sometieron a revisión técnica cuando fue posible. La revisión consideró experiencia en mantenimiento y motores marinos. Las observaciones pertinentes se incorporaron antes de la aplicación definitiva.

La verificación inicial del formato se realizó con una porción de registros antes de consolidar la base definitiva. Su finalidad fue comprobar si las unidades, campos y categorías permiten registrar la información sin ambigüedad. Cuando se utilicen escalas de valoración, puede calcularse la concordancia entre evaluadores o la V de Aiken, siempre que el número de expertos y la estructura del instrumento lo permitan.

La confiabilidad de las mediciones técnicas dependió principalmente del control metrológico. Se verificó la identificación del instrumento, su estado de calibración cuando existió certificado, el rango de trabajo, la resolución y la repetibilidad. Las mediciones portátiles se efectuaron en el mismo punto y orientación, bajo condiciones de carga comparables. También se realizaron lecturas repetidas cuando el valor fue inestable o se apartó de la tendencia.

Para fortalecer la credibilidad se aplicó triangulación de fuentes. Una anomalía se contrastó, según correspondió, con la bitácora, otro parámetro relacionado, una medición independiente, el historial de mantenimiento y la apreciación del personal. Jimenez et al. (2020) señalan que la calidad y contextualización de los datos es determinante para desarrollar soluciones predictivas útiles en maquinaria naval.

2.7 Procedimiento de la investigación

2.7.1 Fase 1: autorización, delimitación y planificación

Se gestionó el acceso a la embarcación, documentos y equipos. En la coordinación inicial se explicó el objetivo, alcance, datos requeridos, medidas de confidencialidad y restricciones de seguridad. Se acordaron responsables, horarios y condiciones bajo las cuales podían realizarse las inspecciones. La investigación no interfirió con las guardias, maniobras ni labores prioritarias de mantenimiento.

2.7.2 Fase 2: inventario y caracterización técnica

Se elaboró un inventario de los motores y sus sistemas asociados. La ficha incorporó fabricante, modelo, número de serie, potencia, velocidad nominal, función a bordo, tipo de control, horas acumuladas, combustible, lubricante, instrumentación instalada, protecciones y antecedentes de reparación mayor. Los datos se obtuvieron de placas, manuales y registros; no se completaron mediante estimaciones no verificadas.

Tabla 7

Campos de la ficha de caracterización de los motores

Grupo de datos	Contenido
Identificación	Código del equipo, función, ubicación y número de serie.
Datos nominales	Fabricante, modelo, potencia, rpm, cilindros y régimen de servicio.
Sistemas asociados	Lubricación, refrigeración, combustible, admisión, escape y arranque.
Instrumentación	Sensor, indicador, unidad, rango, alarma y punto de medición.
Historial	Horas, reparaciones mayores, fallas repetitivas y componentes sustituidos.
Mantenimiento vigente	Tareas, intervalos, responsable, repuestos y registros.
Condiciones operacionales	Fases de servicio, carga habitual, ambiente y restricciones.

Nota. La tabla presenta los campos a recopilar; los valores concretos se incorporaron en la caracterización del objeto de estudio.

2.7.3 Fase 3: diagnóstico del mantenimiento existente

Se revisó la correspondencia entre el plan vigente, las recomendaciones del fabricante y las tareas realmente ejecutadas. Se identificaron procedimientos correctivos, preventivos y

basados en condición; periodicidad de la toma de datos; forma de almacenamiento; responsables de revisión; criterios de alarma y uso posterior de la información.

Los registros se evaluaron por completitud, legibilidad, continuidad, unidad correcta, identificación del motor y presencia del régimen operacional. Se calculó el porcentaje de campos completos y la proporción de datos que pueden utilizarse para análisis de tendencia. Esta evaluación permitió reconocer la brecha entre la información disponible y la información necesaria.

2.7.4 Fase 4: análisis de criticidad y selección de modos de falla

Cada motor se descompuso funcionalmente. Con el apoyo del personal se identificaron fallas que puedan comprometer propulsión, suministro eléctrico, seguridad o continuidad de la operación. Las fallas se priorizaron por consecuencia, recurrencia y capacidad de detección. Los modos de mayor importancia sirvieron para definir los parámetros prioritarios de vigilancia.

A modo de ejemplo, la pérdida progresiva de presión de lubricación puede vincularse con desgaste, fuga, obstrucción o aumento de holguras; la desigualdad de temperaturas de escape puede asociarse con inyección, admisión o compresión; y una elevación de vibración puede requerir examinar alineación, fijaciones, rodamientos o combustión. La relación definitiva se estableció de acuerdo con el diseño real de los motores.

2.7.5 Fase 5: selección de variables, puntos y frecuencias

La selección se realizó mediante cuatro criterios: sensibilidad frente al modo de falla, posibilidad de medición segura, repetibilidad y capacidad de conducir a una acción. Se aprovecharon primero las variables que ya se encontraban instrumentadas; las técnicas portátiles se incorporaron cuando aportaron evidencia que no podía obtenerse mediante los indicadores existentes.

Las frecuencias no se fijaron de forma universal. Se propusieron de acuerdo con la rapidez esperada del deterioro, criticidad, disponibilidad del personal y recomendaciones del

fabricante. Las variables operacionales pudieron registrarse durante guardias a intervalos constantes y después de cambios relevantes de carga; vibración, termografía y aceite se programaron por ruta, puerto o intervalo de servicio. Una desviación confirmada justificó aumentar temporalmente la frecuencia de revisión.

Tabla 8

Plan preliminar de monitoreo por técnica

Técnica	Variables o puntos	Criterio de frecuencia	Medio
Parámetros operacionales	Presión y temperatura de lubricación; refrigeración; rpm; carga; combustible; escape	Durante operación estable y después de eventos relevantes	Bitácora normalizada y sensores existentes
Vibración	Puntos fijos en apoyos, carcasa o componentes accesibles	Ruta periódica y después de reparación o anomalía	Medidor o analizador portátil
Termografía	Colectores, rodamientos, conexiones, intercambiadores y tuberías	En puerto o bajo condición segura y carga comparable	Cámara infrarroja
Aceite lubricante	Muestra representativa del circuito	Según programa del fabricante/laboratorio y ante indicios de contaminación	Kit de muestreo y laboratorio
Inspección visual/acústica	Fugas, fijaciones, ruido, humo, vibración perceptible y estado de instrumentos	Ronda de guardia y mantenimiento programado	Lista de verificación
Historial de fallas	Evento, causa, tiempo, repuesto y acción	Al cierre de cada intervención	Orden de trabajo o registro digital

Nota. La frecuencia definitiva se definió después de revisar manuales, criticidad, capacidad de medición y ciclo de trabajo de cada motor.

2.7.6 Fase 6: construcción de la línea base

La línea base se formó con datos obtenidos cuando el motor operó sin alarmas, con mantenimiento al día y dentro de una condición de carga identificada. Las lecturas se agruparon por régimen para evitar comparar ralentí con carga elevada. Se excluyeron periodos de arranque, calentamiento, parada y transición, salvo cuando el propósito fue estudiar precisamente esos estados.

Para cada variable se calcularon estadísticos descriptivos y se observó la estabilidad temporal. Los límites del fabricante tuvieron prioridad. Cuando no existió un límite específico para detección temprana, se definieron, cuando resultó pertinente, bandas internas a partir del comportamiento histórico, sin modificar los dispositivos de protección del motor. ISO

17359:2018 establece que el programa debe definir condiciones de referencia y criterios para interpretar cambios en el estado de la máquina (ISO, 2018).

2.7.7 Fase 7: implementación piloto de la estrategia

El plan se aplicó durante el periodo definido. El responsable de guardia registra las variables seleccionadas y el investigador consolida los datos sin reemplazar las obligaciones reglamentarias de la tripulación. El flujo de trabajo comprende captura, validación, comparación, clasificación del estado, comunicación y seguimiento de la acción.

Cuando una lectura superó una banda interna, se verificó primero el instrumento, la unidad, la condición de carga y la coherencia con variables relacionadas. Si la desviación persistió, se generó una alerta técnica con fecha, equipo, evidencia, posible modo de falla y acción sugerida. La decisión final corresponde al responsable de máquinas y se documentó si la alerta fue confirmada, descartada o mantenida bajo observación.

2.7.8 Fase 8: evaluación y ajuste

Al finalizar el periodo piloto se compararon los indicadores previos y posteriores: completitud de registros, anomalías detectadas, tiempo de respuesta, fallas no programadas, cumplimiento del plan y disponibilidad. También se analizó la percepción del personal sobre claridad, carga de trabajo y utilidad. La estrategia se ajustó eliminando mediciones redundantes, modificando frecuencias y precisando las reglas de decisión.

El producto final fue un procedimiento aplicable a bordo que incluye inventario de equipos, matriz de criticidad, variables seleccionadas, rutas de inspección, formatos, niveles de respuesta, responsabilidades e indicadores de revisión. La estrategia conserva un carácter dinámico, porque los criterios deberán revisarse después de reparaciones mayores, cambios de combustible, sustitución de sensores o modificación del perfil operacional.

2.8 Tratamiento, procesamiento y análisis de la información

2.8.1 Preparación y depuración de los datos

Los datos se almacenaron en una base estructurada, preferentemente en una hoja de cálculo con respaldo. Cada fila representó una observación y cada columna una variable. Se emplearon identificadores únicos para motor, fecha, condición operacional y fuente. Las unidades se normalizaron antes de realizar cálculos; las conversiones conservaron el valor original y la fórmula utilizada.

La depuración comprendió la detección de duplicados, valores ausentes, cambios de unidad, errores de digitación y lecturas fuera del rango físico del instrumento. Los valores atípicos no se eliminaron automáticamente. Primero se verificó si correspondían a una falla real, transición de carga, intervención o error de medición. La decisión quedó registrada en una columna de validación.

Tabla 9

Criterios de calidad para aceptar una observación

Criterio	Condición mínima
Identificación	Motor y punto de medición claramente definidos.
Trazabilidad	Fecha, hora, fuente y responsable disponibles.
Unidad	Unidad conocida y coherente con el instrumento.
Contexto	Rpm, carga o fase operacional consignadas.
Rango	Valor compatible con el rango físico y resolución del instrumento.
Coherencia	Relación razonable con variables asociadas y observaciones de guardia.
Integridad	Sin alteración, sobreescritura o transcripción imposible de verificar.

Nota. Una observación que no cumplió todos los criterios pudo conservarse como evidencia cualitativa, pero no necesariamente se utilizó en los cálculos.

2.8.2 Estadística descriptiva

Para cada variable y régimen de operación se calcularon media, mediana, mínimo, máximo, rango, desviación estándar y coeficiente de variación. La mediana permitió representar series afectadas por pocos valores extremos; la desviación estándar expresó la

dispersión; y el coeficiente de variación facilitó comparar estabilidad relativa entre variables con escalas diferentes.

$$CV = (s/\bar{x}) \times 100$$

donde s es la desviación estándar y $\bar{x}$ la media. También se calculó la desviación porcentual respecto a una referencia:

$$D_{\%} = (x_i - x_{ref})/x_{ref} \times 100$$

La referencia x_{ref} pudo corresponder a el valor nominal del fabricante o la línea base correspondiente al mismo régimen. La desviación no se interpretó como falla por sí sola; se consideraron la duración, la tendencia, las variables asociadas y los límites de seguridad.

2.8.3 Análisis de tendencias y detección de cambios

Las series se representaron mediante gráficos temporales y se analizaron con medias móviles o pendientes de regresión cuando la cantidad de datos lo permitió. Una tendencia sostenida tuvo mayor peso que una oscilación aislada. Para reducir falsas alarmas se exigió confirmación mediante repetición, persistencia durante varias observaciones o coincidencia con otro indicador.

Cuando la distribución fue aproximadamente estable y se dispuso de una cantidad suficiente de datos, pudieron utilizarse bandas estadísticas internas. La media más o menos dos desviaciones estándar sirvió como zona de atención y la media más o menos tres desviaciones como señal de alta desviación, siempre que esos límites no contradigan los establecidos por el fabricante. Cuando la distribución no fue adecuada, se utilizaron percentiles, mediana y rango intercuartílico.

2.8.4 Indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad

Los eventos de falla se codificaron por motor, sistema, modo y consecuencia. Cuando existieron registros suficientes, se calcularon los siguientes indicadores:

$$MTBF = (Horas\ de\ funcionamiento)/(Numero\ de\ fallas)$$

$$MTTR = (\text{Tiempo total de reparacion})/(\text{Numero de reparaciones})$$

$$A = MTBF/(MTBF + MTTR)$$

El MTBF expresa el intervalo medio entre fallas reparables; el MTTR aproxima la duración media de la reparación; y A representa una disponibilidad inherente simplificada. Para una disponibilidad operacional más realista se incorporaron tiempos de espera, repuestos y demoras administrativas. Los indicadores se analizaron por separado para motores principales y auxiliares, porque su régimen de servicio y consecuencias son diferentes.

