

**PMO y CBM EN MOTORES A GAS: UN ENFOQUE INTEGRAL DE GESTIÓN DE ACTIVOS
PARA MEJORAR COSTOS Y PRESUPUESTOS.**

Jorge Alexander Ariza Ariza

Diego Fernando Castaño Ramírez

Escuela de Ingenierías, Universidad del Valle, Cali

Nota del autor

Jorge Ariza, Diego Castaño; Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle, Cali. Año de publicación 2026.

Este documento cuenta con la dirección del profesor Luis Alberto Mora Gutiérrez.

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

Cualquier mensaje con respecto a este trabajo debe ser enviado a la escuela de ingeniería de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.

E-mail: ariza.jorge@Correounivalle.edu.co - diego.castano.ramirez@correounivalle.edu.co

Resumen

El presente trabajo desarrolla un modelo técnico y estratégico orientado a optimizar la gestión del mantenimiento de un motor a gas industrial que opera en régimen continuo, específicamente un Caterpillar CAT 3412 clasificado como un activo crítico dentro del sistema de generación. Este enfoque responde al propósito general del trabajo, que busca fortalecer la toma de decisiones basada en la condición real del activo a través de herramientas de análisis, criterios técnicos y una visión integral de la Gestión de Activos. Bajo esta perspectiva, el lubricante se analiza como un componente clave para interpretar el comportamiento interno del motor, anticipar desviaciones y sustentar decisiones alineadas con los objetivos de confiabilidad y disponibilidad del equipo (Ali & Abdelhadi, 2022a; Jardine et al., 2006a).

Para dar cumplimiento a los objetivos relacionados con la caracterización del comportamiento del lubricante y el diagnóstico del motor, el estudio articula datos operativos, registros históricos y resultados de laboratorio, permite construir una visión clara y sustentada sobre los mecanismos de degradación presentes. Esta integración facilita comprender cómo las condiciones térmicas, mecánicas y químicas asociadas a la operación 24/7 impactan la evolución del aceite, aporta elementos técnicos para evaluar distintos escenarios de mantenimiento. A partir de ello se comparan la estrategia tradicional por horas y propuestas optimizadas que fundamentan el intervalo de cambio exclusivamente en la condición real del lubricante (Tormos, 2013a; Wakiru et al., 2019a).

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que el aceite mantiene estabilidad en parámetros críticos durante periodos superiores a los considerados convencionalmente. Este hallazgo se alinea con los objetivos orientados a validar la viabilidad de intervalos extendidos sin comprometer la confiabilidad del motor ni la continuidad del proceso de generación. De igual forma, la evaluación económica asociada demuestra reducciones significativas del OPEX,

mientras que el análisis estratégico evidencia mejoras en disponibilidad, continuidad operacional y disminución de residuos industriales, fortalece la propuesta de valor del modelo desarrollado (Ahmad & Kamaruddin, 2012a; Raposo et al., 2019a).

Finalmente, el modelo propuesto aporta a los objetivos orientados a la integración del enfoque basado en condición dentro del Sistema de Gestión de Activos, al plantear lineamientos para su implementación en plataformas digitales como SAP PM. Con ello se asegura trazabilidad, soporte a la toma de decisiones y fortalecimiento de la gobernanza del mantenimiento en entornos industriales de alta criticidad. Esta articulación convierte la propuesta en una alternativa robusta para evolucionar desde un mantenimiento preventivo hacia un esquema centrado en la condición real del activo, completamente coherente con los principios de ciclo de vida y gestión del riesgo (Kumar et al., 2013a).

Este planteamiento inicial se enlaza de manera directa con los objetivos específicos del trabajo, en particular con el análisis tribológico y la formulación de escenarios de mantenimiento. De esta forma, la propuesta metodológica avanza de la caracterización del lubricante hacia la construcción de tendencias y la evaluación comparativa de intervalos, asegura coherencia y progresión en el desarrollo del modelo PMO + CBM.

Palabras clave: motores a gas, CAT 3412, optimización del mantenimiento, CBM, tribología, gestión de activos, OPEX, SAP PM.

Abstract

This work presents a technical and strategic model designed to optimize maintenance management for an industrial gas engine operating continuously under high-demand conditions. The study focuses on a Caterpillar CAT 3412 unit classified as a critical asset within the facility's power generation system, where availability, operational continuity, and risk control are fundamental for business performance. The general purpose of the project is addressed through an asset-management-oriented approach that incorporates condition-based decision making, reliability principles, and life-cycle considerations. In this context, the lubricant is analyzed as an internal indicator of mechanical condition, enabling a deeper understanding of degradation mechanisms and supporting informed maintenance decisions.

To meet the objectives related to the characterization of lubricant behavior and the diagnostic assessment of the engine, the study integrates operational data, historical maintenance records, and laboratory analyses. This combination provides a comprehensive view of how physical-chemical and wear parameters evolve under real operating conditions and how these changes reflect the mechanical state of the asset. The findings support the comparison of traditional time-based maintenance practices with optimized scenarios that rely exclusively on lubricant condition as the primary criterion for defining oil-change intervals.

The results show that the lubricant remains stable in critical parameters for longer periods than conventionally expected, validating the feasibility of safely extending the oil-change interval without compromising engine reliability or the continuity of the generation process. These insights directly support the objectives focused on evaluating technical viability, operational continuity, and risk mitigation. Additionally, the economic assessment demonstrates significant reductions in OPEX related to consumables, labor, and intervention hours, while the

strategic analysis evidences improvements in availability, operational efficiency, and waste reduction.

The proposed model contributes to the objectives aimed at integrating condition-based approaches into the broader Asset Management System by outlining guidelines for implementation within digital platforms such as SAP PM. This integration enhances traceability, supports decision-making processes, and strengthens maintenance governance in high-criticality industrial environments. Ultimately, the model presents a robust pathway for transitioning from conventional preventive maintenance toward a condition-driven strategy aligned with life-cycle optimization and asset-value creation principles.

This initial approach directly connects with the specific objectives of the study, particularly the tribological analysis and the formulation of maintenance scenarios. In this way, the methodological proposal progresses from lubricant characterization toward the construction of trends and the comparative evaluation of intervals, ensuring coherence and continuity in the development of the PMO + CBM model.

Keywords: gas engines, CAT 3412, maintenance optimization, condition-based maintenance, tribology, asset management, OPEX, SAP PM.

Contenido

Resumen	2
Abstract	4
Contenido	6
Tablas	9
Ilustración	10
Introducción	11
Contexto Operacional.....	13
Planteamiento del problema u oportunidad	16
Límites del problema u oportunidad	18
Alcance del estudio.....	20
Justificación	22
Viabilidad de la idea del trabajo de profundización.....	26
Objetivos.....	28
Objetivo General	30
Objetivos específicos	32
Objetivo específico uno – Línea Base.	33
Objetivo específico dos – Análisis Tribológico.....	34
Objetivo específico tres – Plan de Muestreo.....	35
Objetivo específico cuatro – Tendencias de resultados.	36
Objetivo específico cinco – Escenarios de Intervalos.	38
Objetivo específico sexto – Planes de Mantenimiento.	39
Marco teórico.....	41
Antecedentes de la investigación o del proyecto	41
Estado del arte	43
Gestión de activos y ciclo de vida	45
Optimización de planes de mantenimiento (PMO)	47
Mantenimiento basado en condición (CBM).....	49
Tribología como herramienta de CBM.....	51
Indicadores de Desempeño	53
Metodología	55
Enfoque metodológico	56
Fases.....	56
Fase 1 — Diagnóstico técnico-operativo	56
Fase 2 — Diseño del plan de muestreo tribológico	57
Fase 3 — Definición de criterios técnicos de decisión (CBM).....	57
Fase 4 — Implementación piloto del modelo CBM	58
Fase 5 — Evaluación mediante KPIs estandarizados	58
Fase 6 — Estandarización del modelo optimizado en SAP PM.....	59
Resultados esperados.....	60
Dimensión Económica	60
Dimensión Técnica.....	60
Dimensión Estratégica	61
Síntesis Integrada	62
KPIs	62
Indicadores económicos	63
Indicadores Técnicos	63

Indicadores Organizativos	64
Desarrollo Objetivos	67
Objetivo Específico Uno – Línea Base de Mantenimiento	67
Introducción al objetivo y su papel dentro del modelo PMO + CBM	67
Importancia operativa del motor Caterpillar 3412 en el sistema de generación	69
Situación actual del plan de mantenimiento existente (OEM + SAP PM)	70
Análisis crítico del enfoque calendarizado	71
Limitaciones identificadas en el modelo actual	72
Necesidad de establecer la línea base	72
Estructura oficial del plan de mantenimiento actual (OEM + SAP PM)	74
Indicadores de desempeño de la línea base (UNE 15341 y práctica)	75
Impacto estratégico y ambiental de la línea base	76
Discusión crítica de la línea base	77
Conclusión del objetivo y vínculo con objetivos siguientes	78
Objetivo específico dos – Análisis Tribológico	79
Introducción	79
Rol estratégico del lubricante en motores a gas	80
Tribología dentro de la gestión de activos	81
Gestión del paquete de aditivos	81
Relación tribología–operación	82
Resultados de laboratorio y análisis técnico del lubricante.	87
Análisis del muestreo #1 – 750 horas.	89
Conclusión del Muestreo #1 – 750 horas.	91
Discusión crítica	92
Impacto estratégico y ambiental	92
Conclusión del objetivo	93
Objetivo Específico Tres – Plan de Muestreo	93
Introducción del objetivo	93
Fundamentación técnica del plan dentro del modelo PMO + CBM	94
Análisis de criticidad del sistema lubricante	94
Plan de Muestreo Tribológico para Motores Caterpillar 3412 GAS	95
Justificación del plan de muestreo en motores a gas	96
Enfoque Metodológico del Plan de Muestreo	98
Integración del plan de muestreo a SAP PM y a la gestión de activos	98
Beneficios del plan de muestreo dentro del modelo PMO + CBM	99
Secuencia operativa del plan PMO + CBM	101
Impacto técnico y económico	102
Conclusión del objetivo	102
Objetivo Específico Cuatro – Tendencias de Resultados	102
Introducción: el papel de las tendencias en la toma de decisiones	102
Marco normativo que soporta el análisis comparativo	104
Descripción del conjunto de datos evaluado	105
Análisis técnico de tendencias tribológicas	105
Integridad del paquete de aditivos	106
Interpretación global de tendencias	108
Relación entre tendencias y confiabilidad del activo	109
Interpretación global de tendencias	110
Discusión crítica: brechas, riesgos y digitalización	111
Impacto estratégico y ambiental	112
Objetivo específico cinco – Escenarios de Intervalos	112
Propósito del objetivo y alineación con la gestión de activos	112

Descripción general del sistema y condicionantes operativos	113
Fundamentación técnica para la evaluación de escenarios	115
Definición de escenarios analizados	116
Evaluación estratégica: impacto en la gestión de activos	118
Evaluación estratégica: impacto en la gestión de activos	120
Discusión crítica y validación académica	121
Objetivo Específico Seis – Actualización del Plan de Mantenimiento Optimizado	122
Propósito del objetivo y conexión con el entregable anterior	122
Estructura del plan de mantenimiento actual	123
Limitaciones del plan actual	123
Propuesta de actualización del plan optimizado	123
Impacto técnico del plan optimizado	124
Impacto económico del plan optimizado	125
Impacto ambiental del plan optimizado	125
Integración en SAP PM y trazabilidad	126
Discusión crítica y validación académica	126
Síntesis y transición al objetivo siguiente	126
Recomendación técnica y alineación estratégica	126
Descripción de cómo se alcanza el logro de objetivos	128
Objetivo Específico Uno – Línea Base de Mantenimiento	128
Objetivo Específico Dos – Análisis Tribológico	129
Objetivo Específico Tres – Plan de Muestreo	129
Objetivo Específico Cuatro – Tendencias de Resultados	130
Objetivo Específico Cinco – Escenarios de Intervalos de Cambio de Aceite	130
Objetivo Específico Seis – Conclusiones Integradas y Validación del Modelo PMO + CBM	131
Síntesis final de logros	132
Resultados más relevantes	133
Conclusiones	134
Conclusiones técnicas	134
Conclusiones económicas	135
Conclusiones ambientales	135
Conclusiones estratégicas	135
Recomendaciones	136
Recomendaciones técnicas	136
Recomendaciones económicas	136
Recomendaciones ambientales	137
Recomendaciones estratégicas	137
Síntesis final de la investigación	138
Referencias	139

Tablas

Tabla 1 Frecuencias Mantenimientos recomendados por Caterpillar en Motores	24
Tabla 2 Comparación de reducción OPEX	65
Tabla 3 Plan de Mantenimiento actual – Motor Caterpillar 3412	73
Tabla 4 Principales parámetros tribológicos en motores de gas	83
Tabla 5 Modos de degradación del motor Caterpillar 3412 GAS	84
Tabla 6 Matriz de relación entre parámetros tribológicos, condiciones anormales y modos de falla	86
Tabla 7 Muestreo Aceite #1 – 750 Horas	88
Tabla 8 Resultados del muestreo de aceite #1 – 750 horas de operación	90
Tabla 9 Resumen del Plan de Muestreo Tribológico – 750 horas de operación	97
Tabla 10 Frecuencia de muestreo	100
Tabla 11 Parámetros críticos del análisis	100
Tabla 12 Límites operativos, umbrales y criterios de alerta	101
Tabla 13 Evolución de parámetros tribológicos – Muestra 1 vs Muestra 2	110
Tabla 14 Escenarios de cambio de aceite en el motor Caterpillar 3412 GAS	117
Tabla 15 Análisis económico de los escenarios	119
Tabla 16 Cuadro de Impacto – Escenario 2.500 h	124
Tabla 17 Impacto económico del plan optimizado	125
Tabla 18 Estructura metodológica de los objetivos específicos: propósito, insumos y resultados esperados	128

Ilustración

<i>Ilustración 1 Jerarquía taxonómica de los objetivos</i>	<i>30</i>
---	------------------

Introducción

La gestión del mantenimiento en sistemas industriales de alta criticidad exige decisiones fundamentadas en información confiable, metodologías estructuradas y criterios que consideren el comportamiento real de los activos a lo largo de su ciclo de vida. En este contexto, el mantenimiento basado en condición se consolida como una evolución natural frente a los esquemas puramente calendarizados, ya que interpreta datos de operación, degradación y riesgo para respaldar la toma de decisiones en entornos operativos complejos. Este enfoque aporta una visión más integral del desempeño del activo y conecta directamente con los principios rectores de la Gestión de Activos, que promueven la optimización del valor, la confiabilidad y la sostenibilidad del sistema (Jardine et al., 2006a; Li et al., 2020a; Quatrini et al., 2020a).

Dentro de este panorama, los motores a gas utilizados en procesos de compresión, generación y cogeneración asumen un rol estratégico en la cadena energética. Su desempeño define no solo la continuidad operativa, sino también la eficiencia del uso de los recursos y el impacto económico del mantenimiento. En activos como el Caterpillar CAT 3412, cuya operación es continua y soporta servicios esenciales, las decisiones de mantenimiento adquieren un carácter altamente crítico. Investigaciones recientes destacan que la optimización del comportamiento del motor y de sus servicios auxiliares constituye un factor determinante para la competitividad, la reducción de costos y la sostenibilidad ambiental de las organizaciones industriales (Ali & Abdelhadi, 2022a; Pytel et al., 2025a).

El lubricante ocupa un lugar central en este análisis, no solo por su función tradicional de reducir la fricción, sino por su capacidad para registrar información sobre los procesos internos del motor. La composición química, los productos de degradación, las partículas metálicas y los cambios en el comportamiento reológico del aceite permiten interpretar el

estado mecánico del equipo y anticipar desviaciones que pueden comprometer su desempeño. La literatura especializada reconoce al análisis de aceite como una de las herramientas más sensibles para el diagnóstico de condiciones anómalas, la detección temprana de fallas y la evaluación del comportamiento del activo bajo diferentes regímenes de carga (Tormos, 2013a; Wakiru et al., 2019a; Zhu et al., 2017a).

La tribología aporta el marco conceptual que permite interpretar esta información con rigor técnico. Las señales derivadas del lubricante reflejan fenómenos como desgaste adhesivo y abrasivo, formación de grietas, envejecimiento térmico, oxidación, nitración y pérdida de efectividad de los aditivos, todos ellos vinculados a los mecanismos de deterioro de los componentes críticos del motor. Estudios recientes evidencian la relación entre la selección del lubricante, las condiciones de contacto y la aparición de daños en rodamientos, superficies de rodadura y zonas sometidas a cargas dinámicas, además de destacar la utilidad de técnicas espectroscópicas y reológicas para caracterizar la degradación del aceite en motores a gas de mediana y gran potencia (Paladugu et al., 2018a; Wolak et al., 2020a).