2.8.5 Comparación antes-después

Cuando el periodo previo y posterior dispuso de datos comparables, se evaluaron las diferencias en completitud de registros, frecuencia de fallas, tiempos de reparación, disponibilidad y respuesta a alertas. Cuando los supuestos estadísticos y el tamaño de la muestra lo permitieron, se consideró una prueba t para datos pareados; en caso contrario, la prueba de rangos con signo de Wilcoxon. Además, se valoró la magnitud del cambio y no solamente la significación estadística.

Cuando la cantidad de eventos fue insuficiente, la evaluación fue descriptiva y se reconoció esta limitación. No se atribuyeron reducciones de fallas al método cuando el periodo de observación no permitió establecer esa relación; en tal caso se valoró su capacidad para ordenar la información, detectar desviaciones y acelerar la toma de decisiones.

2.8.6 Análisis cualitativo y triangulación

Las entrevistas y observaciones se organizaron mediante codificación temática. Se identificaron coincidencias y divergencias sobre prácticas de mantenimiento, dificultades de medición, decisiones y aceptación del procedimiento. Los resultados cualitativos se integraron con los indicadores cuantitativos mediante una matriz conjunta. Por ejemplo, un bajo porcentaje de registros puede relacionarse con un formato demasiado extenso, falta de instrumentos o incompatibilidad con la carga de trabajo de la guardia.

2.9 Criterios para la clasificación de la condición y toma de decisiones

La estrategia emplea niveles de respuesta que combinen los límites del fabricante, la línea base, la tasa de cambio y la criticidad del modo de falla. La clasificación no sustituye las alarmas y paradas automáticas del motor. Su propósito es ordenar la respuesta antes de alcanzar una condición de emergencia.

Tabla 10

Niveles de condición y respuesta propuesta

Estado	Criterio general	Respuesta
Normal	Lectura dentro de la referencia y tendencia estable.	Continuar el monitoreo previsto.
Atención	Desviación moderada, valor aislado o aumento de dispersión.	Verificar instrumento, repetir medición y revisar variables relacionadas.
Alerta	Desviación persistente, tendencia adversa o combinación de síntomas.	Realizar diagnóstico dirigido, incrementar frecuencia y programar intervención.
Crítica	Límite del fabricante, alarma de protección, cambio rápido o riesgo elevado.	Aplicar el procedimiento operativo y de seguridad vigente; comunicar de inmediato.
No evaluable	Dato sin trazabilidad, instrumento dudoso o régimen desconocido.	No emitir diagnóstico; corregir la deficiencia de medición.

Nota. Las denominaciones pueden adaptarse al sistema de gestión de la empresa. Las cifras específicas deben proceder del fabricante, alarmas instaladas, análisis histórico y evaluación técnica.

2.10 Estructura operativa de la estrategia propuesta

La implementación requiere definir responsabilidades para que la información no quede limitada a una hoja de cálculo. El personal de guardia realiza la captura primaria y notifica desviaciones inmediatas; el jefe de máquinas verifica la coherencia técnica y autoriza acciones; el responsable en tierra, cuando existe, revisa tendencias y coordina recursos; y el investigador consolida el procedimiento durante el periodo académico sin asumir funciones operativas de mando.

La arquitectura documental estuvo compuesta por: ficha de equipo, ruta de monitoreo, bitácora de condición, matriz de alertas, orden de acción y tablero de indicadores. El tablero puede elaborarse en una hoja de cálculo y muestra tendencias, estado por motor, alertas abiertas, fecha de próxima revisión e indicadores de cumplimiento. No es obligatorio instalar

una plataforma compleja si los datos disponibles pueden administrarse de forma confiable con herramientas accesibles.

La familia ISO 13374 plantea una arquitectura para transformar datos de condición en información y apoyo a decisiones. En esta investigación se adaptó esa lógica a una escala viable: adquisición, manipulación, detección de estado, evaluación de salud, recomendación y presentación (ISO, 2003).

Tabla 11
Responsabilidades básicas dentro del flujo MBC

Actor	Responsabilidad
Personal de guardia	Tomar lecturas, registrar régimen, comunicar alarmas y preservar la trazabilidad.
Jefe de máquinas	Validar desviaciones, decidir acciones, aprobar cambios de frecuencia y cerrar alertas.
Mecánico o técnico	Ejecutar inspecciones y reparaciones; documentar hallazgos y repuestos.
Responsable técnico en tierra	Analizar tendencias globales, gestionar recursos y revisar recurrencias.
Investigador	Diseñar instrumentos, consolidar datos, analizar resultados y proponer mejoras sin interferir con el mando operativo.

Nota. La asignación se ajustó a la estructura real de la embarcación y de la empresa armadora.

2.11 Indicadores para evaluar la implementación

La evaluación combina indicadores de proceso y resultado. Los primeros permiten determinar si la estrategia se ejecuta como fue diseñada; los segundos muestran cambios en la gestión y en el comportamiento de los equipos. No se fijaron metas porcentuales sin disponer de una línea base válida.

Tabla 12
Indicadores de evaluación de la estrategia

Indicador	Cálculo o criterio	Periodicidad
Cobertura de monitoreo	$\text{Puntos medidos} / \text{puntos programados} \times 100$	Por periodo
Compleitud documental	$\text{Registros completos} / \text{registros esperados} \times 100$	Semanal o mensual
Datos válidos	$\text{Lecturas aceptadas} / \text{lecturas capturadas} \times 100$	Por motor
Cumplimiento de tareas	$\text{Tareas ejecutadas a tiempo} / \text{tareas programadas} \times 100$	Mensual
Alertas confirmadas	$\text{Alertas con hallazgo técnico} / \text{alertas emitidas} \times 100$	Acumulado
Tiempo de respuesta	Fecha de acción – fecha de detección	Por alerta
Fallas no programadas	Número de eventos por horas de operación	Antes y después
Disponibilidad	$\text{Tiempo disponible} / \text{tiempo requerido} \times 100$	Por motor y periodo
Reincidencia	Fallas repetidas del mismo modo	Trimestral o por campaña

Indicador	Cálculo o criterio	Periodicidad
Aceptación del procedimiento	Valoración cualitativa del personal	Cierre del piloto
Nota. La periodicidad es orientativa y deberá armonizarse con el calendario operacional y la disponibilidad de registros.		

2.12 Consideraciones éticas, de seguridad y confidencialidad

Se solicitó autorización para acceder a la embarcación y utilizar documentación técnica. Se informó al personal sobre el propósito del estudio y la participación en entrevistas fue voluntaria. Los resultados se presentaron de manera agregada y no se atribuyeron opiniones a una persona identificable.

La información de carácter comercial, contractual o sensible se excluyó. Los motores fueron codificados en las bases de datos y el nombre del buque se utiliza únicamente donde es indispensable para delimitar el caso. Las fotografías evitaron matrículas, documentos, pantallas con datos confidenciales y rostros, salvo autorización expresa.

La seguridad operacional tuvo prioridad sobre la recopilación de datos. No se efectuaron mediciones en partes móviles, superficies calientes, espacios restringidos o durante maniobras cuando el procedimiento no fue seguro. Se utilizó equipo de protección personal y se obedecieron las instrucciones del jefe de máquinas. La investigación no modificó alarmas, protecciones, ajustes de combustible ni parámetros de control.

2.13 Limitaciones y medidas de control

El estudio puede verse limitado por registros incompletos, diferencias entre instrumentos, cambios de carga, periodos cortos sin fallas y acceso restringido a documentos. También debe reconocerse que una sola embarcación no representa a toda la flota y que no es ético inducir fallas para validar los diagnósticos.

Para disminuir estas limitaciones se aplicaron codificación de calidad, triangulación, comparación por régimen operacional, documentación de intervenciones y revisión con el personal técnico. Las conclusiones se circunscribieron al caso y a los motores estudiados. La

posible transferencia a otras embarcaciones se presentó como una adaptación, no como una generalización automática.

2.14 Resultados del procedimiento metodológico

La aplicación de la metodología produjo: un inventario técnico verificado; una caracterización del mantenimiento vigente; una matriz de criticidad y modos de falla; un conjunto priorizado de variables; una línea base por régimen de operación; formatos de captura y seguimiento; reglas de alerta; indicadores de evaluación; y un procedimiento de revisión periódica.

El principal aporte no consistió únicamente en reunir más lecturas, sino en establecer la conexión entre dato, síntoma, modo de falla, decisión y acción documentada. Esta trazabilidad permitió determinar qué información realmente contribuye a anticipar deterioros y cuál representa una carga de registro sin valor técnico suficiente.

2.15 Conclusiones del capítulo

El marco metodológico propuesto articula la investigación documental, el trabajo de campo y la implementación técnica dentro de un estudio de caso longitudinal. La combinación de datos operacionales, historial de mantenimiento, criticidad y experiencia del personal permite diseñar una estrategia ajustada a la realidad de los motores instalados, sin depender de tecnologías inaccesibles ni de límites genéricos.

La secuencia parte de la caracterización y el diagnóstico, continúa con la selección de modos de falla y variables, y culmina con una implementación piloto sometida a evaluación. La validez de los resultados dependió de la trazabilidad de los datos, la comparación bajo regímenes equivalentes y el respeto a los criterios del fabricante y de seguridad. Sobre esta base, el capítulo de resultados presenta la condición observada, las alertas generadas y los ajustes requeridos para consolidar el programa.

Capítulo III

Resultados Y Discusión

3.1 Criterios de interpretación y alcance del análisis

Este capítulo interpreta el comportamiento registrado en dos máquinas principales y tres máquinas auxiliares durante mayo, junio y los primeros días de julio de 2026. El tratamiento efectuado no se limita a describir valores máximos, mínimos o promedios; organiza las señales por estado operacional, examina la estabilidad de cada referencia, contrasta equipos que cumplen funciones equivalentes y localiza episodios en los cuales varias variables se apartan simultáneamente de su patrón habitual. Con esta secuencia, el dato deja de ser una lectura aislada y se convierte en evidencia útil para decidir qué condición debe seguirse, cuál merece una inspección y qué evento requiere una verificación inmediata.

El razonamiento empleado se corresponde con el enfoque de mantenimiento basado en condición: primero se reconoce la conducta normal del activo, después se mide la desviación y, finalmente, se vincula esa desviación con una respuesta técnica. La ISO 17359:2018 establece precisamente que un programa de monitoreo debe articular selección de parámetros, adquisición, evaluación y diagnóstico. En motores marinos, Basurko y Uriondo (2015) demostraron que la comparación con referencias construidas bajo regímenes equivalentes ofrece una interpretación más consistente que el uso de una sola media para todo el ciclo operativo.

Los resultados se presentan en tres escalas. La primera describe el patrón conjunto de las cinco máquinas; la segunda profundiza en cada equipo y sus variables; la tercera integra los eventos coincidentes para distinguir entre una lectura excepcional, una transición operacional y una desviación sostenida. Esta organización permite formular hallazgos directamente convertibles en reglas de seguimiento dentro del tablero de mantenimiento.

Tabla 13*Síntesis cuantitativa de los resultados principales*

Indicador	Resultado
Volumen analizado	91.432 instantes sincronizados y 731.456 valores numéricos
Coherencia operacional	91,90 % de los registros muestran a los cuatro grupos conjuntamente en estado alto o bajo
Simetría de principales	Correlación global $r = 0,9967$; cambio térmico sostenido desde el 29 de junio
Hallazgo de mayor prioridad	En julio, 99,44 % del tiempo pareado en estado alto superó el límite robusto de diferencia ER-BR

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados.

3.2 Organización de las señales analizadas

3.2.1 Equipos, parámetros y correspondencia funcional

Las ocho señales se agruparon según el sistema al que aportan información. En las máquinas principales se analizó la temperatura de los gases de escape a la entrada de cada turbocompresor. En la primera máquina auxiliar se relacionaron la presión del aire de carga y la presión de entrada del combustible; en la segunda se compararon la temperatura de entrada del combustible y la temperatura de salida del agua de alta temperatura; en la tercera se estudió la interacción entre presión y temperatura del aceite lubricante. Esta disposición conserva la identidad de cada equipo y evita mezclar variables que responden a mecanismos físicos diferentes.