A pesar de estos avances, en numerosas instalaciones el cambio de aceite aún se define mediante intervalos fijos de operación, sin considerar la variabilidad del proceso ni el comportamiento real del lubricante en cada condición de servicio. Esta práctica genera dos riesgos contrapuestos: por un lado, intervenciones prematuras que incrementan el consumo de recursos y la generación de residuos; por otro, intervenciones tardías que elevan la probabilidad de falla, reducen la disponibilidad del activo y aumentan los costos asociados a la indisponibilidad. La evidencia técnica señala que estas decisiones tienen un impacto directo en el desempeño económico y operacional del motor, así como en su aporte al proceso productivo global (Ahmad & Kamaruddin, 2012a; Telford et al., 2011a).

Frente a este escenario, el presente trabajo orienta su propósito hacia el diseño y validación de un intervalo de cambio de aceite sustentado en condición para un motor a gas de alta criticidad. Para ello se integran tendencias tribológicas, características operativas del CAT 3412 y criterios de mantenimiento basado en datos, con el fin de proponer un modelo que equilibra confiabilidad, costo y sostenibilidad. Este enfoque contribuye al cumplimiento de los objetivos específicos del estudio, orientados a caracterizar el comportamiento del lubricante, evaluar su relación con la condición del motor, analizar la viabilidad de intervalos extendidos y establecer lineamientos para su integración dentro del Sistema de Gestión de Activos de la organización (Li et al., 2020a; Raposo et al., 2019a).

Este planteamiento inicial se enlaza con los objetivos específicos del estudio, que desarrollan la caracterización del lubricante, el análisis tribológico y la formulación de escenarios de mantenimiento. De esta manera, la investigación avanza de la descripción del problema hacia la construcción de un modelo PMO + CBM coherente y aplicable en la gestión de activos.

Contexto Operacional

El motor Caterpillar CAT 3412 a gas evaluado en este estudio opera como un componente esencial dentro del sistema de generación eléctrica de la organización, donde su función principal consiste en suministrar energía de manera continua para garantizar la estabilidad operativa de las instalaciones y la disponibilidad de los equipos asociados. Esta condición convierte al motor en un activo de alta criticidad, ya que cualquier alteración en su desempeño impacta la continuidad del suministro, los costos operativos y los indicadores de servicio asociados al proceso. Desde la perspectiva de la Gestión de Activos, los motores utilizados en generación eléctrica se catalogan como activos estratégicos debido a su influencia directa en la seguridad operativa, la eficiencia energética y la sostenibilidad del sistema. Este

contexto aporta elementos clave para los objetivos del trabajo, orientados a comprender la condición del motor y evaluar alternativas de mantenimiento que aporten confiabilidad y continuidad al proceso (Carnero et al., 2023a; Kumar et al., 2013a).

Las condiciones reales de operación del CAT 3412 afectan de manera directa la evolución del lubricante dentro del motor y determinan su capacidad para conservar sus propiedades protectoras a lo largo del tiempo. Fluctuaciones en la carga eléctrica, variaciones en la temperatura del aceite, cambios en la mezcla aire–combustible y diferencias en la calidad del gas influyen en los procesos de oxidación, nitración, degradación térmica y estabilidad de los aditivos, así como en la formación de productos de desgaste. La evidencia técnica demuestra que la interacción entre lubricante, temperatura y demanda mecánica condiciona la generación de partículas metálicas, la degradación termo-oxidativa y la evolución de los modos de deterioro característicos de motores sometidos a operación continua. Estos elementos se relacionan directamente con el objetivo de caracterizar la condición del lubricante y comprender cómo los factores operativos inciden en su desempeño real (Bražinskienė et al., 2015a; del Río et al., 2023a).

En sistemas de generación eléctrica, estas variaciones adquieren un nivel adicional de importancia debido a la necesidad de mantener potencias estables y a la sensibilidad del motor ante derivas térmicas o químicas. En este escenario, el análisis de aceite se posiciona como una herramienta estratégica para interpretar el comportamiento del lubricante y anticipar condiciones que puedan comprometer la confiabilidad del motor. La evaluación de parámetros como viscosidad, oxidación, nitración, desgaste metálico, efectividad de aditivos y presencia de contaminantes permite registrar señales tempranas de degradación que reflejan las dinámicas operativas del equipo. Este contexto operacional no solo describe la relevancia del motor y del lubricante en la generación eléctrica, sino que también establece la base metodológica para los

objetivos siguientes. A partir de esta caracterización, el estudio avanza hacia el análisis tribológico y la formulación de escenarios de mantenimiento, asegura coherencia y progresión en el desarrollo del modelo PMO + CBM (Zhu et al., 2017a).

El motor CAT 3412 cuenta con un programa de monitoreo de lubricante implementado mediante muestreos periódicos, cuyos resultados evidencian estabilidad en los parámetros fundamentales a lo largo de los ciclos de operación. Sin embargo, a pesar de disponer de esta información, la organización mantiene un esquema de cambio de aceite basado únicamente en horas acumuladas, sin incorporar el comportamiento real del lubricante ni las variaciones del entorno operativo. Esta desconexión entre la información disponible y la toma de decisiones genera oportunidades de mejora tanto en confiabilidad como en costos. Estudios desarrollados en motores a gas y sistemas de generación indican que los intervalos de cambio extendidos, cuando se sustentan en análisis de condición, permiten optimizar el uso de recursos, reducir la frecuencia de intervenciones y mejorar la disponibilidad sin comprometer la integridad del motor. Este aspecto aporta directamente al objetivo del trabajo relacionado con la evaluación técnica de intervalos alternativos (Pytel et al., 2025a; Tormos, 2013a).

Bajo este contexto, el análisis de la condición del lubricante del motor CAT 3412 adquiere un rol fundamental para orientar decisiones de mantenimiento coherentes con las características operativas reales del sistema de generación. La integración de los datos tribológicos y de operación permite evaluar si el intervalo actual de cambio de aceite se ajusta a las necesidades del motor o si existe sustento técnico para adoptar un intervalo extendido que conserve la confiabilidad del sistema y optimice el uso de recursos. Este enfoque fortalece la conexión con los objetivos del trabajo, especialmente aquellos orientados a la formulación de una estrategia de mantenimiento basada en condición que aporte valor dentro del Sistema de Gestión de Activos de la organización.

Planteamiento del problema u oportunidad

Este planteamiento del problema no solo evidencia las limitaciones del esquema actual de mantenimiento, sino que también establece la oportunidad de evolucionar hacia un modelo PMO + CBM. A partir de esta necesidad, los objetivos específicos del trabajo se orientan a caracterizar el lubricante, analizar tendencias de degradación y formular escenarios de intervalos que permitan validar la viabilidad de un enfoque basado en condición.

El motor Caterpillar 3412 a gas utilizado en el sistema de generación eléctrica de la organización opera en régimen continuo y se clasifica como un activo de alta criticidad debido a su impacto directo sobre la disponibilidad energética, la estabilidad operativa y los costos asociados al mantenimiento. En activos con estas características, la estrategia de mantenimiento requiere soportarse en información técnica verificable que represente la condición real del equipo, especialmente cuando los mecanismos de degradación evolucionan bajo influencias dinámicas de carga, temperatura y calidad de operación. Este contexto conecta de manera directa con la necesidad del presente trabajo, orientado a evaluar la condición del motor y su lubricante para fortalecer la toma de decisiones (Carnero et al., 2023a).

A pesar de este nivel de exigencia, la organización conserva un esquema tradicional de cambio de aceite basado únicamente en horas acumuladas, sin incorporar la respuesta real del lubricante frente a las condiciones térmicas, mecánicas y químicas que enfrenta el motor durante su operación continua. Este enfoque ignora la evidencia técnica que demuestra que variaciones en la carga eléctrica, la mezcla aire–combustible, la eficiencia de combustión y la estabilidad térmica influyen directamente en procesos como oxidación, nitración, deterioro de aditivos y generación de partículas metálicas. Estos factores condicionan el comportamiento del lubricante y su capacidad para mantener la protección del motor (del Río et al., 2023a; Wolak et al., 2020a).

Como resultado, la organización enfrenta un escenario dual de riesgo. En un extremo, los cambios de aceite prematuros incrementan el consumo de materiales, elevan los costos operativos y generan residuos innecesarios que impactan el desempeño ambiental. En el extremo opuesto, la postergación del cambio expone al motor a condiciones que aceleran el desgaste, reducen su eficiencia térmica y elevan la probabilidad de fallas no programadas, con consecuencias directas sobre la disponibilidad del sistema de generación. Este doble riesgo evidencia la necesidad de un enfoque que ajuste el mantenimiento a las condiciones reales del activo (Telford et al., 2011a).

Los registros históricos del CAT 3412 muestran que el lubricante mantiene estabilidad físico-química a lo largo de los ciclos de operación, con tendencias controladas en viscosidad, oxidación, nitración y metales de desgaste. Estos resultados sugieren que el aceite podría soportar un intervalo de operación mayor al definido actualmente, siempre que exista un método de evaluación riguroso. La literatura internacional respalda la extensión del intervalo cuando el lubricante conserva sus propiedades y se cuenta con un monitoreo adecuado que permita interpretar correctamente los mecanismos de degradación (Zhu et al., 2017a).

Sin embargo, la organización no dispone de un modelo sistemático que integre los resultados del análisis de lubricante, los parámetros operativos del motor y las tendencias de degradación para definir un intervalo óptimo de cambio sustentado en condición. Esta ausencia limita la efectividad del mantenimiento, reduce la capacidad para anticipar desviaciones y desaprovecha el valor técnico generado por el programa de muestreo de aceite, el cual contiene información relevante para la gestión de confiabilidad.

Este escenario representa no solo un problema operativo, sino también una oportunidad estratégica para la organización. La disponibilidad de datos históricos del lubricante, combinada

con la operación continua del motor y con la sensibilidad del aceite frente a los mecanismos de desgaste, permite diseñar un modelo de decisión que determine un intervalo de cambio basado en condición. Este modelo tiene el potencial de optimizar recursos, mejorar la confiabilidad y fortalecer la alineación del mantenimiento con los principios de la Gestión de Activos.

En consecuencia, emerge la necesidad de implementar un enfoque que utilice el lubricante como indicador primario del estado del motor, con el fin de definir un intervalo de cambio preciso, sustentado en evidencia técnica y ajustado a las condiciones reales de operación. Este planteamiento constituye la base del presente trabajo y orienta los objetivos centrales de la investigación.

Límites del problema u oportunidad

El presente estudio se enfoca exclusivamente en el análisis técnico del plan de mantenimiento aplicado al motor a gas Caterpillar 3412 instalado en el sistema de generación eléctrica de la organización. Este motor opera bajo un régimen continuo y alimenta cargas críticas, por lo que su confiabilidad tiene un impacto directo en la estabilidad energética, la continuidad operativa y los costos asociados al mantenimiento. La delimitación del estudio sobre este activo responde a su importancia estratégica dentro del proceso y a la necesidad de contar con información precisa para orientar decisiones basadas en condición (Ali & Abdelhadi, 2022a).

El alcance del trabajo se restringe a las actividades de mantenimiento preventivo y predictivo directamente asociadas al motor, considera tareas, frecuencias, inspecciones, rutinas programadas y parámetros monitoreados mediante análisis tribológicos y técnicas de diagnóstico basadas en datos. Si bien el sistema de generación incorpora subsistemas adicionales como el generador eléctrico, el sistema de enfriamiento, el sistema de combustión, los controles

electrónicos y la instrumentación, estos no forman parte del análisis detallado, salvo en los casos en los que su comportamiento tenga una influencia verificable sobre la condición del motor o la interpretación del lubricante. Esta delimitación permite concentrar el análisis en los elementos que inciden de manera directa en los objetivos del estudio (Tormos, 2013a).

El análisis considera únicamente información técnica trazable del motor, incluye resultados de laboratorio (viscosidad, oxidación, nitración, metales de desgaste, contaminantes), datos operativos validados y registros generados por el módulo SAP PM. Se excluyen datos incompletos, registros sin trazabilidad y cualquier información proveniente de otros equipos o sistemas. Aunque se mencionan normas técnicas como ISO 14224, ISO 17359 o UNE 15341, estas se utilizan únicamente como marco de referencia conceptual para garantizar la consistencia del análisis; no se pretende evaluar su aplicación exhaustiva dentro del alcance del trabajo. Este enfoque asegura que las conclusiones se fundamenten en datos confiables, pertinentes y consistentes (Ahmad & Kamaruddin, 2012a).

Igualmente, no se abordan intervenciones mayores como overhaul, repotenciación, reemplazo de componentes críticos o decisiones de sustitución del activo. Tampoco se incluyen análisis financieros de ciclo de vida extendido, estudios de inversión o evaluaciones corporativas de riesgo. Las consideraciones económicas se limitan a los efectos operativos derivados de la optimización de frecuencias, tareas y consumos dentro del plan de mantenimiento actual, de manera coherente con el alcance del modelo propuesto y con los objetivos de mejorar la confiabilidad y eficiencia del motor sin modificar su configuración ni su función dentro del proceso (Kumar et al., 2013a).

Finalmente, aunque metodologías como RCM, FMECA, RCA o modelos de ciclo de vida aportan valor a la comprensión de la confiabilidad, estas no constituyen el núcleo del estudio. El propósito central se orienta hacia la toma de decisiones a partir del comportamiento del lubricante, los datos operativos y la evidencia técnica disponible, con el fin de establecer un intervalo de cambio de aceite fundamentado en condición. Esta delimitación permite desarrollar un modelo aplicable, replicable y orientado a mejorar la confiabilidad del motor dentro del sistema de generación eléctrica, sin ampliar el análisis a metodologías que exceden los objetivos definidos (Jardine et al., 2006a).

Alcance del estudio

El estudio se orienta a evaluar la condición del lubricante utilizado en el motor Caterpillar 3412 a gas, perteneciente al sistema de generación eléctrica de la organización, con el fin de establecer un intervalo de cambio de aceite sustentado en evidencia técnica y en la evolución real de los parámetros tribológicos. El alcance abarca el análisis de los resultados históricos del lubricante, la interpretación de tendencias y la relación entre el comportamiento químico, físico y metálico del aceite y las condiciones operativas del motor.

El trabajo considera la revisión detallada de parámetros como viscosidad, oxidación, nitración, número ácido, contenido metálico y presencia de contaminantes, debido a su alta sensibilidad frente a los mecanismos de degradación del motor. Estudios previos confirman que estos parámetros permiten caracterizar la condición de activos rotativos sometidos a cargas térmicas y mecánicas variables, especialmente en motores a gas de operación continua (Zhu et al., 2017b).

El alcance incluye el análisis de los datos operativos asociados al funcionamiento del CAT 3412, tales como carga eléctrica, temperatura del aceite, estabilidad del combustible y régimen de operación. Estos factores influyen en la degradación del lubricante y constituyen variables relevantes para interpretar la evolución de los procesos de desgaste y la estabilidad del aceite a lo largo del periodo de servicio (Wolak et al., 2020b).

El estudio incorpora la comparación entre el intervalo actual de cambio de aceite y el intervalo potencial estimado mediante la evaluación de tendencias. Este análisis considera la estabilidad del lubricante reportada en los muestreos periódicos, la evidencia técnica disponible y las recomendaciones documentadas en literatura especializada para motores a gas y sistemas de generación (Raposo et al., 2019b).

El alcance del trabajo excluye la evaluación de técnicas adicionales como análisis de vibraciones, termografía infrarroja, análisis de combustión o modelos avanzados de pronóstico de vida útil remanente, debido a que la iniciativa se centra exclusivamente en el lubricante como indicador principal de condición. También se excluye la intervención física del motor o la modificación de su configuración de operación, ya que el estudio se limita al uso de información disponible y a los resultados de laboratorio obtenidos durante el periodo de análisis.

En resumen, Esta delimitación metodológica asegura que el estudio mantenga un enfoque claro y aplicable, orientado a los objetivos específicos de caracterizar el lubricante, analizar tendencias de degradación y evaluar escenarios de intervalos de cambio. De esta manera, los límites definidos fortalecen la coherencia del modelo PMO + CBM y garantizan que las conclusiones se fundamenten en evidencia técnica directamente vinculada con la confiabilidad del motor.

Justificación

La operación continua del motor Caterpillar 3412 a gas, responsable del suministro de energía en el sistema de generación eléctrica de la organización, requiere un esquema de mantenimiento que refleje con precisión la condición real del activo y no únicamente el tiempo acumulado de operación. La confiabilidad del sistema depende de la capacidad para identificar oportunamente los mecanismos de degradación y controlar los factores que influyen en la estabilidad del lubricante, dado que cualquier desviación impacta la disponibilidad energética, los costos operativos y la continuidad del servicio. Este panorama evidencia la necesidad de una estrategia de mantenimiento más alineada con la Gestión de Activos y con los principios de toma de decisiones basadas en datos (Carnero et al., 2023a; Kumar et al., 2013a).

El análisis de lubricante se posiciona como una herramienta estratégica para diagnosticar de forma anticipada los procesos de desgaste, la presencia de contaminantes y la evolución de la degradación térmica y química del aceite. La literatura especializada resalta que los parámetros tribológicos ofrecen una lectura interna y confiable de la condición del motor, permite identificar tendencias anómalas antes de que se manifiesten en fallas funcionales o pérdidas de eficiencia operativa. Esta capacidad diagnóstica convierte al análisis de aceite en un elemento clave para motores sometidos a operación ininterrumpida (Zhu et al., 2017a).

A pesar de ello, la organización mantiene un intervalo de cambio de aceite basado exclusivamente en horas de operación, sin incorporar la información generada por los análisis periódicos del lubricante. Esta limitación afecta la calidad de la toma de decisiones y expone al motor a dos riesgos contrapuestos: intervenciones prematuras que aumentan costos y generan residuos innecesarios, o intervenciones tardías que elevan la probabilidad de falla y comprometen la disponibilidad del sistema de generación. Diversas investigaciones demuestran que los intervalos fijos no reflejan la variabilidad térmica y mecánica del proceso, lo

cual reduce la eficiencia del mantenimiento y expone al activo a riesgos evitables (Ahmad & Kamaruddin, 2012a; Telford et al., 2011a).

La disponibilidad de datos históricos del lubricante del motor CAT 3412 muestra estabilidad en parámetros esenciales como viscosidad, oxidación, nitración y metales de desgaste, lo que indica un comportamiento favorable del aceite durante su periodo de servicio. La literatura técnica señala que, cuando estos parámetros se mantienen dentro de rangos controlados, es viable extender el intervalo de cambio sin comprometer la integridad del motor, siempre que exista un proceso de evaluación riguroso fundamentado en tendencias. Esta evidencia respalda la necesidad de un análisis estructurado que determine si el intervalo actual refleja realmente las condiciones del lubricante (Raposo et al., 2019a).

Tabla 1
Frecuencias Mantenimientos recomendados por Caterpillar en Motores 3412

Intervalo Mantenimiento (horas)	Actividades recomendadas Motor Caterpillar 3412 GAS
2000	- Cambio de aceite Pegasus 805 - 48 galones. - Cambio de filtro Aceite 1R-1808. - Cambio Filtro de Aire 8N6309.C2 - Cambio Filtro de Gas 322-4981. - Muestreo y análisis de aceite. - Inspección / ajuste de válvulas- 30 Escape - 15 Admisión. - Inspección turboalimentador. Juego Axial y Radial. - Revisión de mangueras, correas y abrazaderas. - Inspección sistema de admisión y suministro de gas. - Inspección del sistema de enfriamiento (mangueras, conexiones, intercambiador). - Verificación sistema eléctrico (alternador, cableado, conexiones). - Verificación sistema de protección (alarmas y paros). - Inspección sistema de combustible (filtros, separadores de agua, drenajes).AQ2
4000	Todas las tareas de 2000 h, más: - Limpieza / inspección profunda del aftercooler - Inspección de intercambiador de calor - Revisión sistema de control de emisiones (si aplica) - Inspección soportes del motor y estructuras externas - Inspección sensores de velocidad, presión y temperatura - Revisión sistema de ventilación del cárter / ventiladores
6000	Todas las tareas de 4000 h, más: - Cambio de refrigerante o adición de extensor (ELC) - Revisión / reemplazo de sellos mayores - Inspección de cigüeñal / alineaciones (si accesible) - Evaluación de desgaste por análisis de partículas metálicas - Prueba de presión del aftercooler - Inspección del sistema de escape, juntas y sellos
8000	Todas las tareas de 6000 h, más: - Inspección general de la cabeza de cilindros - Evaluación del turbo con posible reparación - Inspección de cojinetes principales (si accesible) - Revisión de tolerancias mecánicas internas y alineamientos - Posible top-end overhaul (intervención parcial) - Revisión completa del sistema de enfriamiento - Inspección a fondo del sistema de admisión y control de gases

Nota. Datos tomados del manual técnico Cat® G3412 Gas Compression Engine: Technical Specification del fabricante.

La Tabla 1 presenta las frecuencias de mantenimiento recomendadas por el fabricante para motores Caterpillar 3412, las cuales sirven como referencia técnica inicial para establecer un esquema preventivo básico. Si bien este modelo asegura un nivel mínimo de protección,

también puede derivar en sobre intervenciones cuando no incorpora la condición real del lubricante ni las variaciones operativas. La literatura es consistente en señalar que los programas de mantenimiento basados en intervalos fijos tienden a generar reemplazos prematuros de lubricantes y componentes, incrementa el costo operativo del activo y reduce la eficiencia global del proceso (Quatrini et al., 2020a).

Esta justificación establece con claridad la necesidad de evolucionar desde esquemas tradicionales hacia un modelo PMO + CBM fundamentado en la condición real del lubricante. A partir de esta base, los objetivos específicos del estudio se orientan a caracterizar el aceite, analizar tendencias de degradación y validar escenarios de intervalos extendidos, asegura coherencia metodológica y aplicabilidad práctica en la gestión de activos.

En este contexto, implementar un modelo de decisión basado en condición ofrece beneficios directos y sostenibles para la organización. Este enfoque permite optimizar los recursos operativos al reducir intervenciones innecesarias, incrementar la confiabilidad del sistema de generación mediante intervenciones alineadas al estado real del motor y fortalecer la sostenibilidad del proceso al disminuir la frecuencia de disposición de aceite usado y la generación de residuos. Estas ventajas se alinean con los principios de la Gestión de Activos, que buscan garantizar desempeño, confiabilidad y valor económico en el ciclo de vida del activo.

Por estas razones, se justifica el desarrollo del presente estudio orientado a evaluar el comportamiento del lubricante del motor Caterpillar 3412, identificar tendencias representativas y determinar un intervalo de cambio de aceite fundamentado en condición. Este enfoque permite alinear la estrategia de mantenimiento con las necesidades reales del sistema de

generación eléctrica, mejorar la confiabilidad del motor y optimizar el uso de recursos, en coherencia con las prácticas técnicas reconocidas en la industria.

Viabilidad de la idea del trabajo de profundización

La propuesta de establecer un intervalo de cambio de aceite basado en la condición real del lubricante del motor Caterpillar 3412 a gas, integrado al sistema de generación eléctrica de la organización, presenta una viabilidad técnica, operativa y económica claramente favorable. La disponibilidad de datos históricos del lubricante, la continuidad del programa de muestreo y la estabilidad de los parámetros tribológicos registrados durante los ciclos de operación ofrecen una base sólida para construir un análisis sustentado en evidencia. Este escenario permite formular un modelo confiable para interpretar tendencias y apoyar decisiones orientadas a optimizar la estrategia de mantenimiento desde un enfoque basado en condición.

Desde la perspectiva técnica, el lubricante funciona como un sensor interno capaz de revelar la evolución de los mecanismos de degradación del motor y registrar señales tempranas vinculadas a desgaste, oxidación, nitración y alteraciones en la estabilidad de los aditivos. La literatura especializada confirma que variables como viscosidad, metales de desgaste, eficiencia de aditivos y carga química del aceite permiten estimar la condición real del equipo y anticipar desviaciones antes de que se manifiesten en fallas funcionales. Este respaldo científico refuerza la pertinencia del análisis propuesto dentro del alcance del trabajo (Zhu et al., 2017a).

El motor CAT 3412 cuenta con un historial robusto de análisis de lubricante que presenta resultados consistentes a lo largo del tiempo, lo cual reduce la incertidumbre y facilita la construcción de un modelo de interpretación confiable. La calidad y continuidad de estos datos permiten validar la estabilidad del lubricante durante su periodo de servicio y evaluar de

manera precisa si existe sustento para extender el intervalo de cambio con base en tendencias verificables. Esta condición fortalece la viabilidad del estudio al contar con insumos reales, trazables y suficientes para soportar conclusiones de valor (Yan et al., 2019a).

Desde el punto de vista operativo, el sistema de generación funciona en régimen continuo y dispone de personal capacitado para ejecutar los muestreos del lubricante con procedimientos estandarizados. El proceso de análisis de aceite ya está incorporado dentro de las rutinas de mantenimiento, por lo que el estudio no exige nuevas tecnologías, modificaciones estructurales ni inversiones adicionales. Este alineamiento entre recursos disponibles, capacidades existentes y requerimientos del trabajo confirma que la propuesta se integra sin restricciones a la operación normal del equipo y al modelo de mantenimiento actualmente implementado.

En términos económicos, la iniciativa presenta una oportunidad relevante para optimizar costos al reducir el consumo de lubricante y la frecuencia de actividades asociadas al cambio de aceite. La literatura técnica evidencia que los intervalos fijos tienden a generar exceso de intervenciones, mientras que los intervalos basados en condición permiten disminuir costos sin comprometer la integridad del motor, siempre que se sustenten en datos confiables y un análisis riguroso. Este beneficio económico se proyecta como uno de los resultados más significativos del estudio (Ahmad & Kamaruddin, 2012a).

La iniciativa también presenta beneficios ambientales asociados a la disminución de residuos derivados de la reducción de cambios de aceite innecesarios. Este impacto positivo se alinea con prácticas de sostenibilidad, eficiencia energética y uso responsable de recursos, valores cada vez más relevantes en organizaciones comprometidas con la Gestión de Activos. La literatura apoya este enfoque al resaltar que la optimización de intervalos contribuye

simultáneamente a mejorar el desempeño técnico y la sostenibilidad del proceso (Pytel et al., 2025a).

Finalmente, desde la dimensión institucional, el proyecto se ajusta a la capacidad técnica disponible, se integra de manera natural con los procesos establecidos y no modifica la estrategia operacional del sistema de generación. Esta coherencia entre los objetivos del estudio, los recursos existentes y las necesidades del activo confirma la viabilidad global de la iniciativa y respalda su implementación como una alternativa técnica factible, sustentada y alineada con las buenas prácticas de la Gestión de Activos.

Esta viabilidad integral confirma que el estudio cuenta con las condiciones técnicas, operativas, económicas, ambientales e institucionales necesarias para su desarrollo. A partir de esta base, los objetivos específicos se orientan a caracterizar el lubricante, analizar tendencias de degradación y validar escenarios de intervalos extendidos, asegura coherencia metodológica y aplicabilidad práctica en la gestión de activos

Objetivos

La estructura de objetivos del proyecto se fundamenta en los niveles cognitivos de la taxonomía de Bloom, la cual organiza el aprendizaje en una secuencia progresiva que inicia en el reconocimiento de conceptos y avanza hacia la formulación de soluciones técnicas. Este enfoque permite construir una ruta metodológica coherente, donde cada nivel —recordar, comprender, aplicar, analizar, evaluar y crear— aporta elementos específicos para el desarrollo del modelo de optimización del mantenimiento del motor CAT 3412. La aplicación de estos niveles garantiza profundidad conceptual, orden lógico y consistencia en la interpretación de resultados y en la toma de decisiones basada en condición (Quatrini et al., 2020a).

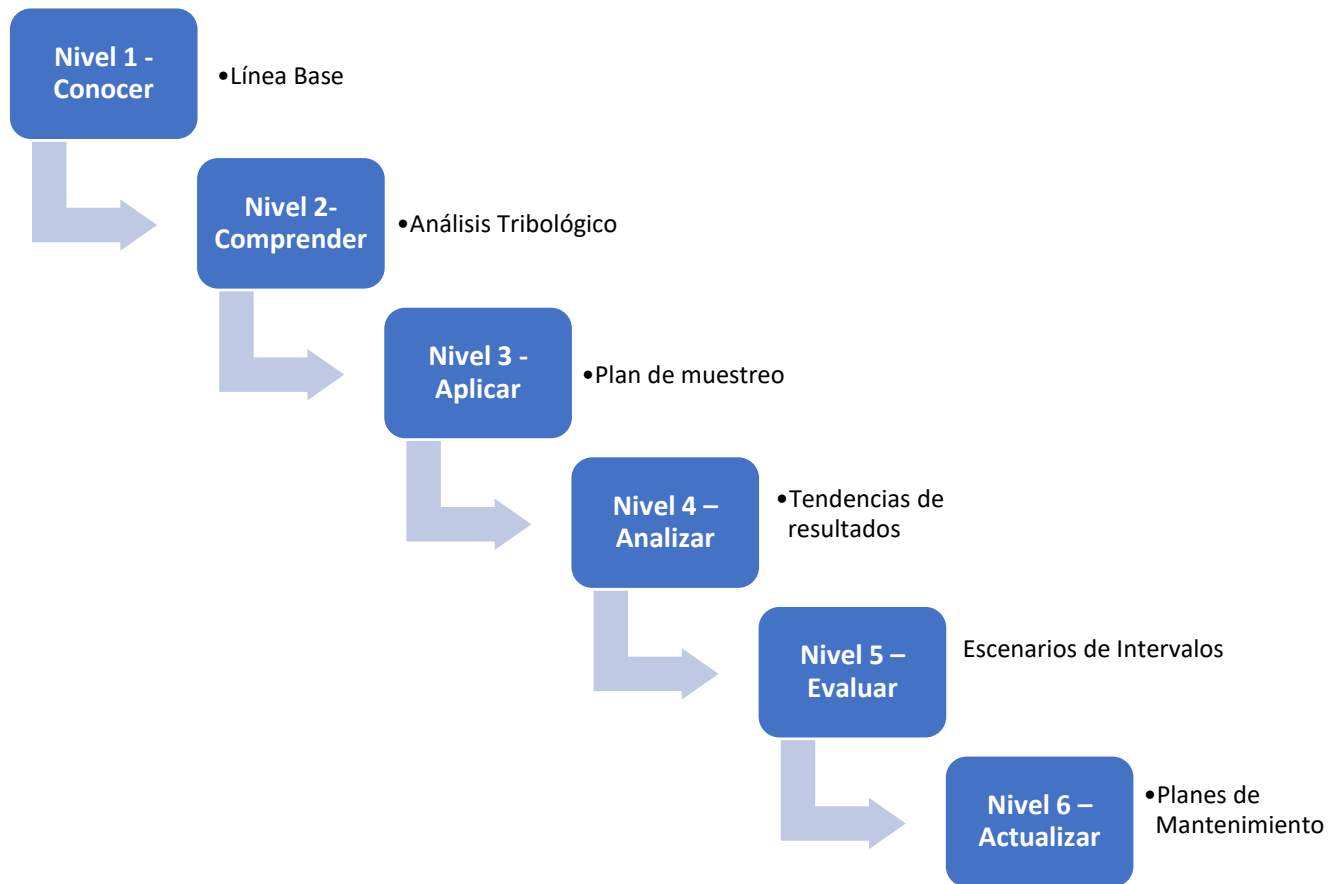
De manera complementaria, los eventos instruccionales propuestos por Gagné fortalecen la transición entre los niveles cognitivos. Los eventos iniciales, orientados a captar la atención, comunicar objetivos y activar conocimientos previos, consolidan las fases de recordar y comprender. Los eventos intermedios, centrados en presentar contenidos, orientar el aprendizaje y facilitar la práctica guiada, resultan esenciales para aplicar y analizar, aspectos fundamentales dentro del Mantenimiento Basado en Condición (CBM) y la Optimización del Plan de Mantenimiento (PMO). Finalmente, los eventos superiores relacionados con retroalimentación, evaluación y transferencia del conocimiento permiten sintetizar y crear, capacidades necesarias para construir propuestas viables y alineadas con la Gestión de Activos (Li et al., 2020a).

El orden jerárquico definido, representado en la Ilustración 1, facilita visualizar la progresión cognitiva que sostiene la estructura del trabajo. Esta articulación entre Bloom y Gagné asegura que los objetivos no solo aumenten en complejidad, sino que contribuyan a consolidar una comprensión profunda de los procesos de confiabilidad, tribología y gestión de activos. Este enfoque permite fundamentar el análisis técnico aplicado al motor CAT 3412 en evidencia trazable, criterios normativos y razonamiento estructurado, asegura un rigor académico coherente con las exigencias del estudio.

Esta estructura cognitiva no solo aporta coherencia académica, sino que también orienta de manera práctica los objetivos específicos del estudio: caracterizar el comportamiento del lubricante, analizar su relación con la condición del motor, validar escenarios de intervalos extendidos y establecer lineamientos de integración dentro del Sistema de Gestión de Activos. De esta forma, la progresión metodológica se conecta directamente con la aplicación técnica en el motor CAT 3412 (Mora & Orozco, 2021).

Ilustración 1

Jerarquía taxonómica de los objetivos



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

Objetivo General

El objetivo general del proyecto consiste en establecer un intervalo de cambio de aceite sustentado en la condición real del lubricante del motor Caterpillar 3412 a gas, a partir del análisis detallado de parámetros tribológicos y operativos que permitan optimizar la estrategia de mantenimiento. Este propósito se orienta a fortalecer la confiabilidad del sistema de generación eléctrica, reducir los costos asociados a intervenciones innecesarias y asegurar un

desempeño más estable del proceso, en coherencia con los principios de la Gestión de Activos y con la necesidad de decisiones fundamentadas en evidencia técnica.