Tabla 14*Variables operacionales incluidas en la evaluación*

Código	Función	Marca y modelo	Variable	Unidad
BR	Máquina principal de babor	WÄRTSILÄ VASA 6R32E	Temperatura de gases de escape, entrada T/C A	°C
ER	Máquina principal de estribor	WÄRTSILÄ VASA 6R32E	Temperatura de gases de escape, entrada T/C B	°C
Aux. 1	Máquina auxiliar 1	GUASCOR E318TA2	Presión de aire de carga	bar
Aux. 1	Máquina auxiliar 1	GUASCOR E318TA2	Presión de entrada de combustible	bar
Aux. 2	Máquina auxiliar 2	GUASCOR E318TA2	Temperatura de entrada del combustible	°C
Aux. 2	Máquina auxiliar 2	GUASCOR E318TA2	Temperatura de salida del agua A.T.	°C
Aux. 3	Máquina auxiliar 3	GUASCOR F480TA-SA	Presión de entrada del aceite lubricante	bar
Aux. 3	Máquina auxiliar 3	GUASCOR F480TA-SA	Temperatura de entrada del aceite lubricante	°C

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados.

3.2.2 Comportamiento bimodal y necesidad de comparar estados equivalentes

La forma de las distribuciones mostró dos agrupaciones claramente diferenciadas: un conjunto de valores bajos y otro asociado con el régimen operacional alto. Esta estructura aparece en las ocho señales. Por ejemplo, las temperaturas de escape se concentraron alrededor de 530,52 °C en BR y 532,50 °C en ER durante el grupo alto, mientras que los centros bajos se situaron cerca de 108,55 °C y 102,49 °C. En la auxiliar 3, la presión del aceite formó centros de 0,19 y 4,89 bar. La separación no es una imperfección estadística; refleja el tránsito entre parada, calentamiento, operación y enfriamiento.

La consecuencia práctica es significativa. Cuando ambos estados se combinan, el coeficiente de variación alcanza 39,35 % y 39,89 % en las temperaturas de escape, y supera 50 % en varias presiones auxiliares. Al conservar únicamente el estado alto, la dispersión baja a intervalos de 2,38 % a 6,54 %. De esta manera, el seguimiento por condición se vuelve más sensible: una variación pequeña dentro de la operación estable deja de quedar oculta por los periodos de parada.

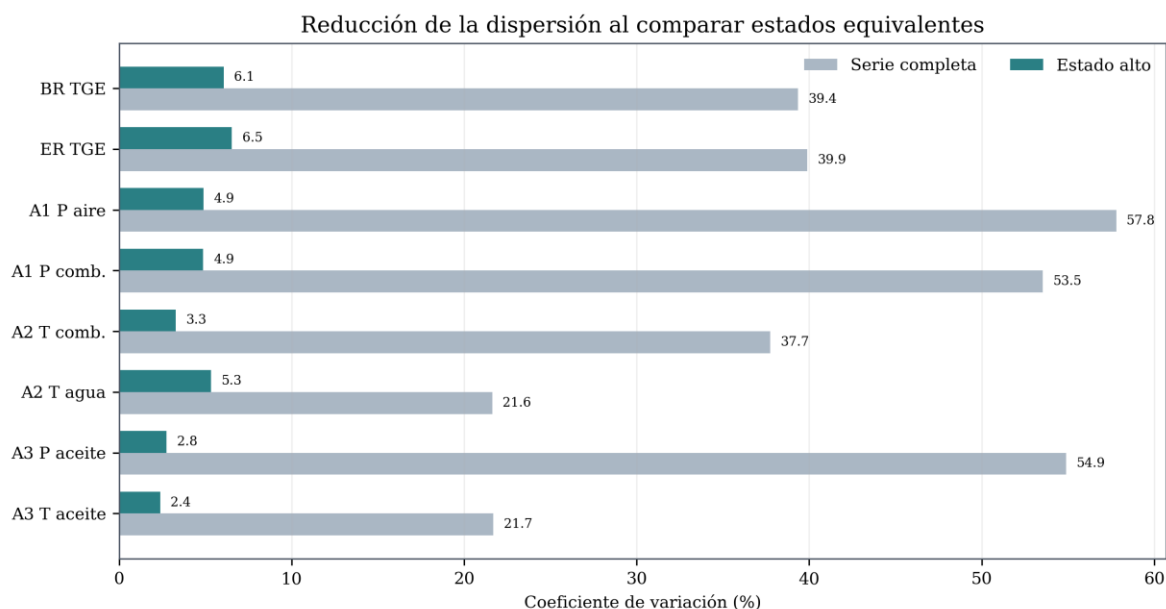
Tabla 15

Centros empíricos y línea base del estado operacional alto

Variable	Unidad	Centro bajo	Centro alto	Separación	Estado alto	CV estado alto
BR	°C	108,55	530,52	319,53	79,84 %	6,07 %
ER	°C	102,49	532,50	317,49	79,97 %	6,54 %
A1 aire	bar	0,14	2,96	1,55	72,73 %	4,88 %
A1 combustible	bar	0,26	9,44	4,85	76,67 %	4,87 %
A2 combustible	°C	39,46	130,99	85,23	74,13 %	3,29 %
A2 agua A.T.	°C	42,26	71,83	57,04	73,56 %	5,32 %
A3 aceite P	bar	0,19	4,89	2,54	75,02 %	2,75 %
A3 aceite T	°C	37,05	67,01	52,03	76,29 %	2,38 %

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados. La separación corresponde al punto medio entre los dos centros empíricos. Se utiliza para segmentar la serie y no sustituye los límites de alarma del fabricante.

Figura 2
Reducción de la dispersión al comparar estados equivalentes



Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados. El coeficiente de variación de la serie completa incorpora parada, transición y operación. El estado alto representa la referencia más útil para vigilar desviaciones durante funcionamiento.

3.2.3 Patrón operacional conjunto de las cinco máquinas

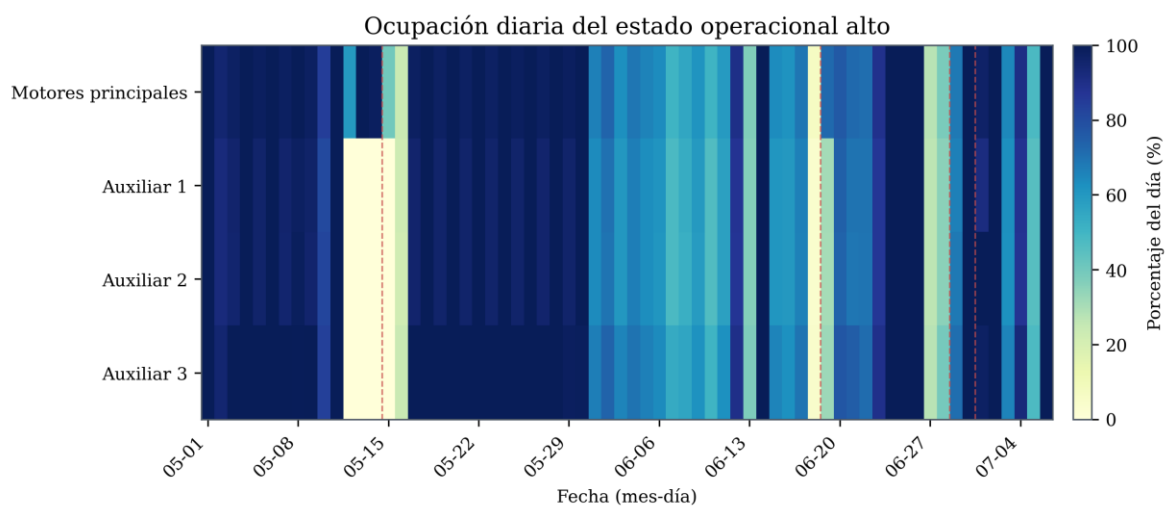
La coincidencia entre equipos constituye uno de los resultados más sólidos. Los cuatro grupos —máquinas principales, auxiliar 1, auxiliar 2 y auxiliar 3— permanecieron simultáneamente en estado alto durante 72,40 % del periodo y simultáneamente en estado bajo durante 19,50 %. En conjunto, 91,90 % de la serie presentó una condición operacional concordante. El porcentaje restante corresponde principalmente a transiciones escalonadas o a periodos en los cuales una máquina mantuvo servicio mientras otra se encontraba en un nivel reducido.

La correlación entre los estados de las auxiliares 1 y 2 fue 0,9852, y la auxiliar 3 mantuvo correlaciones superiores a 0,93 con ambas. Este acoplamiento sugiere una secuencia de trabajo común y permite utilizar la concordancia entre máquinas como filtro de validación. Cuando varias señales cambian en la misma dirección y en el mismo intervalo, el evento posee mayor consistencia operacional que una lectura aislada.

Tabla 16*Distribución temporal del estado operacional alto*

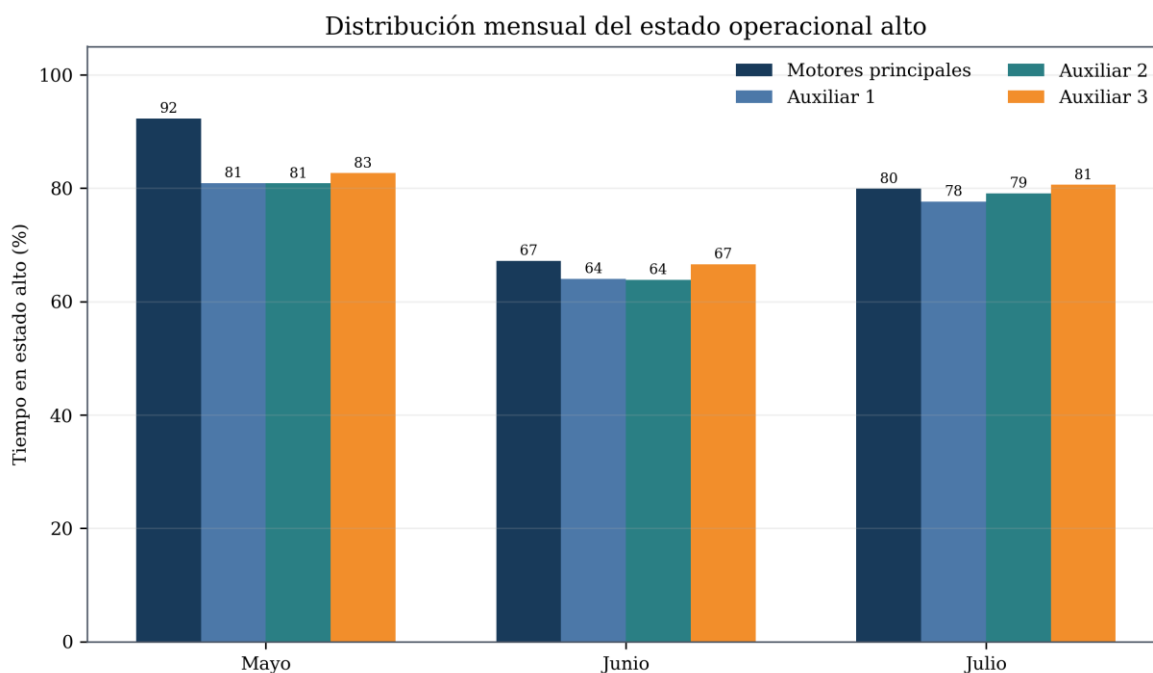
Grupo	Total	Horas equivalentes	Mayo	Junio	Julio
BR/ER	79,55 %	1.212,3	92,3 %	67,2 %	79,9 %
A1	72,73 %	1.108,3	80,9 %	64,0 %	77,6 %
A2	72,75 %	1.108,7	80,9 %	63,8 %	79,1 %
A3	74,95 %	1.142,2	82,6 %	66,6 %	80,6 %

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados.

Figura 3*Ocupación diaria del estado operacional alto*

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados. Los tonos más oscuros representan mayor permanencia diaria en el estado alto. Las líneas verticales señalan fechas relevantes para el análisis de eventos.

Figura 4
Distribución mensual del estado operacional alto



Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados. El descenso simultáneo de junio y la recuperación observada en julio confirman un cambio de patrón de utilización compartido por los equipos.

El descenso de ocupación de junio fue simultáneo: las máquinas principales pasaron de 92,28 % en mayo a 67,18 %, mientras las auxiliares se ubicaron entre 63,85 % y 66,56 %. En julio, todas retornaron a valores cercanos a 78 %-81 %. La simultaneidad impide interpretar la reducción de las medias globales de junio como un deterioro general; el cambio se explica principalmente por una mayor permanencia en estados bajos. Esta comprobación es central para evitar intervenciones innecesarias.