Con el fin de materializar este propósito, la propuesta se orienta a:

- Integrar metodologías de Optimización del Plan de Mantenimiento (PMO) y de Mantenimiento Basado en Condición (CBM) en un esquema unificado que permita transitar desde un mantenimiento preventivo rígido hacia un modelo dinámico sustentado en datos reales.
- Utilizar los parámetros tribológicos del lubricante como fuente principal para diagnosticar el estado del motor y anticipar los modos de falla que afectan su confiabilidad y desempeño.
- Validar la viabilidad técnica de extender el intervalo de cambio de aceite mediante el análisis de tendencias en los resultados de laboratorio, asegura que las decisiones se basen en criterios técnicos y no en rutinas calendarizadas.
- Incorporar el modelo dentro de SAP PM con el fin de garantizar trazabilidad, estandarización y soporte documental dentro del Sistema de Gestión de Activos.
- Contribuir a la sostenibilidad operativa mediante la reducción del consumo de lubricantes y filtros, y la disminución de residuos peligrosos asociados a intervenciones prematuras

En síntesis, el objetivo general se orienta a desarrollar un modelo técnico, económico y ambientalmente viable que permita evolucionar desde un esquema tradicional de mantenimiento por horas hacia una estrategia moderna basada en condición, con un impacto directo en la confiabilidad del motor CAT 3412, en la eficiencia del sistema de generación y en la sostenibilidad integral de la organización (Kumar et al., 2013a).

Este objetivo general se desglosa en objetivos específicos que desarrollan la caracterización del lubricante, el análisis de tendencias de degradación, la validación de

intervalos extendidos y la integración del modelo dentro del Sistema de Gestión de Activos. De esta manera, se asegura una progresión metodológica coherente y aplicable al caso del motor CAT 3412.

Objetivos específicos

- Caracterizar la condición del lubricante del motor Caterpillar 3412 a gas mediante el análisis de viscosidad, oxidación, nitración, metales de desgaste, número ácido y contaminantes presentes en los muestreos disponibles.

Este primer objetivo establece la base diagnóstica del estudio, genera la información inicial necesaria para comprender el estado real del aceite.

- Identificar tendencias representativas en los parámetros tribológicos que permitan interpretar la evolución de los mecanismos de degradación del lubricante durante la operación continua del motor.

A partir de la caracterización, este objetivo profundiza en la dinámica temporal del lubricante, revela patrones que orientan la interpretación técnica.

- Relacionar los parámetros analizados del lubricante con las condiciones reales de operación del motor, incluye carga eléctrica, estabilidad térmica, temperatura del aceite y variaciones propias del proceso de generación.

Este paso conecta la evidencia tribológica con el contexto operativo, asegura que el análisis refleje las condiciones específicas del sistema de generación.

- Evaluar la estabilidad físico-química del lubricante frente al intervalo actual de cambio de aceite, determina si la frecuencia implementada refleja la condición real del motor o si existe evidencia técnica para considerar un intervalo extendido.

Con esta evaluación se valida la pertinencia del esquema vigente y se abre la posibilidad de proponer ajustes sustentados en evidencia.

- Proponer un intervalo de cambio de aceite basado en condición, sustentado en el comportamiento del lubricante, su estabilidad tribológica y la evidencia operativa del motor CAT 3412, asegura coherencia con la confiabilidad requerida por el sistema de generación.

Este objetivo sintetiza los anteriores y materializa la propuesta central del estudio, orientada a optimizar la estrategia de mantenimiento y fortalecer la gestión de activos.

Objetivo específico uno – Línea Base.

Definir la línea base del plan de mantenimiento actual aplicado al motor a gas Caterpillar CAT 3412, mediante la caracterización de las tareas, frecuencias, recursos, repuestos y costos asociados a su ejecución. Este objetivo establece el punto de partida para comprender el estado real del mantenimiento preventivo tradicional implementado en el equipo y permite identificar brechas técnicas, operativas y de gestión que influyen en su desempeño dentro del sistema de generación eléctrica.

La construcción de esta línea base es esencial, ya que ofrece una visión clara de cómo se ejecuta actualmente el mantenimiento y qué elementos requieren ajustes para avanzar hacia un esquema basado en condición. Su alcance permite evaluar si las rutinas, frecuencias y recursos responden a las necesidades reales del motor o si obedecen a criterios históricos que no reflejan su comportamiento operativo. Asimismo, facilita reconocer desviaciones entre lo planificado y lo ejecutado, y detectar posibles redundancias, omisiones o ineficiencias dentro del plan existente.

Desde la perspectiva pedagógica y metodológica, este objetivo se ubica en el Nivel I – Conocer de la taxonomía de Bloom, ya que implica identificar, describir y documentar los elementos que conforman el plan actual. De forma complementaria, se articula con los primeros eventos instruccionales de Gagné, que activan conocimientos previos y consolidan la comprensión básica necesaria para avanzar hacia fases de mayor complejidad analítica. Este fundamento garantiza que las etapas posteriores de análisis, evaluación y optimización se realicen sobre una base técnica sólida, trazable y alineada con los principios del Mantenimiento Basado en Condición (CBM) y la Optimización del Plan (Quatrini et al., 2020a).

La definición de esta línea base no solo permite comprender el estado actual del mantenimiento, sino que también establece el fundamento para avanzar hacia el análisis de tendencias tribológicas del lubricante, asegura continuidad metodológica entre los objetivos y coherencia en el desarrollo del modelo CBM + PMO

Objetivo específico dos – Análisis Tribológico.

El segundo objetivo específico busca explicar la relación entre los parámetros tribológicos —viscosidad, oxidación, partículas metálicas, dilución de combustible y contaminación— y los mecanismos de degradación que actúan sobre el motor Caterpillar CAT 3412 a gas. Este propósito permite comprender el comportamiento del lubricante como un indicador directo del estado interno del motor y facilita interpretar los resultados de laboratorio a partir de fundamentos especializados en desgaste, fricción, degradación química y monitoreo de condición. Su alcance técnico contribuye a establecer una correlación entre la evolución del lubricante y los modos de falla que afectan la confiabilidad del activo, permite identificar señales tempranas de deterioro y respaldar decisiones de mantenimiento basadas en evidencia.

Desde la perspectiva metodológica, este objetivo se ubica en el Nivel II – Comprender de la taxonomía de Bloom, ya que implica interpretar información, establecer relaciones

causales y explicar fenómenos tribológicos asociados a la operación del motor. De forma complementaria, se articula con los eventos instruccionales de Gagné orientados a la presentación del contenido, orientación del aprendizaje y práctica guiada, elementos que permiten consolidar el entendimiento necesario para avanzar hacia niveles superiores de análisis, evaluación y creación dentro del modelo de mantenimiento basado en condición (Zhu et al., 2017a).

La comprensión lograda en este objetivo constituye la base para el siguiente, orientado a relacionar los parámetros tribológicos con las condiciones reales de operación del motor, asegura continuidad metodológica y fortalece la conexión entre evidencia técnica y contexto operativo. (Zhu et al., 2017a).

Objetivo específico tres – Plan de Muestreo.

El tercer objetivo específico busca implementar un plan estructurado de muestreo de aceite y filtros para el motor Caterpillar CAT 3412, en concordancia con los lineamientos establecidos por las normas ASTM aplicables y los criterios definidos por la ISO 17359 para el monitoreo de condición. Este propósito asegura que las muestras obtenidas sean representativas, comparables y técnicamente válidas, garantiza que los resultados reflejen con precisión la evolución del lubricante y los mecanismos internos de degradación del motor. La aplicación disciplinada de estas metodologías contribuye a fortalecer la calidad de los datos, reducir la incertidumbre en el diagnóstico y respaldar decisiones técnicas dentro del modelo de Mantenimiento Basado en Condición (CBM).

El diseño del plan de muestreo incluye la definición de puntos de extracción, frecuencias adecuadas para una operación continua, procedimientos de manipulación y control de contaminantes, así como el uso de filtros y elementos auxiliares que permitan capturar

partículas relevantes para el análisis. Estos elementos son esenciales para asegurar que la información generada posea la consistencia necesaria para interpretar tendencias, identificar desviaciones y establecer un criterio sólido sobre la condición real del motor.

Desde el punto de vista metodológico, este objetivo se ubica en el Nivel III – Aplicar de la taxonomía de Bloom, ya que requiere utilizar normas, procedimientos y conocimientos específicos para ejecutar una acción técnica con precisión y disciplina. A su vez, se articula con los eventos instruccionales intermedios de Gagné, relacionados con la práctica guiada, la orientación del desempeño y la ejecución controlada, que permiten consolidar la habilidad práctica necesaria para implementar un plan de muestreo confiable y estandarizado dentro del proceso de mantenimiento (Tormos, 2013a).

La implementación de este plan constituye la base para el siguiente objetivo, orientado a evaluar la estabilidad fisicoquímica del lubricante frente al intervalo actual de cambio de aceite, asegura continuidad metodológica y fortalece la conexión entre evidencia técnica y decisiones estratégicas de mantenimiento.

Objetivo específico cuatro – Tendencias de resultados.

El cuarto objetivo específico busca analizar las tendencias de los resultados tribológicos y correlacionarlas con los eventos de mantenimiento, las condiciones de operación y las fallas registradas en el historial del motor Caterpillar CAT 3412. Este propósito permite identificar patrones de comportamiento que revelan la evolución de los mecanismos internos de desgaste y facilitan la anticipación de modos de falla asociados a variaciones térmicas, cargas mecánicas, contaminantes o degradación química del lubricante. Su alcance técnico aporta una visión dinámica del estado del motor y constituye un insumo esencial para interpretar la confiabilidad del activo a lo largo del tiempo.

El análisis sistemático de tendencias integra parámetros clave como viscosidad, oxidación, nitración, partículas metálicas y presencia de contaminantes. Estos indicadores permiten reconocer desviaciones significativas en el comportamiento del lubricante y establecer correlaciones con intervenciones, paradas, eventos anómalos o modificaciones operativas. Este enfoque facilita evaluar el deterioro progresivo, identificar señales precursoras de falla y reconocer posibles causas raíz asociadas al desgaste, fortalece la capacidad predictiva del modelo de mantenimiento basado en condición. Al vincular los resultados del laboratorio con el contexto operativo real, este objetivo aporta decisión técnica y reduce la incertidumbre en la planificación del mantenimiento.

Metodológicamente, este objetivo se ubica en el Nivel IV – Analizar de la taxonomía de Bloom, ya que exige descomponer información, identificar relaciones causales y evaluar comportamientos complejos dentro de un sistema técnico. Además, se articula con los eventos instruccionales de Gagné orientados a la retroalimentación, la evaluación del desempeño y el procesamiento profundo de la información, elementos necesarios para transformar datos aislados en conocimiento aplicable dentro de un modelo de confiabilidad robusto. Este nivel cognitivo permite avanzar hacia propuestas de optimización sustentadas en evidencia y alineadas con los principios del Mantenimiento Basado en Condición (CBM) (Raposo et al., 2019a).

La comprensión lograda en este objetivo constituye la base para el siguiente, orientado a proponer un intervalo de cambio de aceite sustentado en condición, asegura continuidad metodológica y fortalece la conexión entre el análisis técnico y la toma de decisiones estratégicas.

Objetivo específico cinco – Escenarios de Intervalos.

El quinto objetivo específico busca evaluar y sintetizar escenarios comparativos entre el intervalo actual de cambio de aceite y diversas propuestas extendidas basadas en condición, integra criterios técnicos, económicos y operativos que permitan determinar el impacto real de cada alternativa sobre el desempeño del motor Caterpillar CAT 3412 y del sistema de generación eléctrica. Este propósito examina la respuesta del lubricante, la estabilidad de los parámetros tribológicos, los eventos operativos y los requisitos de confiabilidad para establecer escenarios comparables y sustentados en evidencia.

La evaluación incorpora indicadores estandarizados de desempeño definidos por la norma UNE 15341, tales como costo de mantenimiento, disponibilidad técnica, tasa de fallas y eficiencia de ejecución. Estos indicadores permiten cuantificar de forma objetiva los efectos de mantener intervalos rígidos frente a adoptar intervalos extendidos basados en tendencia, y facilitan estimar el impacto económico asociado a consumibles, mano de obra, tiempos de parada y gestión de residuos. De igual manera, se consideran las implicaciones operativas en términos de continuidad energética, seguridad del proceso y estabilidad térmica del motor.

La síntesis de estos escenarios constituye un ejercicio integrador que combina análisis técnico con criterios estratégicos de gestión de activos. Este enfoque permite identificar el intervalo óptimo que equilibra seguridad operativa, confiabilidad del motor, eficiencia presupuestal y alineación con la política de sostenibilidad organizacional. La comparación estructurada aporta una base sólida para la toma de decisiones, reduce la incertidumbre del proceso de optimización y fortalece la capacidad institucional para evolucionar desde un mantenimiento tradicional hacia un mantenimiento verdaderamente orientado a la condición real del activo.

Metodológicamente, este objetivo corresponde al Nivel V – Sintetizar de la taxonomía de Bloom, ya que requiere integrar información diversa, estructurar alternativas coherentes y generar conclusiones comparativas que soporten decisiones estratégicas. A su vez, se articula con los eventos de Gagné asociados a la retroalimentación, la evaluación del desempeño y la transferencia del aprendizaje, los cuales permiten consolidar una síntesis robusta y aplicable dentro del modelo de optimización del mantenimiento(Quatrini et al., 2020a) .

La síntesis lograda en este objetivo constituye la base para el siguiente, orientado a integrar el modelo dentro de SAP PM, garantiza trazabilidad, estandarización y soporte documental dentro del Sistema de Gestión de Activos

Objetivo específico sexto – Planes de Mantenimiento.

El sexto objetivo específico busca actualizar y reorganizar el plan de mantenimiento optimizado del motor Caterpillar CAT 3412, integra los principios del Mantenimiento Basado en Condición (CBM) y de la Optimización del Plan de Mantenimiento (PMO) en un modelo documentado, trazable y estandarizado dentro del módulo SAP PM. Este propósito asegura que el plan resultante mantenga coherencia con los procesos de gestión de activos, las prácticas de sostenibilidad organizacional, las exigencias de mejora continua y los requisitos normativos aplicables en materia de monitoreo de condición, análisis de lubricante y confiabilidad operacional.

La actualización del plan implica estructurar tareas, frecuencias y criterios técnicos derivados de los análisis tribológicos, del comportamiento operativo del motor y del desempeño observado en los escenarios comparativos. Asimismo, requiere definir responsabilidades, recursos, repuestos críticos, criterios de activación y umbrales de alarma que permitan ejecutar el mantenimiento de forma proactiva y estandarizada. Este enfoque garantiza que el plan de

mantenimiento no solo responda a la condición real del motor, sino que pueda replicarse en otros equipos similares dentro de la organización, fortalece la estandarización y la consistencia operacional.

La integración con SAP PM constituye un componente esencial, ya que permite asegurar trazabilidad documental, control de versiones, recolección estructurada de datos, programación eficiente de actividades y verificación del cumplimiento. Al quedar dentro de un sistema corporativo, el PMO optimizado se consolida como un modelo verificable, auditable y adaptable a los ciclos de mejora continua exigidos por la Gestión de Activos. Este componente también facilita evaluar el impacto real de los cambios implementados y establecer correcciones futuras basadas en evidencia.

Metodológicamente, este objetivo corresponde al Nivel VI – Actualizar de la taxonomía de Bloom, ya que requiere integrar aprendizajes previos, reorganizar información compleja y construir un modelo operativo coherente con la estrategia general de mantenimiento. A su vez, se articula con los eventos superiores de Gagné asociados a la transferencia del conocimiento, la retroalimentación y la evaluación del desempeño, necesarios para convertir un análisis técnico en un plan operativo formal, robusto y replicable (Carnero et al., 2023a).

La consolidación de este objetivo constituye el cierre metodológico del estudio, orientado a garantizar que el mantenimiento del motor CAT 3412 evolucione hacia un esquema sostenible, gobernado por evidencia técnica y plenamente alineado con los principios de confiabilidad, eficiencia y gestión del riesgo dentro de la organización

Marco teórico

Antecedentes de la investigación o del proyecto

La operación continua de motores a gas utilizados en sistemas de generación eléctrica ha impulsado la evolución de estrategias de mantenimiento que integran el comportamiento del lubricante como un indicador clave de la condición del activo. En la última década, diversos estudios han demostrado que los parámetros tribológicos permiten identificar patrones de degradación, anticipar modos de falla y optimizar frecuencias de intervención, especialmente en motores expuestos a cargas variables y a regímenes térmicos elevados. La literatura coincide en que el aceite registra con alta precisión los efectos combinados del desgaste, la contaminación y la degradación química, convirtiéndose en una fuente confiable de información para la toma de decisiones técnicas (Zhu et al., 2017a).

El análisis de aceite se consolida hoy como una herramienta estratégica dentro del mantenimiento de motores estacionarios y equipos rotativos de alta criticidad. Su relevancia radica en su capacidad para reflejar fenómenos internos como desgaste abrasivo y adhesivo, oxidación, nitración, dilución por combustible y pérdida de efectividad de los aditivos. Investigaciones desarrolladas en motores industriales, sistemas de compresión y unidades de generación eléctrica han demostrado que la interpretación de las tendencias tribológicas ofrece una representación fiel de la integridad del motor, incluso en condiciones de operación fluctuante o severa. Esta capacidad diagnóstica resulta especialmente valiosa en activos sometidos a operación continua, donde cualquier desviación puede afectar la disponibilidad energética del proceso (Paladugu et al., 2018a).

Las metodologías modernas de Mantenimiento Basado en Condición (CBM) integran el análisis de lubricante como uno de sus pilares esenciales debido a su sensibilidad frente a los

mecanismos de degradación que afectan directamente la confiabilidad del motor. Estudios clásicos y recientes en monitoreo de condición evidencian que parámetros como viscosidad, oxidación, nitración, dispersión y concentración de metales de desgaste permiten estimar la severidad de los procesos internos y soportar decisiones sobre la extensión de los intervalos de cambio, la optimización de tareas preventivas y la reducción de intervenciones innecesarias. En este contexto, la literatura destaca que un diagnóstico fundamentado en tendencias tribológicas potencia la disponibilidad y reduce costos sin comprometer la integridad del activo (Jardine et al., 2006a).

En el sector energético, estas prácticas adquieren un papel determinante. La confiabilidad del suministro depende de equipos como el motor Caterpillar 3412 a gas, cuya función crítica exige estrategias de mantenimiento robustas, fundamentadas y trazables. La gestión moderna de activos, tal como lo señala la investigación especializada, requiere que la toma de decisiones se base en información técnica verificable, análisis de riesgos y criterios integrados que reflejen el comportamiento real del activo durante su ciclo de vida. Esto incluye no solo el análisis del lubricante, sino su integración con datos operativos, históricos de fallas y mecanismos de degradación asociados al entorno operativo del motor (Carnero et al., 2023a).

En conjunto, estos antecedentes demuestran que el análisis de lubricante representa una oportunidad estratégica para optimizar la gestión del mantenimiento del motor CAT 3412 y avanzar hacia un modelo operativo sustentado en evidencias técnicas, capaz de mejorar la confiabilidad, reducir costos y fortalecer la eficiencia energética del sistema de generación. Esta base teórica se conecta directamente con los objetivos específicos del estudio, orientados a caracterizar el lubricante, analizar tendencias de degradación y validar escenarios de intervalos extendidos dentro de un esquema de gestión de activos moderno.

Estado del arte

El análisis de lubricante ha experimentado una transformación significativa en las últimas décadas, pasa de ser una técnica complementaria dentro del mantenimiento tradicional a consolidarse como un método central en los sistemas modernos de diagnóstico y monitoreo de condición. Este avance se debe a la capacidad del lubricante para registrar, de manera fiel y continua, los efectos combinados de la fricción, el desgaste, la degradación térmica y la presencia de contaminantes, aspectos que influyen directamente en el desempeño y la confiabilidad de motores a gas operados en régimen continuo. La literatura reporta una evolución constante en la interpretación de parámetros tribológicos y físico-químicos, lo que ha permitido desarrollar modelos predictivos orientados a mejorar la disponibilidad operativa y reducir costos asociados al mantenimiento (Zhu et al., 2017a).

Los estudios más recientes destacan que parámetros como oxidación, nitración, viscosidad, número ácido, dilución de combustible y metales de desgaste constituyen indicadores altamente sensibles frente a las condiciones reales de operación. Sus variaciones permiten identificar mecanismos de degradación asociados a cargas térmicas severas, ineficiencias en la combustión, procesos de corrosión interna y aparición de desgaste adhesivo o abrasivo. En motores estacionarios y sistemas industriales de generación eléctrica, estos parámetros han demostrado gran utilidad para la detección temprana de fallas y para la extensión controlada de los intervalos de cambio de aceite, siempre que exista un control adecuado sobre el entorno operativo del equipo (del Río et al., 2023a).

Asimismo, el estado del arte en el ámbito del Mantenimiento Basado en Condición (CBM) evidencia la integración del análisis de lubricante como uno de los pilares más robustos dentro de las estrategias de diagnóstico. Investigaciones seminales y estudios contemporáneos describen metodologías estructuradas que combinan datos históricos de laboratorio, análisis

por tendencias y correlación con variables operativas para determinar la condición real del motor y establecer intervenciones fundamentadas en evidencia técnica. Este enfoque ha demostrado ser eficaz para optimizar frecuencias de mantenimiento, reducir intervenciones innecesarias y mitigar riesgos asociados al deterioro acelerado en unidades sometidas a operación continua (Jardine et al., 2006a).

A nivel industrial, los modelos de pronóstico del comportamiento del lubricante se han reforzado mediante técnicas estadísticas, análisis multivariante, algoritmos de predicción y metodologías orientadas a la confiabilidad. Estos desarrollos han incrementado la capacidad para estimar la vida útil remanente del aceite y anticipar la pérdida de funcionalidad del motor bajo diferentes escenarios de carga y condiciones ambientales. En motores estacionarios alimentados con gas natural, similares al Caterpillar 3412 analizado en este proyecto, la estabilidad tribológica puede mantenerse durante periodos prolongados siempre que se controle el desempeño de la combustión, la estabilidad térmica y la calidad del gas combustible. Esta evidencia respalda la conveniencia de utilizar el análisis por tendencias como fundamento para definir intervalos óptimos de cambio en lugar de depender exclusivamente de rutinas calendarizadas (Telford et al., 2011a).

En su conjunto, el estado del arte confirma que el análisis de lubricante es hoy una herramienta madura, ampliamente validada y aplicada en motores a gas para diagnosticar la condición de los equipos, optimizar estrategias de mantenimiento y reducir la variabilidad operativa. Estos avances técnicos y metodológicos proporcionan el sustento científico y práctico del presente proyecto, justifican el uso del lubricante como variable central en el diagnóstico y respaldan la pertinencia de establecer un intervalo de cambio de aceite basado en condición para el motor Caterpillar 3412 perteneciente al sistema de generación eléctrica de la organización. Esta base teórica se enlaza directamente con los objetivos específicos del

estudio, orientados a caracterizar el lubricante, analizar tendencias de degradación y validar escenarios de intervalos extendidos dentro de un esquema de gestión de activos moderno.

Gestión de activos y ciclo de vida

La gestión de activos se reconoce hoy como un enfoque integral que permite maximizar el valor que los activos generan a lo largo de todo su ciclo de vida, integra dimensiones técnicas, operativas, financieras y estratégicas dentro de un marco estructurado. Desde la perspectiva de la literatura especializada, este enfoque se fundamenta en la necesidad de asegurar que cada activo cumpla su función requerida con niveles adecuados de desempeño, riesgo y costo, en coherencia con los objetivos organizacionales y con los principios establecidos por estándares internacionales como la ISO 55000 (Carnero et al., 2023a).

El ciclo de vida de un activo abarca fases interdependientes —planificación, adquisición, puesta en servicio, operación, mantenimiento y disposición final— cuyas decisiones influyen directamente en la confiabilidad, disponibilidad, seguridad y costos globales del sistema productivo. La evidencia indica que las organizaciones que integran la perspectiva del ciclo de vida logran mejorar su capacidad de anticipar riesgos, optimizar inversiones y alinear las decisiones técnicas con las prioridades estratégicas del negocio. En activos críticos como el motor Caterpillar 3412 a gas, cuyo rol dentro del sistema de generación eléctrica es garantizar la continuidad energética, la gestión del ciclo de vida adquiere especial relevancia debido a las exigencias operativas y a la necesidad de asegurar estabilidad en condiciones de operación continua.

Los modelos contemporáneos de gestión de activos enfatizan el uso de información basada en condición como un insumo esencial para decisiones relacionadas con mantenimiento, reemplazo, optimización de recursos y evaluación de riesgos. Dentro de este

enfoque, el análisis del lubricante representa una herramienta particularmente valiosa, ya que proporciona información sensible sobre los mecanismos de degradación que afectan la integridad del motor. La combinación de tendencias tribológicas, datos históricos de operación y eventos de mantenimiento permite fortalecer la capacidad de predecir desviaciones, controlar riesgos y establecer estrategias más coherentes con el comportamiento real del activo.

En motores a gas, la inclusión de técnicas como el análisis de aceite dentro del ciclo de vida operacional aporta beneficios adicionales: mejora la trazabilidad técnica del equipo, identifica patrones de degradación relacionados con la carga y la combustión, y respalda la definición de estrategias de intervención que protegen la integridad del motor sin incurrir en costos innecesarios. Estos elementos se alinean con los principios de la gestión moderna de activos, en la cual la toma de decisiones se fundamenta en datos verificados, evaluación estructurada del riesgo, análisis económico y criterios de desempeño orientados al largo plazo.

El fortalecimiento de la gestión del ciclo de vida mediante el uso disciplinado del análisis tribológico permite establecer intervenciones más precisas y adaptadas al estado real del motor. Este enfoque no solo respalda la optimización del intervalo de cambio de aceite, sino que contribuye a reducir la variabilidad operativa, mejorar la confiabilidad del sistema de generación y asegurar que las estrategias de mantenimiento mantengan coherencia con las metas estratégicas de la organización y con los principios de sostenibilidad operativa. En consecuencia, estos fundamentos conceptuales se enlazan directamente con los objetivos específicos del estudio, orientados a caracterizar el lubricante, analizar tendencias de degradación y validar escenarios de intervalos extendidos dentro de un esquema de gestión de activos moderno.

Optimización de planes de mantenimiento (PMO)

La Optimización de Planes de Mantenimiento (PMO) constituye una metodología orientada a incrementar la efectividad y eficiencia de las actividades de mantenimiento mediante una revisión crítica y estructurada de las tareas existentes, sus frecuencias, los recursos involucrados y su impacto real sobre el desempeño del activo. Su propósito fundamental es asegurar que cada intervención aporte valor técnico y operativo, elimina actividades innecesarias, fortalece la gestión del riesgo y mejora la relación costo–desempeño del sistema productivo. En esencia, la PMO busca que el plan de mantenimiento responda de manera directa a la condición del activo y a los objetivos estratégicos de la organización (Quatrini et al., 2020a)).

Los procesos de PMO se sustentan en metodologías sistemáticas que permiten clasificar, evaluar y depurar cada tarea del plan según su pertinencia, criticidad, contribución al control del riesgo y capacidad para mitigar modos de falla relevantes. La literatura especializada resalta que la PMO incrementa la confiabilidad del equipo al reducir tareas de bajo valor agregado, ajustar frecuencias según datos reales de operación y priorizar intervenciones que controlen mecanismos de degradación con mayor impacto técnico u operacional. Este enfoque garantiza que el mantenimiento mantenga coherencia con los principios de costo óptimo, disponibilidad y seguridad del activo.

En activos sometidos a operación continua, como el motor Caterpillar 3412 a gas del sistema de generación, la aplicación rigurosa de la PMO permite identificar tareas redundantes, actividades con sobre frecuencia y rutinas que ya no reflejan las condiciones operativas del proceso. La revisión periódica del plan facilita ajustar estrategias de mantenimiento en función de patrones de desgaste, cargas térmicas, variaciones en la combustión y tendencias del lubricante, elementos que influyen de forma directa en la integridad mecánica del motor. Al

adoptar este enfoque dinámico, la PMO se transforma en un mecanismo esencial para extender la vida útil del motor y sostener la confiabilidad requerida en un entorno de operación 24/7.

La evidencia técnica demuestra que la PMO alcanza su mayor efectividad cuando integra información proveniente de técnicas de monitoreo de condición, tales como análisis de vibraciones, termografía infrarroja y análisis de aceite. Esta última técnica ofrece un nivel de sensibilidad particularmente alto frente a los mecanismos internos de degradación, lo que permite vincular las tendencias tribológicas con modos de falla específicos y ajustar las tareas preventivas y predictivas hacia un modelo verdaderamente basado en condición. De esta manera, la PMO deja de ser un proceso estático para convertirse en un sistema vivo, adaptable y sustentado en evidencia técnica.

Además de los beneficios técnicos, la optimización del plan de mantenimiento contribuye significativamente a la reducción de costos operativos mediante la eliminación de actividades sin valor técnico, la mejora de los tiempos de intervención, la priorización de recursos y la alineación del plan con la criticidad del activo. Estudios recientes confirman que una PMO estructurada incrementa la disponibilidad operacional, reduce paradas no programadas y fortalece el control del riesgo, aspectos esenciales en sistemas donde la continuidad del servicio constituye un requisito estratégico.

En conjunto, la PMO representa un componente estratégico dentro de la gestión del mantenimiento del motor CAT 3412 a gas, ya que garantiza que todas las actividades ejecutadas respondan a la condición real del activo, contribuyan de manera efectiva al desempeño del sistema de generación y sostengan la confiabilidad requerida para la operación continua. Su integración con el análisis de lubricante refuerza la capacidad de la organización

para tomar decisiones basadas en evidencia, optimizar recursos y consolidar una gestión de activos moderna, eficiente y alineada con los principios internacionales del ciclo de vida. En consecuencia, este fundamento teórico se enlaza directamente con los objetivos específicos del estudio, orientados a caracterizar el lubricante, analizar tendencias de degradación y validar escenarios de intervalos extendidos dentro de un esquema de mantenimiento optimizado.

Mantenimiento basado en condición (CBM)

El Mantenimiento Basado en Condición (CBM, por sus siglas en inglés) se reconoce como una estrategia orientada a ejecutar intervenciones únicamente cuando la condición real del activo lo justifica, reemplaza los esquemas tradicionales basados en horas de operación o ciclos predeterminados. Este enfoque incrementa la confiabilidad, optimiza recursos y reduce la variabilidad del mantenimiento al fundamentarse en información técnica que refleja directamente los mecanismos de degradación y el comportamiento funcional del equipo. Su aplicación es especialmente valiosa en motores a gas sometidos a operación continua, donde las condiciones térmicas, de carga y combustión pueden variar de manera significativa a lo largo del tiempo (Jardine et al., 2006a).

En entornos industriales modernos, el CBM integra un conjunto de técnicas de monitoreo —vibraciones, termografía, ultrasonido, análisis eléctrico y análisis de lubricante— que permiten evaluar el estado interno del activo desde diferentes perspectivas. Cada técnica aporta sensibilidad frente a modos de falla específicos, lo que facilita una visión más completa de la salud del equipo. Entre ellas, el análisis de lubricante se destaca como una de las más efectivas para motores de combustión interna y equipos rotativos, debido a su capacidad para identificar desgaste, contaminación, degradación química, variaciones térmicas y pérdida de efectividad de los aditivos. La literatura reciente confirma que los parámetros tribológicos

ofrecen una lectura sensible y directa de los procesos internos del motor, incluso en escenarios donde otras técnicas no evidencian cambios significativos (Zhu et al., 2017b).

El CBM genera beneficios sustanciales en términos de disponibilidad operacional, confiabilidad y reducción de costos, ya que permite evitar intervenciones innecesarias y focalizar los esfuerzos de mantenimiento en desviaciones verificadas mediante datos operativos. En el caso del motor Caterpillar 3412 a gas utilizado dentro del sistema de generación eléctrica, este enfoque adquiere un valor estratégico: captura variaciones en la carga, detecta desviaciones en la combustión, identifica procesos de oxidación acelerada del lubricante y permite ajustar tareas y frecuencias según la condición real del motor, en lugar de depender de supuestos estrictos de diseño o prácticas heredadas.

Uno de los elementos centrales del CBM es el análisis por tendencias. La evaluación periódica de parámetros tribológicos —viscosidad, oxidación, nitración, TAN, partículas metálicas y contaminantes— permite construir una representación cronológica del deterioro interno del motor y anticipar la evolución de los mecanismos de desgaste. Este enfoque favorece decisiones oportunas sobre el cambio de aceite, inspecciones internas, ajustes operativos y modificaciones en la estrategia de mantenimiento, lo que contribuye a sustituir modelos rígidos basados en intervalos fijos por modelos adaptativos sustentados en datos de condición (del Río et al., 2023a).

El CBM también fortalece de manera decisiva los procesos de Optimización de Planes de Mantenimiento (PMO). Al proporcionar evidencia técnica sobre la efectividad real de las tareas existentes, permite identificar actividades de bajo valor, ajustar frecuencias, eliminar redundancias y priorizar intervenciones que controlen modos de falla críticos. Esta integración entre CBM y PMO mantiene coherencia con los principios de la gestión de activos, los cuales

establecen que las decisiones deben basarse en datos confiables, evaluación estructurada de riesgos y criterios verificables de desempeño y sostenibilidad (Carnero et al., 2023a).