3.3 Resultados de las máquinas principales

3.3.1 Simetría térmica global

Las dos temperaturas de escape evolucionaron de manera altamente sincronizada. La correlación global alcanzó $r = 0,9967$ y se mantuvo en $r = 0,9385$ cuando se consideró únicamente el estado alto. Esta relación indica que ambas máquinas respondieron a una dinámica operacional común. No obstante, la correlación por sí sola no garantiza igualdad

térmica: dos señales pueden conservar la misma forma y, al mismo tiempo, separarse por un desplazamiento constante.

$$\Delta TME = TER - TBR$$

El indicador ΔTME se utilizó para medir la diferencia entre estribor y babor en cada instante pareado. Durante mayo, la diferencia media en estado alto fue 0,70 °C; en junio aumentó a 2,38 °C; en julio llegó a 12,64 °C. La magnitud absoluta media pasó de 5,74 °C en mayo a 3,11 °C en junio y posteriormente se elevó a 12,69 °C. Por tanto, julio no presenta únicamente mayor dispersión: muestra una separación direccional, persistente y de signo positivo, con ER por encima de BR.

Tabla 17

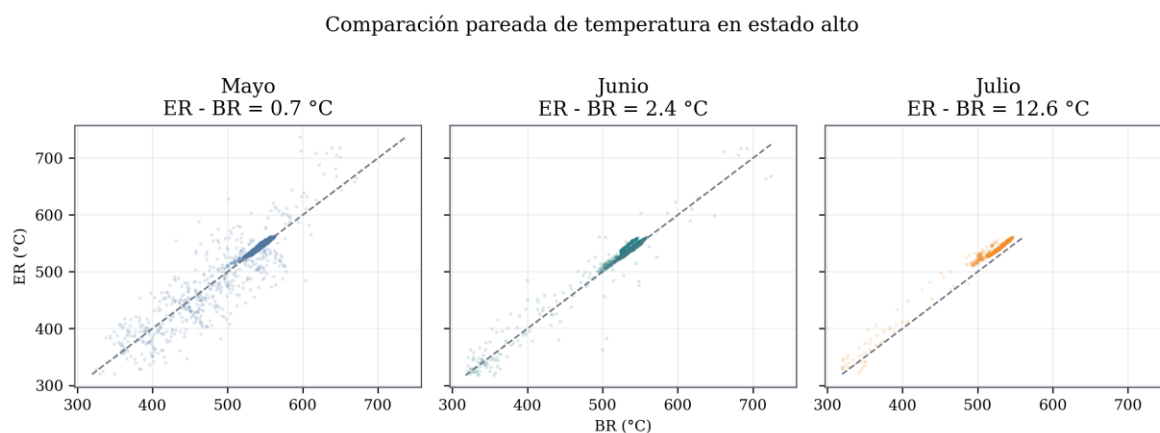
Comparación pareada de las temperaturas de escape en estado alto

Periodo	n	BR (°C)	ER (°C)	ΔT media	ΔT mediana	$ \Delta T $ media
Mayo 2026	38.246	531,69	532,39	0,70	2,40	5,74
Junio 2026	28.762	531,17	533,55	2,38	1,30	3,11
Julio 2026	5.730	527,95	540,60	12,64	12,40	12,69

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados.

Figura 5

Comparación pareada de temperatura por mes



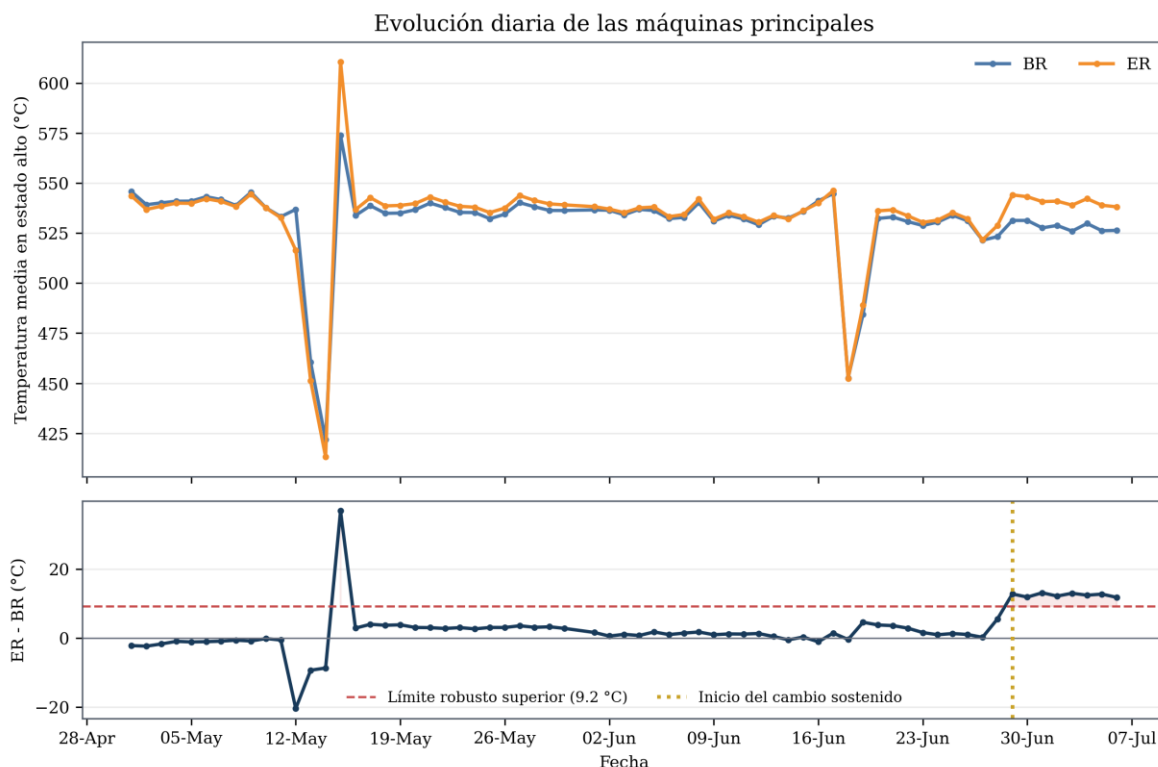
Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados. La línea discontinua representa igualdad térmica. En julio, la nube conserva una forma estrecha y paralela, pero se desplaza por encima de la línea, evidencia de un sesgo sostenido hacia ER.

3.3.2 Cambio térmico sostenido a partir del 29 de junio

La línea base robusta de la diferencia ER-BR, calculada con mayo y junio, presentó una mediana de 1,60 °C y un límite superior de 9,16 °C. La mediana móvil de una hora superó ese límite de forma sostenida desde el 29 de junio de 2026, 09:51. El desplazamiento se mantuvo hasta el final del periodo completo del 5 de julio y acumuló 7.814 minutos de persistencia.

La persistencia distingue este hallazgo de un pico ocasional. En julio, 99,44 % de los minutos con ambas máquinas en estado alto quedaron por encima del límite robusto. A la vez, la correlación mensual permaneció aproximadamente en 0,991, lo cual indica que las señales continuaron moviéndose en paralelo. El patrón es compatible con dos hipótesis prioritarias de verificación: un reparto de carga sistemáticamente diferente o un desplazamiento de calibración en uno de los canales. Ambas alternativas producen una separación estable; la primera corresponde a la condición real del sistema y la segunda a la cadena de medición.

La descomposición del cambio ayuda a orientar la revisión. Frente a mayo, la media pareada de BR disminuyó 3,74 °C en julio, mientras la de ER aumentó 8,21 °C. La mayor contribución provino, por tanto, del incremento de ER, aunque el descenso moderado de BR amplificó la diferencia. La inspección debe comenzar por el contraste de termopares y conexiones; si la medición se confirma, procede revisar balance de carga, inyección, admisión, colectores de escape y condición de los turbocompresores.

Figura 6*Evolución diaria de la simetría térmica entre máquinas principales*

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados. El panel inferior presenta la diferencia ER-BR y el límite robusto superior construido con mayo y junio. El desplazamiento comienza al cierre de junio y permanece durante julio.

3.3.3 Episodios térmicos de corta y larga duración

El análisis temporal permitió separar eventos persistentes de lecturas puntuales. En BR, la secuencia más extensa por encima del percentil 99,5 se produjo el 15 de mayo entre 05:30 y 07:20, con 110 minutos y una media de 630,97 °C. En ER, el episodio equivalente se extendió entre 05:32 y 08:19, durante 168 minutos, con una media de 661,41 °C. La superposición de ambos episodios fortalece su interpretación como una condición operacional real o una maniobra exigente, en contraste con un error exclusivo de un sensor.

El 19 de junio apareció una segunda excursión simultánea. BR superó su cola superior durante 53 minutos y alcanzó 724,10 °C; ER permaneció 47 minutos en esa condición y alcanzó 754,70 °C. Debido a que los dos canales se elevaron en el mismo intervalo, el evento

merece una revisión específica de carga, combustión y flujo de escape. Este tipo de coincidencia es más relevante para mantenimiento que un máximo aislado.

También se observaron puntos de amplitud excepcional —1.176,90 °C en BR y 1.121,10 °C en ER— que no conservaron continuidad con las mediciones vecinas. En la estrategia propuesta, estos valores se etiquetan como anomalías de señal hasta que una segunda variable o una secuencia temporal confirme su naturaleza. La regla evita que un salto instantáneo active una intervención de maquinaria sin antes comprobar sensor, escala y registro.

3.4 Resultados de la máquina auxiliar 1

3.4.1 Estabilidad de las presiones durante el estado alto

Durante funcionamiento, la presión de aire de carga aumentó gradualmente de 2,90 bar en mayo a 3,00 bar en junio y 3,05 bar en julio. La presión de combustible mostró una evolución paralela, de 9,32 a 9,59 y 9,70 bar. Las variaciones son pequeñas frente a las medias y los coeficientes de variación permanecieron entre 1,35 % y 5,17 %. Por consiguiente, el sistema mantuvo referencias de presión definidas y repetibles.

La relación combustible/aire se redujo levemente de 3,219 a 3,205 y 3,197. El recorrido total fue inferior a 0,7 %, lo que demuestra proporcionalidad entre ambas presiones aun cuando sus niveles aumentaron. Esta relación puede incorporarse al tablero como indicador secundario: un cambio abrupto en el cociente señalaría que una de las dos presiones dejó de acompañar a la otra.

Tabla 18

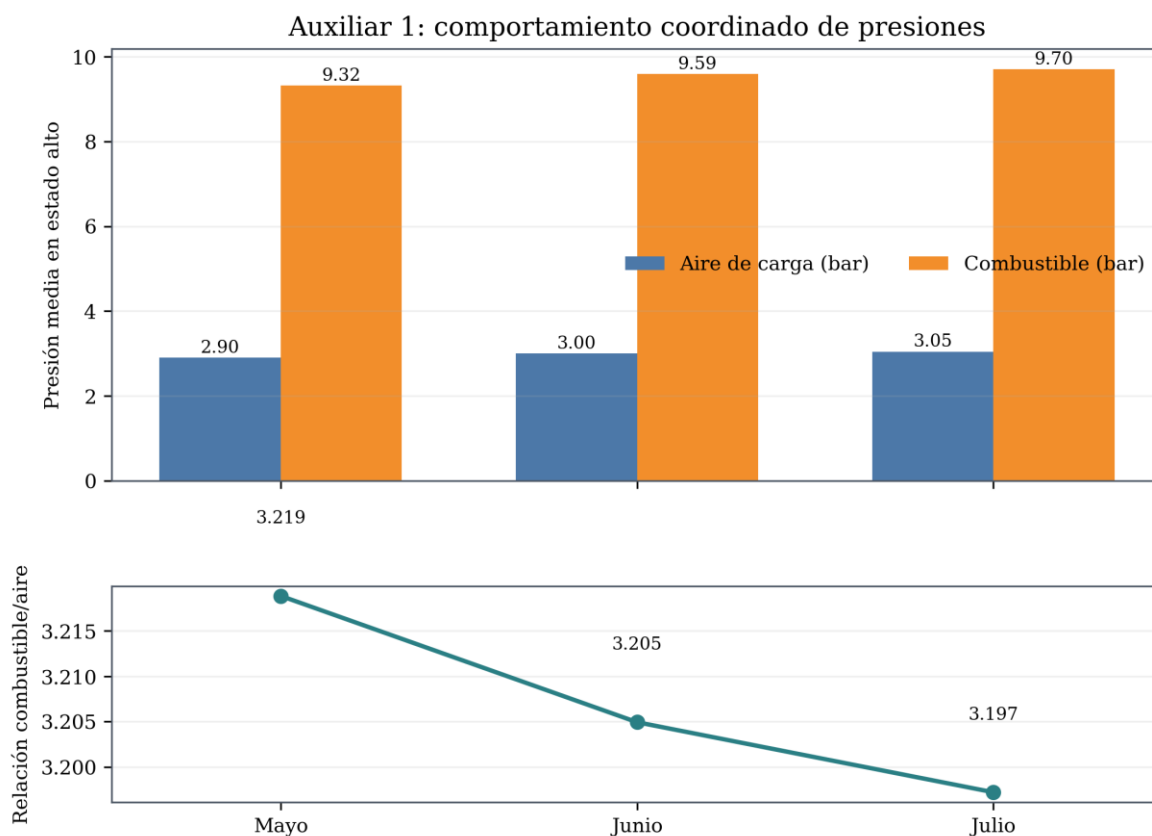
Presiones de la auxiliar 1 durante el estado alto

Periodo	Aire (bar)	CV aire	Combustible (bar)	CV combustible	Relación Pcomb./Paire
Mayo 2026	2,902	3,72 %	9,320	4,00 %	3,219
Junio 2026	3,003	5,17 %	9,587	1,35 %	3,205
Julio 2026	3,045	4,98 %	9,699	3,03 %	3,197

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados.