En síntesis, el Mantenimiento Basado en Condición se consolida como una estrategia fundamental para activos críticos del sistema de generación eléctrica, como el motor CAT 3412 a gas. Su implementación permite ajustar el mantenimiento a las necesidades reales del equipo, reducir costos operativos, prolongar la vida útil del lubricante y fortalecer la confiabilidad del sistema; todo ello dentro de un marco moderno de gestión de activos orientado al ciclo de vida y a la toma de decisiones basada en evidencia. Esta base conceptual se enlaza directamente con los objetivos específicos del estudio, orientados a caracterizar el lubricante, analizar tendencias de degradación y validar escenarios de intervalos extendidos dentro de un esquema de mantenimiento optimizado.

Tribología como herramienta de CBM

La tribología se posiciona como uno de los pilares más sólidos dentro del Mantenimiento Basado en Condición (CBM), dado que permite comprender los fenómenos fundamentales de fricción, desgaste y lubricación que ocurren en el interior del motor. Como disciplina científica, ofrece un marco conceptual para interpretar los procesos físico-químicos que afectan el desempeño del lubricante y, por consiguiente, la integridad mecánica del activo. Su capacidad para explicar la interacción entre superficies, cargas, temperatura y lubricante convierte a la tribología en una herramienta esencial para diagnosticar el estado del motor y anticipar desviaciones que podrían desembocar en fallas.

En motores a gas como el Caterpillar 3412, la tribología adquiere un rol aún más relevante debido a las particularidades del proceso de combustión del gas natural, las altas temperaturas de operación, las variaciones térmicas inherentes a los cambios de carga y la

exigencia de operar en régimen continuo. Estas condiciones favorecen procesos de degradación tales como oxidación, nitración, degradación de aditivos, formación de productos insolubles y generación de partículas metálicas. La evaluación sistemática del lubricante permite detectar estos mecanismos de deterioro con alto nivel de sensibilidad, incluso antes de que se manifiesten síntomas funcionales en el motor.

Desde la perspectiva del CBM, el análisis de lubricante se consolida como una herramienta diagnóstica de primera línea. Los parámetros tribológicos —como viscosidad, oxidación, nitración, número ácido (TAN), metales de desgaste y contaminantes— permiten inferir la condición interna del motor mediante el seguimiento estructurado de sus tendencias. Investigaciones en motores estacionarios y unidades de generación han demostrado que estos parámetros ofrecen información precisa sobre mecanismos como desgaste abrasivo, corrosivo, fatiga superficial, degradación térmica del aceite y pérdida de desempeño de los aditivos. Su monitoreo frecuente habilita la detección temprana de desviaciones, factor clave para proteger la confiabilidad del equipo (Wolak et al., 2020a).

La sensibilidad de los parámetros tribológicos frente a variaciones en carga, temperatura, combustión y estabilidad térmica convierte al análisis tribológico en una herramienta robusta para la toma de decisiones basadas en condición. Su integración con variables operativas —consumo de combustible, temperaturas de escape, estabilidad del gas, comportamiento térmico del aceite— permite interpretar las causas raíz del deterioro, ajustar intervalos de cambio de aceite, orientar inspecciones internas y prevenir fallas asociadas a degradación acelerada del lubricante.

La tribología también fortalece los procesos de Optimización de Planes de Mantenimiento (PMO). Al proporcionar datos verificables sobre el estado real del motor, permite

evaluar la pertinencia técnica de las tareas existentes, ajustar frecuencias de intervención, eliminar actividades sin valor agregado y priorizar acciones que mitiguen riesgos críticos. La evidencia científica confirma que el análisis tribológico dentro del CBM mejora la confiabilidad operacional, reduce intervenciones innecesarias y optimiza el costo total del mantenimiento, especialmente en activos críticos que operan en condiciones exigentes.

En el caso del motor Caterpillar 3412 a gas, la tribología permite visualizar con claridad el comportamiento del lubricante a lo largo del tiempo y correlacionarlo con los mecanismos reales de degradación que se manifiestan durante la operación del sistema de generación eléctrica. Esta capacidad analítica convierte al análisis tribológico en un elemento indispensable para sustentar decisiones sobre el intervalo óptimo de cambio de aceite, mejorar la confiabilidad del activo y garantizar la continuidad operativa del sistema de generación (Paladugu et al., 2018a).

En consecuencia, la tribología se enlaza directamente con los objetivos específicos del estudio, orientados a caracterizar el lubricante, analizar tendencias de degradación y validar escenarios de intervalos extendidos dentro de un esquema de mantenimiento optimizado y basado en condición.

Indicadores de Desempeño

Los indicadores de desempeño se reconocen hoy como herramientas esenciales para evaluar la eficacia del mantenimiento, la confiabilidad del activo y el impacto de las decisiones técnicas sobre la estabilidad operacional del sistema. Su propósito es medir, de manera objetiva, trazable y comparable, el cumplimiento de metas operativas, la gestión del riesgo y la optimización del ciclo de vida del activo. En el marco de la gestión moderna de activos, los

indicadores actúan como un lenguaje común que permite alinear el desempeño técnico con los objetivos estratégicos de la organización.

En el contexto del sistema de generación eléctrica y, en particular, del motor Caterpillar 3412 a gas, los indicadores permiten monitorear la estabilidad operativa, identificar desviaciones tempranas, medir la efectividad del mantenimiento preventivo, predictivo y basado en condición, y evaluar la capacidad del motor para responder a cargas variables y condiciones térmicas exigentes. La literatura especializada resalta que el uso integrado de indicadores robustos fortalece la toma de decisiones basada en evidencia, mejora la confiabilidad del proceso y permite validar el aporte real de las intervenciones de mantenimiento dentro del sistema (Ali & Abdelhadi, 2022a).

Entre los indicadores más relevantes para motores estacionarios y sistemas rotativos se destacan:

- Disponibilidad Operacional (A_0): Expresa la proporción del tiempo en que el motor permanece en condición operativa respecto al tiempo total requerido. En sistemas de generación continua, este indicador es crítico, ya que la disponibilidad afecta directamente la estabilidad energética del proceso y la continuidad del servicio.
- Confiabilidad ($R(t)$): Representa la probabilidad de que el motor opere sin fallas durante un periodo específico. Su análisis se fortalece cuando incorpora información proveniente del análisis de lubricante y otras técnicas de monitoreo de condición, lo que permite una predicción más realista del comportamiento del equipo.
- Mantenibilidad ($M(t)$): Mide la capacidad de ejecutar intervenciones de mantenimiento de manera eficiente y en tiempos controlados. En motores donde la estabilidad del lubricante

reduce la frecuencia de intervenciones correctivas, la mantenibilidad mejora al disminuir la probabilidad de paradas imprevistas.

- **Indicadores Tribológicos:** Incluyen parámetros como viscosidad, oxidación, nitración, número ácido (TAN), partículas metálicas y contaminantes. La evaluación por tendencias de estos indicadores permite anticipar mecanismos de degradación interna, identificar desviaciones térmicas y químicas, y orientar decisiones sobre intervalos de cambio, inspecciones internas y ajustes operativos.
- **Índice de Cumplimiento del Plan de Mantenimiento (ICP):** Evalúa el grado de ejecución del plan de mantenimiento frente a lo programado. Su análisis permite identificar atrasos, sobrecarga de tareas, actividades sin aporte técnico o desviaciones atribuibles a mala planificación o insuficiencia de recursos.

En síntesis, la medición integrada de estos indicadores no solo permite evaluar la eficacia del mantenimiento y la confiabilidad del motor CAT 3412, sino que también constituye la base para validar la efectividad del CBM y la pertinencia de la PMO dentro de la gestión de activos. Esta perspectiva se enlaza directamente con los objetivos específicos del estudio, orientados a caracterizar el lubricante, analizar tendencias tribológicas y definir intervalos de cambio de aceite sustentados en condición, asegura coherencia metodológica y aplicabilidad práctica en el sistema de generación eléctrica (Quatrini et al., 2020a).

Metodología

La metodología se estructura en seis fases secuenciales que permiten diagnosticar el estado del motor Caterpillar 3412 a gas, evaluar la estabilidad tribológica del lubricante, definir criterios de decisión basados en condición y validar un intervalo óptimo de cambio de aceite

mediante una implementación piloto. Cada fase mantiene coherencia con los objetivos del estudio y se fundamenta en principios del Mantenimiento Basado en Condición (CBM), la Optimización del Plan de Mantenimiento (PMO) y los lineamientos de la gestión moderna de activos.

Enfoque metodológico

El estudio adopta un enfoque cuantitativo–analítico sustentado en la interpretación de parámetros tribológicos, datos operativos del motor y criterios técnicos propios del CBM. Este enfoque permite evaluar el comportamiento del lubricante, identificar mecanismos de degradación interna, correlacionar variables térmicas y de carga, y sustentar decisiones sobre el intervalo óptimo de cambio de aceite. La metodología integra conceptos de confiabilidad, tribología aplicada y toma de decisiones basada en datos verificables, lo que garantiza rigor técnico y trazabilidad del proceso.

Fases

La metodología propuesta se desarrolla en seis fases que aseguran la reproducibilidad, trazabilidad y consistencia del modelo CBM–PMO aplicado al motor CAT 3412.

Fase 1 — Diagnóstico técnico-operativo

Esta fase caracteriza el comportamiento histórico y actual del motor, incluye:

historial de operación:

- Análisis de cargas eléctricas
- Comportamiento térmico del lubricante
- Registros de mantenimiento
- Desempeño de parámetros críticos (presión, temperatura, horas, combustión).

Este diagnóstico establece la condición operacional base y permite identificar factores que influyen directamente en la degradación del lubricante, tales como estabilidad térmica, variaciones de combustión y exigencias del sistema de generación.

Fase 2 — Diseño del plan de muestreo tribológico

En esta fase se estructura el plan técnico de toma y evaluación de muestras de aceite, así:

- Puntos de muestreo certificados y accesibles
- Periodicidad adecuada para operación continua
- Parámetros físico-químicos a evaluar (viscosidad, oxidación, nitración, tan, metales, contaminantes)
- Técnicas de laboratorio conforme normas ASTM
- Cadena de custodia, trazabilidad y registros

El plan garantiza confiabilidad en los datos, representatividad de las muestras y consistencia en las mediciones tribológicas.

Fase 3 — Definición de criterios técnicos de decisión (CBM)

Se establecen los criterios que permitirán determinar acciones basadas en condición:

- Límites aceptables de oxidación, nitración y viscosidad
- Tendencia crítica de tan
- Patrones de desgaste metálico admisibles
- Niveles tolerables de contaminación
- Umbrales de alerta vs. Intervención

Estos criterios se fundamentan en:

- Tendencias del lubricante
- Comportamiento histórico del motor CAT 3412
- Literatura técnica del CBM, tribología y motores a gas
- Correlación con variables térmicas y operativas

El resultado es una matriz decisional CBM que orienta acciones de mantenimiento basadas en evidencia

Fase 4 — Implementación piloto del modelo CBM

El modelo se aplica de manera controlada al motor CAT 3412 mediante:

- Seguimiento periódico de parámetros tribológicos
- Validación de tendencias por comparación histórica
- Evaluación frente al intervalo de cambio tradicional
- Análisis de consistencia operativa
- Verificación de coherencia técnica con la operación real

Esta fase permite confirmar la estabilidad del lubricante bajo operación continua y validar técnicamente la viabilidad del intervalo extendido

Fase 5 — Evaluación mediante KPIs estandarizados

La efectividad del modelo se evalúa mediante indicadores como:

- Disponibilidad operacional
- Confiabilidad
- Estabilidad tribológica del lubricante
- Reducción de intervenciones preventivas

- Disminución del consumo de aceite y filtros
- Número de desviaciones detectadas
- Índice de cumplimiento del plan de mantenimiento (icp)

Estos indicadores permiten comparar la condición antes y después de la implementación del modelo CBM–tribológico, evidencia su impacto técnico, operativo y económico

Fase 6 — Estandarización del modelo optimizado en SAP PM

La última fase integra el modelo validado dentro del sistema corporativo SAP PM mediante:

- Actualización de tareas y frecuencias
- Incorporación de criterios y umbrales CBM
- Estandarización de parámetros tribológicos como requisitos técnicos
- Creación de rutinas basadas en condición
- Registro documentado y trazable del PMO actualizado

La estandarización garantiza sostenibilidad, repetibilidad y control del modelo dentro del sistema de generación eléctrica.

En síntesis, la metodología propuesta asegura que cada fase se articule de manera coherente con los objetivos específicos del estudio, desde la caracterización inicial del motor hasta la estandarización del modelo optimizado en SAP PM. Este diseño metodológico garantiza reproducibilidad, rigor técnico y aplicabilidad práctica, consolida un esquema de mantenimiento basado en condición que fortalece la confiabilidad del motor CAT 3412 y la sostenibilidad del sistema de generación eléctrica.

Resultados esperados

Los resultados esperados del proyecto se estructuran en tres dimensiones complementarias —económica, técnica y estratégica— que permiten evaluar con claridad el impacto del modelo PMO + CBM aplicado al motor Caterpillar 3412 dentro del sistema de generación eléctrica. Esta organización responde a los lineamientos de la UNE 15341 y a los criterios del SMRP, garantiza coherencia metodológica y pertinencia con la gestión del mantenimiento y la confiabilidad.

Dimensión Económica

El proyecto anticipa una reducción del OPEX entre el 20 % y el 25 %, fundamentada en tres mecanismos principales:

- Optimización de frecuencias: La extensión del intervalo de cambio de aceite, sustentada en tendencias tribológicas verificables, disminuye el consumo de lubricante y filtros sin comprometer la confiabilidad del motor.
- Eliminación de tareas sin valor técnico: La aplicación de PMO permite depurar actividades rutinarias que no aportan a la integridad del activo y que generan costos operativos innecesarios.
- Reducción de intervenciones preventivas innecesarias: Un modelo basado en condición evita reemplazos prematuros que incrementan costos y afectan la disponibilidad.

El impacto económico se traduce en una mejora sostenida de la relación costo–beneficio, un control más eficiente del presupuesto de mantenimiento y una disminución del volumen de residuos generados por cambios frecuentes.

Dimensión Técnica

Desde la perspectiva técnica, se proyectan mejoras directamente asociadas al desempeño del activo:

- Disponibilidad operacional ≥ 97 %, alineada con los indicadores de desempeño de la UNE 15341 y con los requerimientos del sistema de generación eléctrica.
- Reducción cercana al 30 % en fallas correctivas, gracias a:
 - La interpretación sistemática de tendencias tribológicas
 - La detección temprana de desviaciones
 - Y la definición de criterios CBM coherentes con el comportamiento del lubricante bajo operación continua.
- Mayor confiabilidad estructural del motor, debido a la estabilidad del lubricante y al control técnico de los mecanismos de degradación.

Este fortalecimiento técnico responde al principio central de la gestión de activos: garantizar que el activo cumpla su función requerida con niveles adecuados de desempeño, riesgo y costo.

Dimensión Estratégica

En la dimensión estratégica, el proyecto genera beneficios clave para la organización:

- Integración del modelo optimizado en SAP PM, lo que permite:
 - asegurar trazabilidad documental
 - estandarizar rutinas y frecuencias
 - incorporar criterios CBM en órdenes y planes
 - sostener la mejora continua dentro del sistema corporativo.
- Alineación con los principios de gestión de activos de la ISO 55000, fortalece la toma de decisiones basada en evidencia técnica.
- Contribución a la sostenibilidad ambiental, mediante la disminución en la generación de residuos peligrosos asociados al manejo de aceites usados y filtros, aspecto que en operaciones continuas tiene un impacto significativo.

En conjunto, esta dimensión consolida el carácter estratégico del proyecto al conectar el mantenimiento con la visión institucional, los objetivos operativos y la responsabilidad ambiental.

Síntesis Integrada

En síntesis, los resultados esperados muestran que la implementación del modelo PMO + CBM no solo mejora la eficiencia técnica y reduce los costos, sino que transforma la lógica del mantenimiento del motor CAT 3412 al pasar de un enfoque rígido por horas a un enfoque adaptativo basado en condición, plenamente alineado con las mejores prácticas internacionales. Esta evidencia proyectada valida la pertinencia del modelo y demuestra que su adopción fortalece la confiabilidad, la disponibilidad, el uso eficiente de recursos y la sostenibilidad operativa del sistema de generación eléctrica. Además, asegura coherencia con los objetivos específicos del estudio y consolida la integración del mantenimiento dentro de la estrategia institucional de gestión de activos.

KPIs

Los indicadores clave de desempeño constituyen el mecanismo formal para evaluar el impacto real del modelo PMO + CBM aplicado al motor CAT 3412. Su estructuración sigue los lineamientos de la UNE 15341, que organiza los KPIs en tres categorías —económicos (A), técnicos (B) y organizativos (C)— permite medir de manera integral la eficiencia, la confiabilidad y la madurez del proceso de mantenimiento dentro del sistema de generación eléctrica.