Figura 7

Comportamiento coordinado de las presiones de la auxiliar 1



Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados. El incremento de ambas presiones mantiene prácticamente constante la relación combustible/aire.

La correlación global entre ambas señales fue 0,9125, pero dentro del estado alto descendió a 0,0172. Esta aparente contradicción tiene una explicación operacional: la elevada correlación global surge porque las dos presiones suben al arrancar y bajan al detenerse; una vez alcanzado el régimen, cada lazo conserva su propio punto de control y fluctúa poco. El hallazgo confirma que la correlación debe interpretarse después de separar los estados.

3.4.2 Evento de presión de combustible del 1 de julio

El episodio de mayor interés comenzó el 1 de julio a las 12:58 y se mantuvo hasta las 19:34. Durante 397 minutos, la presión de combustible permaneció por encima del percentil 99,5, con una media de 10,69 bar y un máximo de 11,37 bar. La duración y la forma de meseta

diferencian este comportamiento de un salto instantáneo. La presión de aire de carga no presentó una elevación proporcional de la misma magnitud, por lo que el evento se asocia con el circuito de combustible o con un cambio de consigna más que con un aumento generalizado de sobrealimentación.

La acción recomendada es contrastar el intervalo con la bitácora de operación, comprobar la posición de válvulas y reguladores, revisar el transmisor y verificar la presión mediante un instrumento patrón. Si el valor se confirma, debe examinarse el estado de filtros, bomba, retorno y regulación de combustible. Si no se confirma, el episodio se conserva como desviación de la cadena de medición y se corrige antes de utilizar el canal como alarma.

3.5 Resultados de la máquina auxiliar 2

3.5.1 Equilibrio térmico del combustible y el agua de alta temperatura

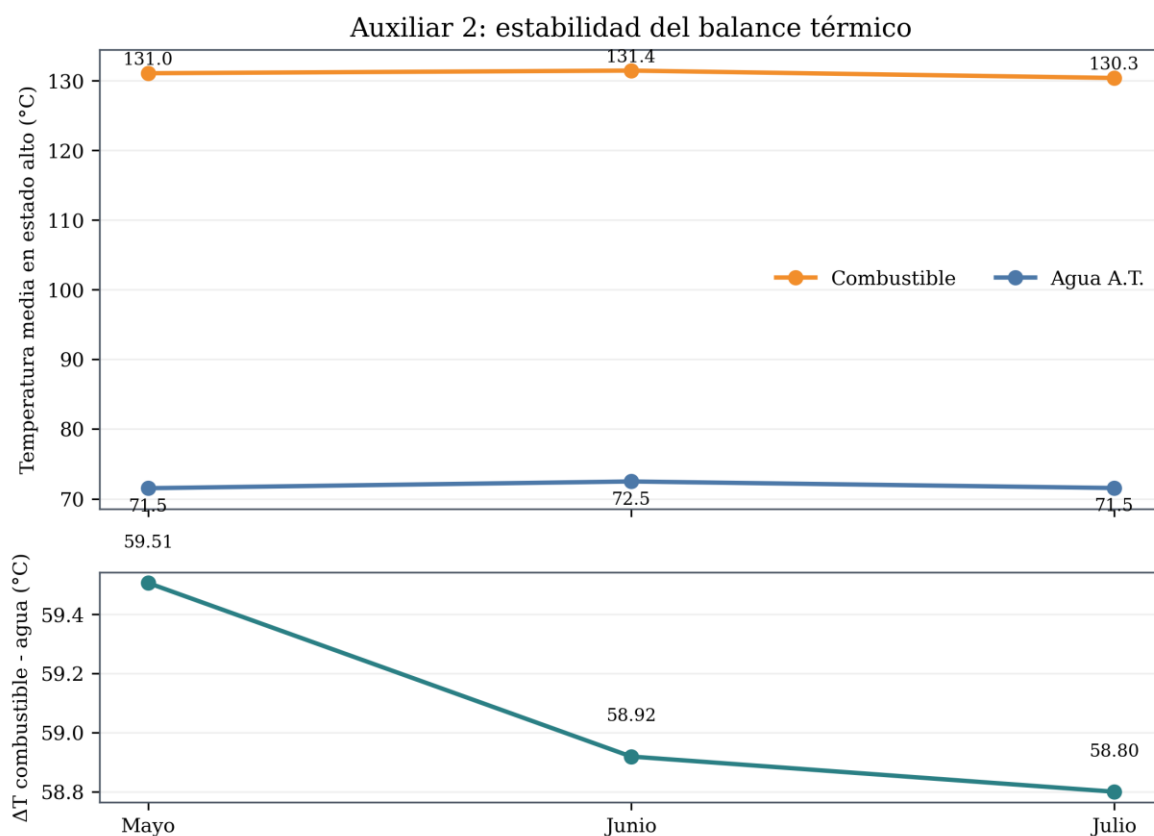
Las temperaturas del estado alto mostraron una referencia muy estable. El combustible se mantuvo en 131,03 °C en mayo, 131,41 °C en junio y 130,35 °C en julio. El agua de alta temperatura registró 71,52 °C, 72,49 °C y 71,55 °C. Más importante aún, la diferencia entre ambos circuitos permaneció en 59,51 °C, 58,92 °C y 58,80 °C. La variación máxima del diferencial fue apenas 0,71 °C entre meses.

La constancia del diferencial constituye una línea base térmica de mayor valor que las dos temperaturas por separado. Mientras ambas puedan cambiar ligeramente por carga o ambiente, la diferencia revela si la transferencia de calor y el equilibrio entre circuitos conservan su relación habitual. Un aumento sostenido del diferencial podría indicar menor disipación en el agua; una reducción persistente podría asociarse con disminución de la temperatura del combustible o cambio en el régimen térmico.

Tabla 19*Balance térmico de la auxiliar 2 durante el estado alto*

Periodo	T combustible	CV combustible	T agua A.T.	CV agua	ΔT (°C)
Mayo 2026	131,03	1,95 %	71,52	5,89 %	59,51
Junio 2026	131,41	3,09 %	72,49	4,38 %	58,92
Julio 2026	130,35	3,46 %	71,55	2,61 %	58,80

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados.

Figura 8*Estabilidad del balance térmico de la auxiliar 2*

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados. El diferencial térmico permanece dentro de una banda estrecha durante los tres periodos.

3.5.2 Lecturas extremas y episodios confirmados

El valor máximo de 195,20 °C en la temperatura de combustible ocurrió el 17 de junio y no continuó con una meseta equivalente. Su amplitud, comparada con un centro alto de 130,99 °C, lo convierte en una lectura que debe pasar por una validación de tasa de cambio. En cambio, la temperatura del agua presentó episodios altos prolongados: el 27 de mayo

permaneció 210 minutos entre 80,30 °C y 81,40 °C. La duración otorga mayor peso técnico a este segundo caso, aunque su máximo sea menor.

El criterio aplicado es sencillo: la severidad no depende solo de la magnitud; también de la permanencia, la repetición y la coincidencia con otras variables. Esta jerarquía coincide con la lógica de diagnóstico recomendada para sistemas navales, donde Jimenez et al. (2020) proponen combinar la anomalía con el contexto operacional antes de convertirla en una orden de mantenimiento.

3.6 Resultados de la máquina auxiliar 3

3.6.1 Línea base del sistema de lubricación

La presión de aceite en estado alto fue 4,95 bar en mayo y 4,83 bar en junio y julio. La temperatura se mantuvo entre 66,89 °C y 67,31 °C. Los coeficientes de variación fueron inferiores a 2,8 % para presión y 1,8 % para temperatura. Estos resultados describen un régimen de lubricación estable y proporcionan una referencia suficientemente estrecha para detectar desplazamientos graduales.

Tabla 20
Comportamiento del sistema de lubricación de la auxiliar 3

Periodo	P aceite	CV presión	T aceite	CV temperatura	Pendiente bar/°C	R ²
Mayo 2026	4,947	2,16 %	66,99	1,71 %	-0,068	0,537
Junio 2026	4,826	2,77 %	67,31	1,73 %	-0,103	0,813
Julio 2026	4,826	2,41 %	66,89	1,38 %	-0,112	0,792

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados.

3.6.2 Relación inversa entre temperatura y presión

Dentro del estado alto, la correlación entre temperatura y presión fue -0,7739. El ajuste lineal global produjo una pendiente de -0,090 bar por cada grado Celsius y un coeficiente de determinación $R^2 = 0,599$. En junio y julio, el R^2 aumentó a 0,813 y 0,792. La relación es

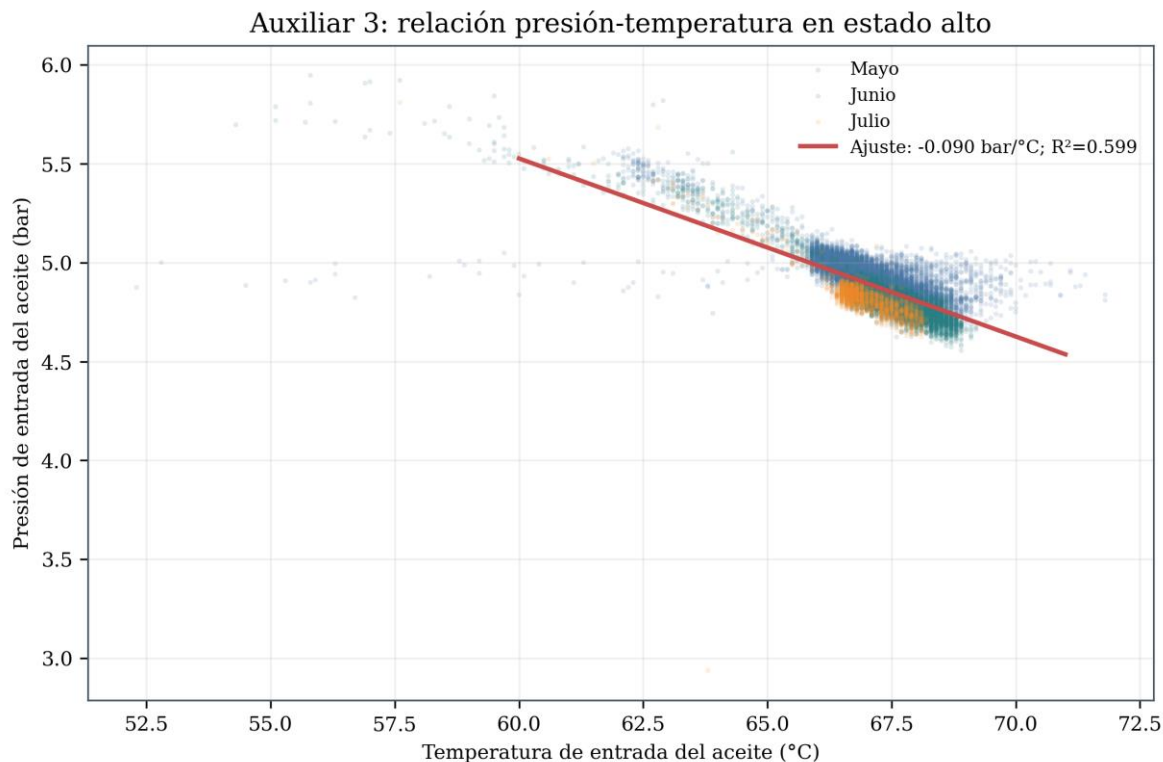
físicamente coherente: al elevarse la temperatura, la viscosidad del lubricante disminuye y la presión medida tiende a reducirse.

$$P_{aceite} = 10,930 - 0,090 * T_{aceite}$$

Esta ecuación no reemplaza el límite del fabricante, pero ofrece un indicador dinámico. En lugar de evaluar la presión con un único umbral, el tablero puede calcular la presión esperada para la temperatura observada y vigilar el residuo entre ambas. Una presión inferior a la prevista para la misma temperatura sería más informativa que una lectura baja sin contexto térmico.

Figura 9

Relación presión-temperatura del aceite en la auxiliar 3



Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados. La pendiente negativa se conserva en los tres meses y es más definida durante junio y julio.

Los picos de presión superiores al percentil 99,5 fueron breves; el mayor duró 22 minutos y alcanzó 6,06 bar. Su coincidencia con temperaturas reducidas es congruente con transitorios de aceite frío. En contraste, una lectura de -4,20 °C carece de continuidad con el

comportamiento térmico del sistema y debe clasificarse como anomalía de canal, no como condición física del lubricante.

3.7 Análisis multivariable de eventos

3.7.1 Concentración de eventos prioritarios

La clasificación estadística ubicó a cada variable en prioridad cuando se situó fuera de sus percentiles 0,5 y 99,5. En 94,98 % de los instantes ninguna señal se encontró en esa condición. Solo 1,60 % presentó dos o más variables prioritarias simultáneas, y 0,33 % alcanzó cuatro o más. La baja frecuencia de coincidencias permite utilizarlas como un filtro de relevancia: cuanto mayor es el número de señales concurrentes, mayor es la probabilidad de que exista un cambio operacional real y no una fluctuación aislada.

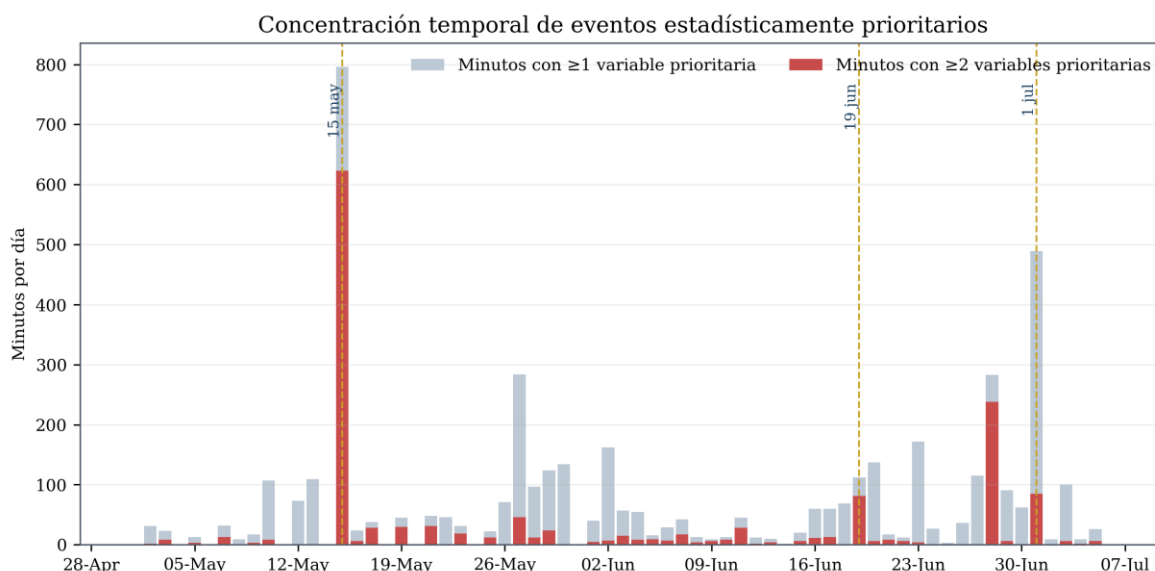
Tabla 21

Concurrencia de variables en condición estadística prioritaria

Concurrencia	Proporción	Lectura técnica
Ninguna variable	94,98 %	Comportamiento dentro de la referencia estadística
Una variable	3,41 %	Revisión individual de señal y tendencia
Dos o más	1,60 %	Evento corroborado; comparar sistemas y bitácora
Tres o más	0,58 %	Evento multivariable de alta relevancia
Cuatro o más	0,33 %	Prioridad de análisis y validación inmediata

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados.

Figura 10
Concentración temporal de eventos estadísticamente prioritarios



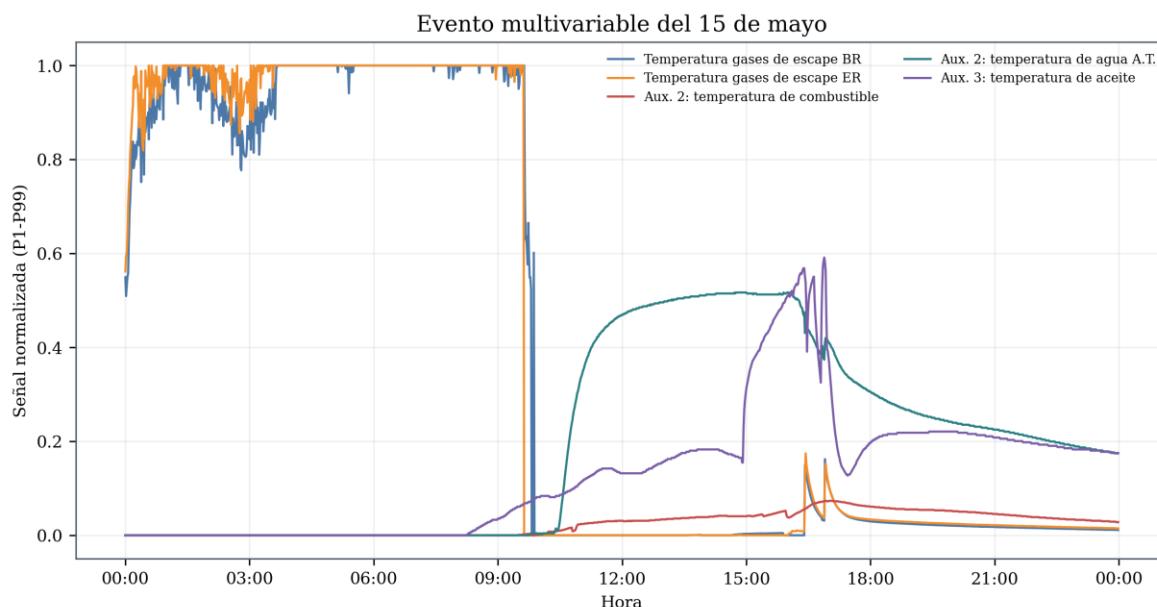
Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados. Los eventos multivariados se agrupan en fechas específicas; no se distribuyen aleatoriamente en todo el periodo.

3.7.2 Evento multivariable del 15 de mayo

Entre 01:11 y 08:47 del 15 de mayo se concentró el episodio multivariable más extenso. Durante 457 minutos coincidieron variables prioritarias y el máximo simultáneo fue de cinco señales. Las temperaturas de escape de ambas máquinas principales se ubicaron en la cola alta, mientras la temperatura del combustible y del agua de la auxiliar 2, junto con la temperatura de aceite de la auxiliar 3, permanecieron en la cola baja.

La combinación no corresponde a un calentamiento general del buque. Describe una configuración en la cual las máquinas principales sostienen una demanda térmica elevada mientras varios circuitos auxiliares se encuentran fríos o en condición reducida. Posteriormente, las temperaturas principales descienden y los circuitos auxiliares comienzan a recuperarse de manera escalonada. Esta secuencia es compatible con una transición operacional compleja, una maniobra o una reconfiguración de equipos. Su valor para mantenimiento reside en mostrar que la misma lectura puede adquirir un significado distinto según el estado del resto de la planta.

Figura 11
Secuencia multivariable del 15 de mayo



Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados. Las señales fueron normalizadas entre los percentiles 1 y 99 para comparar su evolución temporal sin mezclar unidades.

3.7.3 Excursión térmica de las máquinas principales del 19 de junio

El 19 de junio, entre 06:55 y 07:40, las dos temperaturas de escape superaron simultáneamente su percentil 99,5. En ese intervalo, BR alcanzó 724,10 °C y ER 754,70 °C. Las variables auxiliares se mantuvieron en niveles bajos: la presión de aire de carga fue aproximadamente 0,107 bar, la temperatura del combustible de la auxiliar 2 se situó alrededor de 32 °C y la temperatura del aceite de la auxiliar 3 cerca de 29,8 °C.

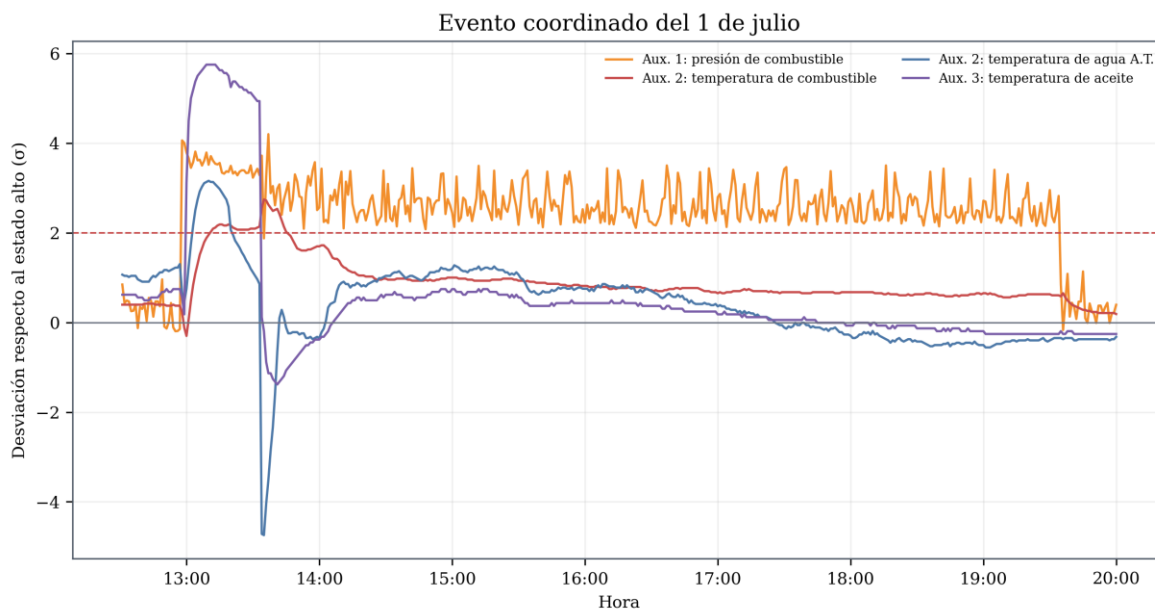
La ausencia de una elevación equivalente en las auxiliares concentra el hallazgo en la propulsión. El evento puede corresponder a una condición de carga puntual, una maniobra o una alteración del proceso de combustión y escape en los motores principales. La coincidencia de BR y ER lo hace más verosímil que un pico de un solo canal. La revisión recomendada comprende el registro de maniobra, carga de los motores, inyección, presión de sobrealimentación, colectores y turbocompresores.

3.7.4 Evento coordinado del 1 de julio

El 1 de julio, entre 13:00 y 14:09, cuatro variables alcanzaron simultáneamente condición prioritaria: presión de combustible de la auxiliar 1, temperatura de combustible y temperatura de agua A.T. de la auxiliar 2, y temperatura de aceite de la auxiliar 3. La presión de combustible llegó a 11,37 bar; el combustible de la auxiliar 2 alcanzó 142,80 °C; el agua A.T. 83,90 °C; y el aceite de la auxiliar 3, 76,20 °C.

La coincidencia térmica entre dos auxiliares y el aumento de presión de combustible sugieren una modificación coordinada del régimen de servicio. El episodio presenta dos etapas: una fase multivariable intensa de aproximadamente 70 minutos y una meseta posterior de presión de combustible que se prolongó hasta las 19:34. Esta diferenciación orienta el diagnóstico: primero debe identificarse la operación que originó el aumento conjunto; después debe revisarse por qué la presión de combustible conservó un nivel elevado cuando las temperaturas ya habían descendido.

Figura 12
Evento coordinado del 1 de julio



Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados. Las señales se expresan en desviaciones estándar respecto de su propia línea base de estado alto. La línea discontinua marca dos desviaciones estándar.

Tabla 22
Eventos de mayor relevancia técnica

Fecha	Tipo de evento	Variables simultáneas	Duración	Rasgo dominante
15 mayo, 01:11-08:47	Transición multivariable	5	457 min	Principales altos; circuitos auxiliares fríos
19 junio, 06:55-07:40	Excursión de principales	2	45 min	Ambas TGE elevadas; auxiliares en estado bajo
29 junio-5 julio	Separación BR/ER	4	7.814 min de cambio sostenido	ER permanece por encima de BR
1 julio, 13:00-14:09	Evento térmico y de combustible	4	70 min	Coincidencia de presión y temperaturas auxiliares

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados.

3.8 Discusión integrada de los resultados

3.8.1 La línea base debe construirse por estado operacional

El primer aporte del análisis es demostrar que una referencia única para toda la serie produce una imagen distorsionada. Las medias globales se alejan de las medianas porque combinan operación y parada. Al segmentar el estado alto, los valores se concentran y la dispersión disminuye de forma drástica. Este resultado coincide con Basurko y Uriondo (2015), quienes señalan que el diagnóstico de motores marinos mejora cuando los parámetros se comparan bajo condiciones equivalentes de funcionamiento.