Indicadores económicos

Esta categoría analiza la eficiencia del uso de recursos financieros asociados al mantenimiento del motor CAT 3412, especialmente en un contexto de operación continua donde cada intervención tiene impacto operativo y presupuestal. Los principales KPIs incluyen:

- OPEX de lubricantes y filtros: Permite determinar la variación del costo total anual asociado al consumo de aceite y elementos filtrantes, compara el plan tradicional con el modelo basado en condición.
- Costo por intervención: Evalúa el costo directo de ejecutar un cambio de aceite, incluye mano de obra, materiales y tiempos de indisponibilidad generados por la tarea.
- Costo por hora operativa del motor: Integra el gasto de mantenimiento en relación con las horas efectivas de operación. Una extensión del intervalo de cambio reduce este indicador de forma significativa.
- Costos evitados: Cuantifica el impacto positivo del modelo mediante la reducción de actividades prematuras, eliminación de tareas sin aporte técnico y optimización del uso de insumos.

Propósito: Demostrar que el modelo no solo funciona técnicamente, sino que genera eficiencia económica sostenible, especialmente relevante para activos críticos con operación 24/7.

Indicadores Técnicos

Miden el desempeño del activo y su confiabilidad bajo operación real, refleja si el modelo PMO + CBM mejora la estabilidad operativa del sistema de generación.

- Disponibilidad operacional (≥ 97 % esperado): Es un KPI determinante en equipos cuya función es garantizar continuidad energética. Permite validar la efectividad técnica del modelo.
- MTBF (Mean Time Between Failures): Aumenta cuando disminuyen los eventos correctivos, especialmente aquellos derivados de degradación acelerada del lubricante.
- Tasa de fallas correctivas por cada 1.000 horas: Indicador clave para motores estacionarios de gas natural. Su reducción evidencia estabilidad mecánica y efectividad del monitoreo tribológico.
- Frecuencia de intervenciones no programadas: Permite verificar si el modelo reduce la variabilidad operacional y la necesidad de atención reactiva.
- Estabilidad tribológica del lubricante: Mide la consistencia de las tendencias en viscosidad, oxidación, nitración, TAN y metales. Es el corazón técnico del modelo CBM aplicado.

Propósito: Corroborar que el motor opera mejor, falla menos, y mantiene condiciones internas controladas gracias al análisis tribológico y la toma de decisiones basada en datos

Indicadores Organizativos

Evalúan la madurez del sistema de mantenimiento y su capacidad para sostener el modelo PMO + CBM en el tiempo.

- Cumplimiento del plan en SAP PM (ICP): Permite identificar retrasos, desviaciones o sobrecarga operativa.
- Tiempo de cierre de órdenes de trabajo: Un indicador usado ampliamente en auditorías ISO 55001; mide disciplina operativa.

- Evidencia documental para auditorías: Garantiza trazabilidad, estandarización y cumplimiento normativo.
- Nivel de estandarización de tareas y frecuencias: Evalúa si la organización ha logrado incorporar CBM dentro de sus rutinas formales.
- Integración del CBM en los flujos de trabajo: Refleja la madurez en el uso de análisis tribológico como herramienta de decisión.

Propósito: Confirmar que el modelo se institucionaliza, no queda como un proyecto aislado, y fortalece la cultura de gestión de activos.

En conjunto, los KPIs permiten evaluar el impacto del modelo PMO + CBM en las dimensiones económica, técnica y organizacional, asegura que la propuesta no solo genere ahorros, sino que incremente la confiabilidad del motor CAT 3412 y fortalezca el sistema de gestión de activos conforme a los principios de la ISO 55000.

Tabla 2

Comparación de reducción OPEX

Parámetro	Antes (plan tradicional)	Después (PMO + CBM)	Impacto esperado
Frecuencia cambio de aceite	Cada 2.000 h	≥ 2.500 h	Optimización de frecuencia
OPEX lubricantes/filtros	Fijo	Reducción 20–25%	Ahorro económico significativo

Nota. La tabla compara el comportamiento de los principales parámetros operativos bajo dos esquemas: el plan de mantenimiento tradicional y el modelo optimizado PMO + CBM.

- Frecuencia de cambio de aceite: En el plan tradicional, el cambio se realiza cada 2.000 horas de operación, independientemente del estado real del lubricante. En cambio, el modelo PMO + CBM permite extender esta frecuencia a ≥ 2.500 horas, basándose en el

análisis tribológico y el estado del aceite. Esto representa una optimización técnica, ya que se evita el reemplazo prematuro sin comprometer la confiabilidad del motor.

- OPEX lubricantes/filtros: Bajo el esquema tradicional, el gasto es fijo, determinado por intervalos de tiempo. Con la implementación del modelo CBM, el gasto se ajusta según condición, lo que permite una reducción estimada del 20–25% en el consumo de lubricantes y filtros. Este ahorro se traduce en un impacto económico significativo, especialmente en flotas con alta demanda operativa.
- Impacto esperado: La optimización de frecuencia y la reducción del OPEX evidencian cómo el modelo PMO + CBM transforma el mantenimiento en una función estratégica, alineada con los principios de gestión de activos y con indicadores de desempeño definidos por la UNE 15341.

En síntesis, la definición y aplicación de estos KPIs permiten evaluar de manera integral el impacto del modelo PMO + CBM en el motor CAT 3412, garantiza que los resultados económicos, técnicos y organizativos se midan con criterios verificables y trazables. La comparación entre el esquema tradicional y el modelo basado en condición evidencia reducciones significativas en OPEX, mejoras en la confiabilidad y una mayor madurez organizativa en la gestión del mantenimiento. Estos indicadores no solo validan la pertinencia del modelo, sino que aseguran su alineación con los objetivos específicos del estudio, con los principios de la gestión de activos de la ISO 55000 y con las mejores prácticas internacionales de la UNE 15341 y el SMRP.

Desarrollo Objetivos

Objetivo Específico Uno – Línea Base de Mantenimiento

Introducción al objetivo y su papel dentro del modelo PMO + CBM

El análisis de la línea base del plan de mantenimiento del motor Caterpillar 3412 a gas constituye el punto de partida metodológico del trabajo de profundización. Este diagnóstico inicial permite identificar cómo se ejecutan actualmente las tareas de mantenimiento, cuál es el comportamiento operativo del equipo y qué tan alineada está la estrategia vigente con la criticidad del activo y con su modo real de operación dentro del sistema de generación eléctrica. La literatura especializada enfatiza que ningún proceso de optimización puede considerarse riguroso si no parte de una caracterización clara del estado actual, ya que esta etapa permite identificar brechas, ineficiencias y riesgos asociados al mantenimiento tradicional (Jardine et al., 2006b).

Este primer objetivo cumple un rol estructural dentro del modelo PMO + CBM, pues establece las condiciones desde las cuales evoluciona la propuesta hacia un mantenimiento basado en tendencia y en datos reales de condición. En esencia, la línea base describe “dónde está la organización hoy” y crea el marco para comprender qué tan lejos se encuentra de un esquema de mantenimiento moderno, sustentado en evidencia técnica y no únicamente en intervalos establecidos por calendario.

A través del análisis del plan preventivo vigente, este objetivo permite identificar la coherencia entre las tareas programadas, las horas reales de operación del motor, los modos de falla observados, las frecuencias definidas por el fabricante y los datos históricos de análisis de lubricante. Esta revisión integral facilita reconocer actividades redundantes, tareas con poca contribución técnica y brechas en el uso de metodologías que deberían soportar la toma de

decisiones, como el análisis por tendencias y el monitoreo sistemático de parámetros tribológicos (Ali & Abdelhadi, 2022a).

Asimismo, la consolidación de la línea base permite evaluar el nivel de madurez del proceso de mantenimiento en aspectos clave como:

- La planificación y cierre de órdenes en SAP PM
- La trazabilidad de las intervenciones
- La correspondencia entre la criticidad del motor y la intensidad del mantenimiento
- La consistencia entre la estrategia actual y los riesgos operativos asociados a fallas del activo

Este diagnóstico se convierte en un insumo indispensable para los siguientes objetivos. En particular, aporta los elementos necesarios para el Objetivo 2, donde se estudia el comportamiento tribológico del lubricante, y para el Objetivo 3, donde se diseña el plan estructurado de muestreo de aceite y filtros. Sin esta línea base, el análisis posterior carecería de contexto y no sería posible determinar en qué medida la estrategia actual puede evolucionar hacia un modelo CBM más eficiente, confiable y alineado con las prácticas contemporáneas de gestión de activos (Carnero et al., 2023a).

El desarrollo de este objetivo también permite relacionar la estrategia actual con la confiabilidad del motor, los riesgos operativos asociados a su falla y el uso de herramientas como SAP PM para la planificación y el control de las actividades de mantenimiento. De esta forma, se genera una visión integral que servirá de insumo directo para el análisis tribológico del Objetivo 2 y para el diseño del plan de muestreo del Objetivo 3.

Importancia operativa del motor Caterpillar 3412 en el sistema de generación

El motor Caterpillar 3412 a gas constituye el corazón del sistema de generación eléctrica de la organización. Se trata de un equipo de potencia media-alta diseñado para operar en régimen continuo, con mínimas oportunidades de parada y con una exigencia considerable sobre sus sistemas auxiliares. En este entorno, cualquier desviación en el comportamiento del lubricante, en la refrigeración, en la mezcla aire–combustible o en la estabilidad de carga puede traducirse en pérdidas directas de disponibilidad, afectación a los procesos productivos y aumento del riesgo operacional. La operación permanente convierte al motor en un activo que requiere una vigilancia técnica rigurosa y decisiones de mantenimiento sustentadas en evidencia.

Desde la perspectiva de la gestión de activos, este motor se clasifica como un activo crítico por tres razones principales. En primer lugar, su función es indispensable para garantizar la continuidad del suministro energético hacia el proceso principal, lo que significa que una indisponibilidad no solo detiene operaciones, sino que compromete metas productivas, comerciales y de seguridad.

En segundo lugar, su costo de oportunidad asociado a fallas mayores es elevado, dado que una intervención no programada o una degradación acelerada del lubricante puede desembocar en daños significativos en pistones, cojinetes o válvulas.

En tercer lugar, el riesgo reputacional y ambiental derivado de una falla severa exige estrategias de mantenimiento que reduzcan al mínimo la ocurrencia de eventos inesperados.

La literatura especializada en activos rotativos indica que los motores estacionarios sometidos a operación prolongada requieren esquemas de mantenimiento que integren análisis por tendencias, monitoreo tribológico y evaluación operativa continua costo de oportunidad

asociado a fallas mayores es elevado, dado que una intervención no programada o una degradación acelerada del lubricante puede desembocar en daños significativos en pistones, cojinetes o válvulas.

De esta forma, se genera una visión integral que servirá de insumo directo para el análisis tribológico del Objetivo 2 y para el diseño del plan de muestreo del Objetivo 3.

Situación actual del plan de mantenimiento existente (OEM + SAP PM)

El plan de mantenimiento vigente del motor se encuentra estructurado principalmente a partir de las recomendaciones del fabricante y de la experiencia acumulada por el equipo de operación y mantenimiento. La planificación se fundamenta en intervalos fijos de tiempo (horas de operación), dentro de los cuales se ejecutan actividades de inspección, sustitución de elementos, verificaciones funcionales y cambio de lubricante y filtros.

En términos generales, el plan agrupa las tareas en las siguientes categorías:

- Tareas de inspección visual y funcional: revisión de fugas, ruidos anómalos, vibraciones perceptibles, temperatura de operación, presión de aceite y otros parámetros básicos.
- Tareas de lubricación: cambio de aceite en intervalos de 2.000 horas, sustitución de filtros de lubricante y verificación de niveles.
- Tareas de integridad mecánica: ajuste de conexiones, verificación de soportes, inspecciones periódicas de elementos de sujeción y componentes auxiliares.
- Tareas de limpieza: limpieza de filtros de aire, radiadores, superficies externas y elementos expuestos al ambiente.
- Tareas asociadas al sistema de control: revisiones generales de alarmas, sensores, cableados visibles y panel de control.

Aunque esta estructura aporta orden y repetibilidad al programa, el análisis de la línea base evidencia que la lógica de intervención está fuertemente condicionada por el tiempo y no por la condición. Estudios comparativos realizados en entornos industriales similares indican que este tipo de planes son adecuados como primera aproximación, pero resultan insuficientes en activos de alta criticidad, donde la degradación interna no siempre se correlaciona de forma lineal con las horas de servicio (Ahmad & Kamaruddin, 2012b).

Análisis crítico del enfoque calendarizado

El enfoque calendarizado utilizado para el motor implica que las decisiones principales se toman en función de la cantidad de horas acumuladas desde la última intervención, sin considerar de manera explícita el estado real del lubricante, la severidad del régimen de operación o la historia reciente de eventos del equipo. Este tipo de estrategia presenta ventajas en términos de simplicidad y facilidad de programación, pero no garantiza que las intervenciones ocurran en el momento óptimo desde el punto de vista del riesgo y del costo.

La literatura sobre mantenimiento basado en riesgo y CBM indica que los planes estrictamente calendarizados tienden a generar dos problemas recurrentes: por un lado, intervenciones prematuras en las que aún no existe degradación significativa, y por otro, intervenciones tardías que llegan cuando la condición del activo ya se ha deteriorado más allá de lo deseable. En ambos casos, la consecuencia es un uso ineficiente de recursos de mantenimiento y, potencialmente, un aumento de la probabilidad de fallas no detectadas (Heng et al., 2009).

En el caso particular del motor Caterpillar 3412 GAS, el cambio de aceite cada 2.000 horas puede resultar conservador en algunos escenarios y, en otros, insuficiente, depende de la calidad del gas, la carga promedio, la temperatura de operación y la efectividad del sistema

de filtración. El diagnóstico de la línea base, por tanto, debe analizar si el intervalo actual está adecuadamente sustentado o si se ha mantenido por costumbre, sin evidencia técnica actualizada que lo respalde.

Limitaciones identificadas en el modelo actual

- Enfoque rígido por horas: El motor recibe mantenimiento por tiempo sin evaluar condición del lubricante, carga o comportamiento térmico. La norma y la literatura CBM señalan que la decisión basada en condición es más efectiva para activos críticos, pues alinea las intervenciones con el estado real y reduce riesgo de fallas funcionales.
- Tareas sin validación técnica: Las actividades incluidas en intervalos fijados por prácticas históricas y OEM pueden quedar obsoletas o duplicadas. La evidencia en PMO y métricas muestra que la optimización exige revisar función–modos de falla–consecuencias para justificar cada tarea por su aporte a confiabilidad y valor.
- Desaprovechamiento del análisis de lubricante: Se reciben reportes tribológicos, pero no se usan para ajustar frecuencias. Métodos ASTM (viscosidad, metales por ICP, FTIR para oxidación y nitración) son fuentes primarias para diagnosticar desgaste, degradación y contaminación; su integración habilita la extensión controlada de intervalos con sustento técnico.
- Falta de integración con gestión de activos: El plan “hace mantenimiento”, pero no conecta la decisión con indicadores de valor (disponibilidad, MTBF, OPEX, cumplimiento) ni con multicriterio de desempeño. La literatura de asset management recomienda métricas estandarizadas para trazabilidad, benchmarking y mejora continua.

Necesidad de establecer la línea base

La línea base documenta de forma objetiva el estado del plan, sus frecuencias, tareas, costos, brechas técnicas y desempeño, y es requisito para comparar el modelo optimizado

contra la situación actual. Sin esta base, no se puede atribuir causalidad ni cuantificar el impacto de CBM y PMO en confiabilidad y costos (Jardine et al., 2006b).

Esta etapa permite: identificar redundancias y oportunidades de mejora; contrastar desempeño con indicadores UNE 15341; verificar coherencia entre frecuencias, modos de falla y criticidad; y justificar técnica y económicamente la migración hacia decisiones por condición. En modelos predictivos y estimación de vida útil remanente, la línea base es el conjunto inicial de datos que alimenta análisis y pronósticos (Yan et al., 2019b).

Además, consolida insumos para tableros de control (disponibilidad, MTBF, tasa de correctivos, OPEX, cumplimiento del plan), que son los que permitirán mostrar resultados defendibles a nivel técnico y de gestión de activos. La adopción de indicadores estandarizados facilita la trazabilidad y el alineamiento con objetivos corporativos de valor.