En términos de implementación, el tablero no debería preguntar únicamente si un valor está alto o bajo. Primero debe identificar el estado del equipo; luego debe comparar la lectura con la referencia correspondiente. Esta lógica reduce falsas alarmas durante arranques y paradas y, al mismo tiempo, aumenta la sensibilidad frente a desviaciones pequeñas que ocurren en régimen estable.

3.8.2 La persistencia y la coincidencia pesan más que el máximo aislado

Los máximos absolutos no fueron necesariamente los hallazgos de mayor importancia. La lectura de 1.176,90 °C en BR tuvo poca continuidad, mientras la diferencia térmica ER-BR de julio fue menor en magnitud, pero se mantuvo durante miles de minutos. Del mismo modo,

el máximo de 195,20 °C en el combustible de la auxiliar 2 fue puntual, mientras la presión de combustible de la auxiliar 1 permaneció elevada durante 397 minutos.

La estrategia debe asignar prioridad mediante tres preguntas: ¿la desviación persiste?, ¿se repite?, ¿aparece acompañada por otra señal coherente? Esta jerarquía guarda relación con la propuesta de Jimenez et al. (2020), que vincula la detección de anomalías con evidencia operacional y registros de mantenimiento, y con el enfoque de Karatuğ y Arslanoğlu (2022), quienes integran varios indicadores para apoyar el diagnóstico de motores de buques.

3.8.3 Los indicadores relacionales son más informativos que los valores aislados

Tres relaciones surgieron como indicadores de alta utilidad. La primera es la diferencia térmica ER-BR, capaz de revelar la separación sostenida que no se aprecia al observar únicamente la correlación. La segunda es el diferencial térmico combustible-agua de la auxiliar 2, que permaneció alrededor de 59 °C y representa el equilibrio del sistema. La tercera es la relación presión-temperatura del aceite de la auxiliar 3, que permite calcular una presión esperada según la condición térmica.

Estos indicadores reducen la dependencia de umbrales fijos. Un valor puede conservarse dentro de un intervalo general y, aun así, apartarse de la relación que históricamente mantiene con otra variable. En mantenimiento basado en condición, esa pérdida de coherencia puede ser una señal temprana de degradación.

3.8.4 Aporte respecto de antecedentes del sector

Zambrano-Ascencio y Pérez-Guerrero (2021) identificaron que en la flota atunera del Pacífico Oriental buena parte de los parámetros de máquinas se registra sin un tratamiento sistemático posterior. Los resultados de este capítulo muestran el valor que puede extraerse de esos registros cuando se ordenan por máquina, estado, relación física y duración. La propuesta no depende de una instrumentación extraordinaria; se apoya en transformar las lecturas ya disponibles en señales de decisión.

La contribución principal no es declarar una falla a partir de un número, sino establecer una ruta reproducible: segmentar, comparar, validar, jerarquizar y actuar. Esta secuencia convierte el dashboard en una herramienta de gestión, en concordancia con la ISO 17359:2018, y evita que el monitoreo quede reducido a una pantalla de tendencias sin respuesta técnica asociada.

3.9 Hallazgos consolidados y decisiones de mantenimiento

Tabla 23

Matriz consolidada de hallazgos

Código	Hallazgo	Evidencia principal	Decisión de mantenimiento
H1	Patrón operacional sincronizado	91,90 % de coherencia conjunta	Usar coincidencia entre equipos para validar transiciones y eventos.
H2	Separación térmica BR/ER	ΔT medio julio = 12,64 °C; 99,44 % sobre límite robusto	Verificar termopares y balance de carga; revisar combustión y T/C si la medición se confirma.
H3	Presiones estables en Aux. 1	Relación combustible/aire entre 3,197 y 3,219	Vigilar el cociente y la desviación de cada lazo respecto de su referencia.
H4	Presión de combustible elevada Aux. 1	397 min el 1 de julio; media 10,69 bar	Revisar regulador, bomba, retorno, filtros, transmisor y consigna.
H5	Balance térmico estable en Aux. 2	ΔT entre 58,80 y 59,51 °C	Adoptar el diferencial como indicador de transferencia térmica.
H6	Relación P-T en lubricación Aux. 3	Pendiente = -0,090 bar/°C; $R^2 = 0,599$	Calcular presión esperada por temperatura y vigilar el residuo.
H7	Eventos multivariantes concentrados	Solo 1,60 % con ≥ 2 variables prioritarias	Dar mayor prioridad a coincidencias que a máximos individuales.
H8	Excursión térmica conjunta	19 de junio: BR 724,10 °C y ER 754,70 °C	Contrastar con maniobra, carga, inyección, escape y turboalimentación.

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados.

3.9.1 Reglas propuestas para el tablero de condición

A partir de los hallazgos se proponen reglas que combinan estado, magnitud, persistencia y concurrencia. La finalidad no es reemplazar las alarmas del fabricante, sino anticipar condiciones que todavía no han alcanzado un disparo y ordenar la revisión del personal de máquinas.

Tabla 24
Reglas de evaluación para la estrategia MBC

Regla	Aplicación	Propósito
R1. Estado	Clasificar cada minuto como bajo, transición o alto antes de evaluar la variable.	Evita comparar parada con operación.
R2. Persistencia	Considerar sostenida una desviación cuando supera el límite durante un periodo definido para el parámetro.	Distingue mesetas de picos puntuales.
R3. Concurrencia	Elevar la prioridad cuando dos o más variables relacionadas cambian en el mismo intervalo.	Aumenta la confiabilidad del hallazgo.
R4. Simetría	Calcular continuamente ER-BR y comparar su mediana móvil con el límite robusto.	Detecta reparto desigual o desplazamiento de sensor.
R5. Relación física	Vigilar ΔT de la auxiliar 2 y el residuo P-T de la auxiliar 3.	Identifica pérdida de coherencia entre variables.
R6. Validación de señal	Marcar saltos incompatibles con la dinámica del sistema y comprobarlos antes de diagnosticar.	Evita órdenes de trabajo por errores de canal.

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados.

3.9.2 Escalamiento de respuesta

Tabla 25
Niveles de respuesta de mantenimiento

Nivel	Criterio	Respuesta
Seguimiento	Valor dentro de la línea base del estado; relación entre variables estable.	Continuar registro y conservar tendencia.
Observación	Desviación breve o una sola variable fuera de referencia.	Verificar sensor, contexto y repetición.
Inspección programada	Desviación persistente, repetitiva o acompañada por otra señal.	Planificar comprobación física, prueba o mantenimiento en la siguiente ventana segura.
Prioridad técnica	Evento multivariable, cambio de simetría sostenido o superación de alarma oficial.	Aplicar procedimiento de fabricante y evaluar intervención inmediata.

Nota. Elaboración propia a partir de los registros operacionales procesados.

En el caso analizado, la separación térmica BR/ER se ubica en inspección programada de prioridad alta por su persistencia; la excursión simultánea del 19 de junio requiere revisión de la bitácora y de los sistemas de combustión y escape; el evento coordinado del 1 de julio debe contrastarse con la operación de los auxiliares; y las lecturas instantáneas incompatibles se canalizan primero como validación de señal.

3.10 Evaluación técnico-económica referencial de la estrategia MBC

La evaluación económica se incorporó como un análisis de sensibilidad destinado a mostrar cómo la estrategia puede traducirse en una decisión de gestión. El criterio empleado no

atribuye al buque un ahorro que no haya sido contabilizado por la empresa; en cambio, relaciona un costo de implementación de bajo nivel con distintos escenarios de gasto anual de mantenimiento. Esta forma de cálculo es coherente con el propósito del mantenimiento basado en condición: intervenir cuando la evidencia lo justifica y desplazar parte del gasto desde reparaciones imprevistas hacia actividades planificadas. En motores diésel marinos, los modelos de decisión basados en condición han sido utilizados para optimizar el momento de reemplazo o intervención de acuerdo con el estado observado del activo (Wang et al., 2012).

3.10.1 Costos referenciales de implementación

La propuesta aprovecha los registros, la instrumentación y el tablero desarrollados durante la investigación; por ello, el costo inicial se concentró en estandarización, verificación, capacitación y organización del flujo de datos. Los valores de la siguiente estimación son referenciales y se emplean únicamente para valorar la magnitud económica del proyecto antes de solicitar cotizaciones formales.

Tabla 26

Estimación referencial de costos para implementar y sostener la estrategia MBC

Concepto	Costo estimado (USD)	Periodicidad
Ajuste final del tablero, reglas y procedimiento MBC	350	Inicial
Verificación/calibración de los canales de medición seleccionados	600	Inicial
Capacitación práctica del personal responsable	300	Inicial
Organización documental, respaldo y trazabilidad de registros	150	Inicial
Instrumentos portátiles y consumibles de verificación	400	Inicial
Contingencia técnica aproximada (10 %)	180	Inicial
Total de inversión inicial	1.980	Inicial
Revisión y gestión de datos	780	Anual
Verificación periódica de instrumentos	400	Anual
Actualización/capacitación de seguimiento	200	Anual
Respaldo y consumibles	120	Anual

Concepto	Costo estimado (USD)	Periodicidad
Total operativo anual	1.500	Anual

Nota. Valores expresados en dólares estadounidenses. La estimación representa un escenario de implementación de bajo costo y debe sustituirse por cotizaciones y costos internos cuando la empresa formalice el programa.

3.10.2 Escenarios de ahorro y periodo de recuperación

Para la sensibilidad económica se adoptó una reducción conservadora equivalente al 10 % del gasto anual de mantenimiento asociado a los motores evaluados. Este porcentaje se utiliza como supuesto de análisis y no como resultado experimental. El ahorro bruto se calculó multiplicando el costo anual de mantenimiento por la tasa de reducción; posteriormente se descontó el costo operativo anual estimado de la estrategia.

Ahorro bruto = Costo anual de mantenimiento * tasa de reducción

Ahorro neto = Ahorro bruto – costo operativo anual de la estrategia

Periodo de recuperación = inversión inicial / ahorro neto anual

Tabla 27

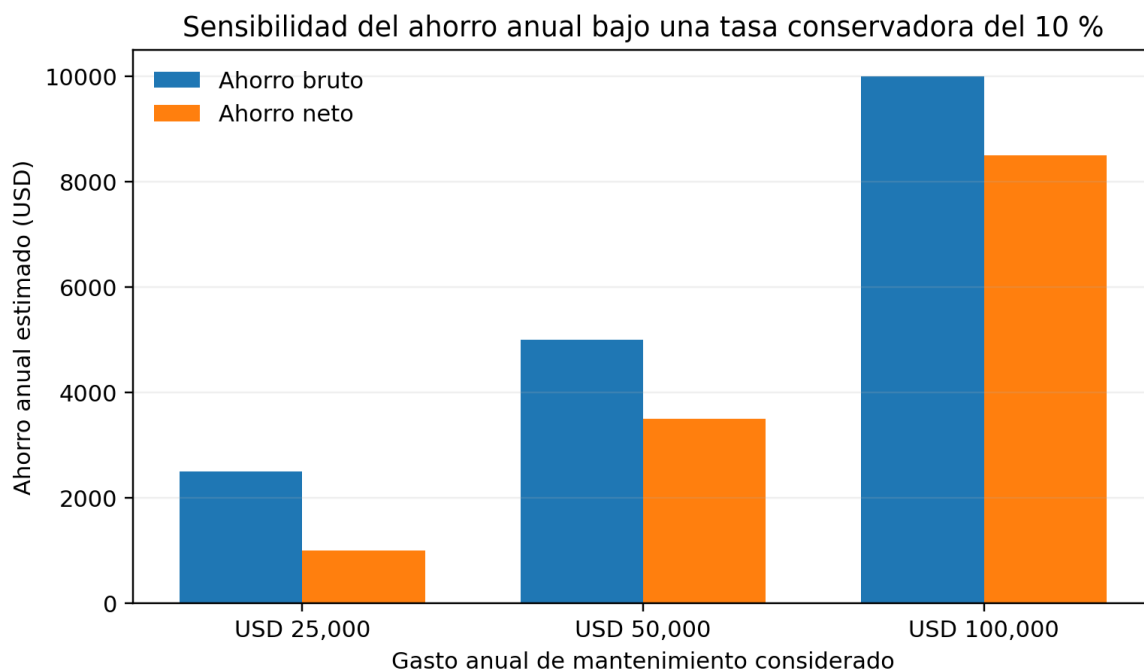
Sensibilidad económica de la estrategia bajo tres niveles de gasto anual

Gasto anual considerado (USD)	Ahorro bruto al 10 % (USD)	Ahorro neto (USD/año)	Recuperación de inversión
25.000	2.500	1.000	1,98 años
50.000	5.000	3.500	0,57 años (≈ 6,8 meses)
100.000	10.000	8.500	0,23 años (≈ 2,8 meses)

Nota. La tasa del 10 % se emplea únicamente como supuesto de sensibilidad. No incluye beneficios por continuidad de la faena, consumo de combustible, daños secundarios o disponibilidad comercial, por lo que el efecto económico total podría ser distinto cuando se incorporen datos contables reales.

Figura 13

Sensibilidad del ahorro anual bruto y neto de la estrategia MBC



Nota. Elaboración propia a partir de los escenarios referenciales de la Tabla 27.

El escenario intermedio permite dimensionar el atractivo económico sin presentar el cálculo como un ahorro ya materializado. Si el gasto anual asociado a los cinco motores se aproximara a USD 50.000, una reducción del 10 % representaría alrededor de USD 5.000 de ahorro bruto anual. Después de cubrir el costo operativo de la estrategia, el ahorro neto referencial sería de USD 3.500 y la inversión inicial se recuperaría en aproximadamente siete meses. La principal utilidad de este resultado es ofrecer una base para que la empresa reemplace los supuestos por sus propios costos de repuestos, mano de obra, servicios y tiempo fuera de operación.

3.11 Conclusiones parciales del capítulo

1. El comportamiento de las cinco máquinas presenta una organización operacional común. El 91,90 % de los registros correspondió a estados conjuntos altos o bajos, lo que permite usar la sincronía como criterio para interpretar transiciones y validar eventos.

2. La segmentación por estado transformó la calidad del diagnóstico. Los coeficientes de variación del régimen alto quedaron entre 2,38 % y 6,54 %, muy por debajo de la dispersión obtenida al mezclar operación y parada.

3. Las máquinas principales conservaron una correlación elevada, pero desarrollaron una separación térmica sostenida desde el 29 de junio. En julio, ER superó a BR en 12,64 °C como promedio y el 99,44 % del tiempo pareado excedió el límite robusto de referencia.

4. La auxiliar 1 mantuvo una relación de presiones estable, aunque presentó una meseta de presión de combustible de 397 minutos el 1 de julio, hallazgo que debe conducir a la comprobación del circuito y del transmisor.

5. La auxiliar 2 mostró un diferencial térmico combustible-agua cercano a 59 °C durante los tres meses, condición que puede adoptarse como línea base para vigilar el desempeño térmico.

6. La auxiliar 3 evidenció una relación inversa y repetible entre temperatura y presión del aceite. El modelo obtenido permite incorporar un indicador residual más sensible que un umbral fijo de presión.

7. Los eventos con mayor valor técnico fueron aquellos que combinaron persistencia y concurrencia: la transición multivariable del 15 de mayo, la excursión térmica conjunta del 19 de junio, el cambio de simetría iniciado el 29 de junio y el evento coordinado del 1 de julio.

8. La estrategia resultante establece una secuencia práctica de mantenimiento basado en condición: identificar el estado, comparar con la línea base correspondiente, comprobar persistencia, buscar corroboración multivariable y asignar una respuesta escalonada.

Conclusiones

1. El análisis de la gestión de mantenimiento y de la documentación técnica vinculada con los motores permitió establecer que los registros operacionales disponibles constituyen una fuente útil para complementar la planificación del mantenimiento. Su aprovechamiento dentro de una estrategia basada en condición requiere relacionar la información histórica de cada equipo con su contexto de funcionamiento, manteniendo como referencia los límites establecidos por el fabricante y las actividades de mantenimiento preventivo. De esta manera, la información registrada deja de utilizarse únicamente como constancia operacional y adquiere utilidad para el seguimiento técnico de la maquinaria.
2. La evaluación de los registros permitió identificar que las variables de temperatura y presión asociadas a los sistemas de combustible, refrigeración y lubricación presentan especial utilidad para caracterizar el comportamiento de los motores estudiados. Su valor diagnóstico aumentó al analizarlas de manera conjunta y considerar diferencias, relaciones y evolución temporal, en lugar de evaluarlas únicamente mediante valores aislados. Esto permitió reconocer comportamientos propios de cada máquina y seleccionar las variables con mayor capacidad para representar cambios en sus condiciones de operación.
3. El procedimiento de procesamiento y comparación desarrollado permitió establecer referencias de comportamiento diferenciadas según el estado operacional de los motores. La separación de los registros en periodos de parada, transición y funcionamiento estable evitó que una única media general ocultara condiciones técnicamente distintas y permitió construir líneas base más representativas para cada equipo. Estas referencias proporcionaron un criterio de comparación para evaluar los registros posteriores e identificar cambios respecto al comportamiento habitual de la maquinaria.

4. La interpretación de las tendencias demostró que los eventos de mayor interés para el mantenimiento no corresponden necesariamente a los valores máximos o mínimos registrados, sino a aquellos que presentan persistencia, repetición o coincidencia entre varias variables. Bajo este criterio, en las máquinas principales se identificó una separación térmica sostenida al cierre de junio y durante julio; en la máquina auxiliar 1, una meseta prolongada en la presión de combustible; en la auxiliar 2, un diferencial térmico combustible-agua cercano a 59 °C como referencia de comportamiento; y en la auxiliar 3, una relación inversa repetible entre la temperatura y la presión del aceite lubricante. Estos resultados permitieron diferenciar variaciones propias de la operación de eventos que requieren seguimiento o verificación técnica.
5. A partir de los resultados obtenidos se estructuraron reglas de seguimiento y niveles de respuesta para su incorporación al tablero de mantenimiento basado en condición. La estrategia establece una secuencia que comprende la identificación del estado operacional del motor, la comparación de cada parámetro con su línea base, la evaluación de la persistencia y concurrencia de las desviaciones, la verificación de la confiabilidad de la medición y la asignación de un nivel de respuesta. Con esta estructura, el tablero funciona como una herramienta de apoyo para priorizar verificaciones e inspecciones y sustentar las decisiones de mantenimiento mediante el comportamiento observado de cada máquina.
6. Desde la perspectiva económica, la implementación puede desarrollarse con una inversión referencial cercana a USD 1.980 y un costo operativo anual aproximado de USD 1.500 cuando se aprovechan la instrumentación y el tablero existentes. En un escenario conservador donde el gasto anual de mantenimiento de los cinco motores fuese de USD 50.000 y la estrategia contribuyera a reducirlo en 10 %, el ahorro bruto rondaría USD 5.000 por año y el ahorro neto, después del costo operativo de la estrategia, sería cercano a USD

3.500. Bajo estas condiciones, la recuperación de la inversión inicial se produciría aproximadamente en siete meses. Este resultado debe interpretarse como un escenario de sensibilidad que podrá recalcularse con los costos contables reales de la empresa.

Recomendaciones

1. Incorporar el tablero de condición a la rutina de revisión de máquinas, con una verificación breve durante la operación y una revisión técnica consolidada al finalizar cada periodo de trabajo.
2. Comprobar la calibración y trazabilidad de los sensores asociados con desviaciones sostenidas antes de atribuir el comportamiento exclusivamente a una condición mecánica del motor.
3. Conservar las líneas base por régimen operacional y actualizarlas después de reparaciones mayores, cambios de sensor, modificaciones del sistema o variaciones permanentes de la forma de operar la máquina.
4. Registrar en la misma línea temporal las actividades de mantenimiento, cambios de carga, alarmas, maniobras y observaciones del personal. Esta anotación facilitará relacionar una variación con su causa probable y reducirá interpretaciones ambiguas.
5. Ampliar de manera progresiva la estrategia con análisis de aceite, vibraciones o termografía en aquellos modos de falla cuya evaluación no pueda resolverse únicamente con presión y temperatura.
6. Utilizar los límites de fabricante y los sistemas de protección como referencia de seguridad, mientras que las reglas estadísticas del tablero deben emplearse como niveles de atención temprana y nunca como sustituto de una alarma o disparo de protección.
7. Actualizar el análisis económico con los costos reales de repuestos, servicios, horas de personal, reparaciones no programadas y pérdida de disponibilidad. Esto permitirá calcular un retorno de inversión propio de la embarcación y priorizar las ampliaciones de instrumentación con mayor beneficio técnico.

Referencias

- American Bureau of Shipping. (2023). Guide for surveys based on machinery reliability and maintenance techniques. https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/survey_and_inspection/121-guide-for-surveys-based-on-machinery-reliability-and-maintenance-techniques/MRM_Guide_e-Jan23.pdf
- Basurko, O. C., & Uriondo, Z. (2015). Condition-based maintenance for medium speed diesel engines used in vessels in operation. *Applied Thermal Engineering*, 80, 404–412. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.075>
- Bureau Veritas. (2024). NI684: Guidelines for condition based maintenance. <https://marine-offshore.bureauveritas.com/ni684-guidelines-condition-based-maintenance>
- Castresana Larrauri, J. A. (2022). Análisis de metodologías de modelado de motores diésel marinos para su diagnóstico y mantenimiento basado en condiciones [Tesis doctoral, Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea]. ADDI. <https://addi.ehu.eus/handle/10810/58632>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications. <https://books.google.com/books?id=335ZDwAAQBAJ>
- International Maritime Organization. (2023). Fishing safety management code, 2023. https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/20230217_Fishing%20Safety%20Management%20Code%202023.pdf
- International Maritime Organization. (s. f.). International Safety Management (ISM) Code. <https://www.imo.org/en/ourwork/humanelement/pages/ismcode.aspx>
- International Organization for Standardization. (1995). Mechanical vibration—Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts—Part 6: Reciprocating

machines with power ratings above 100 kW (ISO Standard No. 10816-6:1995).

<https://www.iso.org/standard/1553.html>

International Organization for Standardization. (2003). Condition monitoring and diagnostics of machines—Data processing, communication and presentation—Part 1: General guidelines (ISO Standard No. 13374-1:2003). <https://www.iso.org/standard/21832.html>

International Organization for Standardization. (2008). Condition monitoring and diagnostics of machines—Thermography—Part 1: General procedures (ISO Standard No. 18434-1:2008). <https://www.iso.org/standard/41648.html>

International Organization for Standardization. (2016). Petroleum, petrochemical and natural gas industries—Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment (ISO Standard No. 14224:2016). <https://www.iso.org/standard/64076.html>

International Organization for Standardization. (2018). ISO 17359:2018: Condition monitoring and diagnostics of machines—General guidelines. <https://www.iso.org/standard/71194.html>

International Organization for Standardization. (2019a). Condition monitoring and diagnostics of machine systems—Tribology-based monitoring and diagnostics—Part 1: General requirements and guidelines (ISO Standard No. 14830-1:2019). <https://www.iso.org/standard/69304.html>

International Organization for Standardization. (2019b). Condition monitoring and diagnostics of machine systems—Thermography—Part 2: Image interpretation and diagnostics (ISO Standard No. 18434-2:2019). <https://www.iso.org/standard/67617.html>

International Organization for Standardization. (2024a). Asset management—Asset management system—Requirements (ISO Standard No. 55001:2024). <https://www.iso.org/standard/83054.html>

- International Organization for Standardization. (2025a). Condition monitoring and diagnostics of machine systems—Data interpretation and diagnostics techniques—Part 1: General guidelines (ISO Standard No. 13379-1:2025). <https://www.iso.org/standard/88027.html>
- International Organization for Standardization. (2025b). Condition monitoring and diagnostics of machine systems—Prognostics—Part 1: General guidelines and requirements (ISO Standard No. 13381-1:2025). <https://www.iso.org/standard/88029.html>
- Jimenez, V. J., Bouhmala, N., & Gausdal, A. H. (2020). Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(4), 358–386. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.03.003>
- Karatuğ, Ç., & Arslanoğlu, Y. (2022). Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems. *Ocean Engineering*, 256, 111515. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111515>
- Lazakis, I., Raptodimos, Y., & Varelas, T. (2018). Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks. *Ocean Engineering*, 152, 404–415. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.017>
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. <https://www.sciencedirect.com/book/9780750675314/an-introduction-to-predictive-maintenance>
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press. <https://books.industrialpress.com/9780831131463/reliability-centered-maintenance/>
- Wang, W., Hussin, B., & Jefferis, T. (2012). A case study of condition based maintenance modelling based upon the oil analysis data of marine diesel engines using stochastic filtering. *International Journal of Production Economics*, 136(1), 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.09.016>
- Zambrano-Ascencio, J. A., & Pérez-Guerrero, J. N. (2021). Caracterización del estado de aplicación de las técnicas de mantenimiento predictivo de la flota atunera industrial que

opera en el Pacífico Oriental. Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación, 4(8, edición especial), 79–95.

<https://doi.org/10.46296/ig.v4i8edespdic.0052>