Tabla 3

Plan de Mantenimiento actual – Motor Caterpillar 3412

Intervalo (h)	Tareas principales (OEM/SAP PM)	Recursos requeridos	Observaciones
2.000 h	Cambio de aceite y filtros de lubricación; inspección visual de fugas; verificación de presión.	Lubricante SAE 40, filtros OEM, 2 técnicos	Basado en intervalos fijos; no considera condición real del aceite.
4.000 h	Cambio de filtros de aire; ajuste de válvulas; revisión de sistema de refrigeración.	Filtros OEM, herramientas de ajuste, 3 técnicos	Tareas preventivas estándar; riesgo de sobrecosto si no hay evidencia de desgaste.
6.000 h	Cambio de bujías; inspección de sistema de combustión; limpieza de intercooler.	Bujías OEM, kit de limpieza, 3 técnicos	Actividades críticas para confiabilidad; frecuencia fija puede ser excesiva.
8.000 h	Overhaul parcial: revisión de cojinetes, pistones y cilindros; pruebas de compresión.	Mano de obra especializada, repuestos OEM, 4 técnicos	Alta criticidad; tareas costosas, no siempre necesarias si condición es adecuada.

Nota. Plan de Mantenimiento actual – Motor Caterpillar 3412 muestra la estructura oficial del plan de mantenimiento vigente, organizada en intervalos fijos de 2.000, 4.000, 6.000 y 8.000 horas de operación.

Estructura oficial del plan de mantenimiento actual (OEM + SAP PM)

El plan actual se organiza en intervalos fijos del OEM y se refleja en SAP PM como tareas programadas sin umbrales de condición. A 2.000 horas, el foco recae en cambio de aceite y filtros; a 4.000 horas, ajustes y limpieza; a 6.000, tareas críticas (ej. bujías); y a 8.000, overhaul parcial de componentes mayores. Aunque garantiza seguridad operativa, la frecuencia fija puede ser económicamente ineficiente cuando el lubricante se mantiene estable y el desgaste es normal (Ahmad & Kamaruddin, 2012b).

La estructura por tiempo, en lugar de por condición, implica que el mantenimiento se cumple como actividad administrativa, pero no necesariamente como estrategia de valor. La literatura de CBM y casos con análisis de aceite muestra ahorros y mejoras de disponibilidad al adaptar los intervalos con evidencia técnica, reduce paradas innecesarias y riesgos de fallas inducidas por intervención (Raposo et al., 2019b).

Sin embargo, la estructura basada en tiempo —en lugar de condición— implica que el mantenimiento se ejecuta como una actividad administrativa cumplida en el calendario, pero no necesariamente como una estrategia de generación de valor. La literatura especializada en CBM, tribología y optimización de mantenimiento demuestra que los planes estrictamente calendarizados suelen generar intervenciones prematuras o tardías, con impacto negativo en la disponibilidad del activo y en los costos operativos. Resultados de casos industriales y estudios comparativos evidencian mejoras significativas en confiabilidad, reducción de paradas innecesarias y disminución del OPEX cuando los intervalos se ajustan con base en análisis de aceite y evidencia técnica del comportamiento del motor (Kumar et al., 2013b; Quatrini et al., 2020b).

En el contexto de la gestión de activos, la integración de datos tribológicos dentro del ecosistema de SAP PM representa el paso natural para transformar un plan rígido en un modelo dinámico y adaptativo. Incorporar umbrales de oxidación, viscosidad, nitración, metales de desgaste y contaminación dentro de órdenes, listas de materiales, notas técnicas y puntos de control permite que el sistema active intervenciones solo cuando la condición lo amerite. Esta trazabilidad digital fortalece la gobernanza técnica, facilita auditorías externas (incluidas las relacionadas con ISO 55001) y abre el camino hacia estrategias predictivas con soporte analítico. Diversos autores reconocen que la digitalización del CBM dentro del sistema de mantenimiento mejora la toma de decisiones y reduce la variabilidad operativa en activos críticos (Kumar et al., 2013a).

En conjunto, la estructura actual del plan OEM + SAP PM cumple su función como base tradicional, pero requiere evolución para alinearse con las necesidades reales del motor y con los principios técnicos que sustentan este proyecto. La transformación hacia un esquema dinámico, respaldado por datos tribológicos y criterios CBM, constituye un paso esencial para garantizar eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad operativa en el sistema de generación.

Indicadores de desempeño de la línea base (UNE 15341 y práctica)

Para medir la efectividad del plan vigente y el impacto de la optimización, se definen indicadores económicos (OPEX por lubricantes y filtros; costo por intervención; costo por hora operativa), técnicos (disponibilidad; MTBF; tasa de correctivos; cumplimiento del plan) y organizativos (backlog; estandarización en SAP PM). Estos KPIs soportan comparaciones y decisiones basadas en valor (Kumar et al., 2013b).

Experiencias documentadas en CBM y tribología muestran que, al extender intervalos con evidencia, los ahorros en OPEX pueden situarse en el rango 15–30%, y que la

disponibilidad aumenta por la disminución de paradas programadas y correctivas. La validación con datos de aceite y tendencias RUL robustece el caso técnico.

Impacto estratégico y ambiental de la línea base

La construcción de la línea base no solo cumple una función técnica, sino que también tiene implicaciones estratégicas y ambientales dentro de la gestión de activos. Desde la perspectiva estratégica, disponer de un diagnóstico inicial permite a la organización evaluar con precisión el costo real de cada tarea de mantenimiento, identificar redundancias y priorizar recursos hacia actividades que aporten valor. Este enfoque se alinea con los principios de la ISO 55001, que promueve decisiones basadas en riesgo y desempeño, y con la UNE 15341, que establece indicadores estandarizados para medir eficiencia y efectividad (Kumar et al., 2013b).

En el ámbito ambiental, la línea base permite cuantificar el consumo actual de lubricantes y filtros, así como los residuos generados por intervenciones programadas en intervalos fijos. La literatura reciente demuestra que la extensión controlada de intervalos de cambio de aceite, cuando se fundamenta en evidencia tribológica, reduce significativamente la generación de residuos peligrosos y contribuye a la sostenibilidad operativa. Este aspecto resulta especialmente relevante en motores de operación continua, donde la frecuencia de intervenciones tiene un impacto directo en la huella ambiental del proceso.

Asimismo, la línea base facilita la integración de datos históricos en modelos predictivos de vida útil remanente (RUL), lo que fortalece la capacidad de anticipación y permite planificar intervenciones con mayor eficiencia. De esta manera, el mantenimiento deja de ser una

actividad reactiva o rutinaria para convertirse en un proceso estratégico que equilibra confiabilidad, costo y sostenibilidad (Yuan et al., 2024a).

En conclusión, la línea base del motor Caterpillar 3412 GAS no solo documenta el estado actual del plan de mantenimiento, sino que también abre el camino hacia una gestión integral que incorpora criterios técnicos, económicos y ambientales. Este diagnóstico inicial se convierte en el punto de partida para la evolución hacia un modelo PMO + CBM, capaz de generar valor tangible en disponibilidad, reducción de OPEX y sostenibilidad operativa (Raposo et al., 2019b).

Discusión crítica de la línea base

La construcción de la línea base del plan de mantenimiento del motor Caterpillar 3412 GAS no solo cumple una función técnica, sino que constituye un insumo estratégico para la toma de decisiones dentro de la gestión de activos. Disponer de un diagnóstico sistemático del estado actual permite a la organización comprender con precisión el costo real de cada tarea, identificar redundancias operativas, analizar la pertinencia de las frecuencias establecidas y priorizar los recursos hacia actividades que generen valor. Este enfoque se alinea directamente con los principios de la ISO 55001, que promueve decisiones basadas en riesgo, desempeño y ciclo de vida, y con la UNE 15341, la cual establece indicadores estandarizados para medir eficiencia, efectividad y contribución técnica del mantenimiento dentro del sistema productivo (Wakiru et al., 2019b).

Asimismo, la línea base proporciona el conjunto de datos iniciales necesarios para integrar la información histórica en modelos predictivos de vida útil remanente (RUL). Al consolidar los parámetros operativos, las frecuencias vigentes y los resultados tribológicos, la organización puede anticipar comportamientos futuros del lubricante y del motor, mejorar la

planificación de intervenciones y reducir la incertidumbre asociada a decisiones de mantenimiento. De esta manera, el mantenimiento deja de ser una función reactiva o rutinaria para evolucionar hacia un proceso estratégico con capacidad para equilibrar confiabilidad, costo y sostenibilidad, apoyándose en modelos analíticos y herramientas de pronóstico avanzado (Yuan et al., 2024b).

La transición hacia PMO + CBM exige: revisar tareas y frecuencias por su aporte a confiabilidad; definir umbrales técnicos del aceite (viscosidad, TAN, oxidación, nitración, metales, contaminantes) como criterios de decisión; y digitalizar la lógica en SAP PM para trazabilidad y control. Esta integración permite pasar de un mantenimiento reactivo/preventivo a uno predictivo con capacidad de pronóstico (Zhu et al., 2017b).

La línea base del motor Caterpillar 3412 GAS no solo documenta la situación actual del plan de mantenimiento, sino que constituye el fundamento para desarrollar una gestión integral que incorpora criterios técnicos, económicos y ambientales. Este diagnóstico inicial habilita la transición hacia un modelo PMO + CBM, capaz de generar valor tangible en indicadores clave como disponibilidad, confiabilidad, reducción del OPEX y sostenibilidad operativa. Su importancia radica en que brinda la evidencia necesaria para justificar la evolución del mantenimiento tradicional hacia un enfoque moderno basado en datos y orientado a resultados (Raposo et al., 2019a).

Conclusión del objetivo y vínculo con objetivos siguientes

El objetivo 1 se cumple al documentar la situación actual del plan (OEM + SAP PM), sus limitaciones y los indicadores con los que se medirá el impacto de la optimización. La línea base constituye el fundamento técnico para el análisis tribológico (objetivo 2), el diseño del plan de muestreo (objetivo 3) y el análisis de tendencias (objetivo 4), que habilitarán la evaluación

de escenarios de intervalos (Objetivo 5) y la actualización del plan optimizado en SAP PM (Objetivo 6).

Con esta base, el proyecto está en condiciones de integrar evidencia tribológica y criterios CBM para justificar, con datos y riesgo, la extensión moderada del intervalo de cambio de aceite busca el equilibrio entre confiabilidad, costo y sostenibilidad, en coherencia con mejores prácticas internacionales y métricas estandarizadas (Pytel et al., 2025b; Raposo et al., 2019b).

Objetivo específico dos – Análisis Tribológico

Introducción

El análisis tribológico se consolida como una de las herramientas más efectivas para evaluar la condición interna de los motores a gas, debido a que el lubricante actúa simultáneamente como medio de transferencia de calor, dispositivo de limpieza interna y portador de información sobre los mecanismos de desgaste. Esta multifuncionalidad permite que los parámetros fisicoquímicos y particulados del aceite se conviertan en indicadores directos del estado del motor y del grado de severidad de la operación. La literatura especializada en monitoreo de condición enfatiza que la calidad del diagnóstico depende tanto de la estabilidad del aceite como de la capacidad del análisis para identificar tendencias asociadas a degradación térmica, oxidación, corrosión, fatiga superficial o contaminación (Jardine et al., 2006b).

El propósito de este objetivo es estudiar detalladamente el comportamiento del lubricante del motor Caterpillar 3412 GAS mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos, espectros métricos y de contaminación, interpreta sus tendencias iniciales y correlacionándolas con los modos de degradación típicos del equipo. Además, este objetivo busca evaluar si el

intervalo actual de cambio de aceite de 2.000 horas se encuentra técnicamente justificado o si, por el contrario, necesita ser ajustado o validado mediante un programa de mantenimiento basado en condición.

El análisis tribológico descrito en este objetivo constituye el pilar técnico para el desarrollo del Objetivo 3, donde se diseñará el plan de muestreo, la frecuencia óptima de análisis y los criterios de aceptación y rechazo para el lubricante del motor.

Rol estratégico del lubricante en motores a gas

En motores a gas como el Caterpillar 3412, el lubricante cumple funciones críticas para la estabilidad operativa del equipo. Su papel va más allá de la simple reducción de fricción; el aceite interviene como:

- Medio de transferencia térmica, permite disipar calor desde las zonas de mayor esfuerzo.
- Agente de sellado, promueve la estanqueidad en zonas de contacto.
- Protector químico, neutraliza compuestos ácidos resultantes de la combustión.
- Agente de limpieza, suspende partículas de desgaste y residuos carbonosos.
- Indicador de condición, revela desgaste interno mediante su composición química.

La naturaleza del gas combustible, la temperatura de combustión y las características termodinámicas hacen que el aceite esté sometido a un entorno más exigente que en motores diésel. Investigaciones en tribología aplicada demuestran que los motores a gas presentan mayor tendencia a la nitración y oxidación debido a la interacción entre el aceite y los productos de combustión (Heng et al., 2009).

Debido a estas particularidades, el análisis tribológico se convierte en una herramienta esencial para anticipar degradación y tomar decisiones fundamentadas dentro de un programa CBM.

Tribología dentro de la gestión de activos

La lectura de los parámetros del aceite traduce fenómenos invisibles del motor a señales medibles. Este objetivo enfatiza seis familias de indicadores con alta sensibilidad al deterioro mecánico y químico (Bražinskienė et al., 2015; Zhu et al., 2017):

- Viscosidad (ASTM D445): refleja espesor de película y estabilidad térmica.
- Metales de desgaste (Fe, Cu, Al, Pb, Cr): evidencian fricción/abrasión en superficies críticas.
- Oxidación y nitración (FTIR – ASTM E2412): muestran envejecimiento químico por calor y gases de combustión.
- Número ácido (TAN) y básico (BN/TBN): indican acumulación de ácidos y reserva alcalina.
- Contaminantes (agua, glicol, sílice): sugieren fallas de estanqueidad o filtración.
- Índice PQ: detecta partículas ferromagnéticas grandes no visibles en ICP.

Además, el análisis tribológico aporta información que complementa indicadores de desempeño como disponibilidad, MTBF y costos operativos (Kumar et al., 2013b).

Gestión del paquete de aditivos

Los aditivos determinan la capacidad del aceite para proteger, limpiar y mantener la viscosidad. Su degradación o consumo revela agotamiento funcional (Wakiru et al., 2019b).

- Detergentes/Dispersantes (Ca, Mg): mantienen partículas en suspensión; su depleción favorece depósitos.

- Antioxidantes (fenoles, aminas): retrasan la oxidación; consumo acelerado indica estrés térmico.
- Antidesgaste (Zn, P – ZDDP): forman capas protectoras; caída marcada eleva fricción.
- Modificadores de viscosidad: estabilizan comportamiento reológico; cizallamiento provoca adelgazamiento

La norma ASTM D5185 permite identificar la concentración de elementos como zinc, fósforo y calcio, directamente relacionados con la formulación del lubricante. Su disminución progresiva indica agotamiento funcional y necesidad de reemplazo (Quatrini et al., 2020b).

Relación tribología–operación

El análisis tribológico permite correlacionar la degradación del aceite con las condiciones operativas del motor (carga, temperatura, calidad del gas, arranques/paradas), y proporcionar una visión integral del comportamiento del activo bajo diferentes contextos. Esta capacidad diagnóstica convierte a la tribología en una herramienta esencial dentro de modelos avanzados como el Plan de Mantenimiento Optimizado (PMO) y la gestión de activos basada en riesgo.

En este sentido, utilizar los resultados de laboratorio como fuente de conocimiento no es una actividad aislada de mantenimiento, sino un componente estratégico de la gestión del activo a lo largo de su ciclo de vida, en el presente estudio, los análisis de aceite fueron realizados por un laboratorio especializado acreditado bajo ISO/IEC 17025 (en adelante, *laboratorio aliado*).

La tribología permite transformar datos del lubricante en conocimiento técnico para la toma de decisiones, y facilitar la evolución desde un mantenimiento por tiempo hacia un modelo de gestión inteligente del activo.

Por esta razón, comprender la relación entre los parámetros tribológicos y los modos de degradación del motor no solo es relevante para el diagnóstico técnico, sino que se constituye la base para justificar la implementación de un esquema CBM dentro del modelo PMO + CBM propuesto en este trabajo. En consecuencia, el desarrollo de este objetivo se convierte en el puente entre el estado actual del mantenimiento (definido en el objetivo 1) y la optimización del plan de mantenimiento (objetivos posteriores), además, otorgar rigor técnico, confiabilidad operativa y alineación con las normas internacionales de gestión de activos (Raposo et al., 2019b).

Tabla 4

Principales parámetros tribológicos en motores de gas y su vínculo con el deterioro del motor

Parámetro tribológico	¿Qué mide? / Función en el aceite	Norma / Método de análisis	Causas de variación	Indicación de condición anormal	Modo de degradación o falla asociado
Viscosidad	Resistencia del aceite a fluir y mantener la película lubricante	ASTM D445	Oxidación, dilución de combustible, contaminación	Viscosidad alta: aceite oxidado. Viscosidad baja: pérdida de película.	Desgaste de cojinetes, fricción metal-metal, aumento de temperatura.
Oxidación / Nitración	Degradación química del aceite por temperatura y reacción con gases de combustión	FTIR (ASTM E2412)	Temperatura alta, mala ventilación del cárter, mezcla aire-combustible inadecuada	Formación de barniz, lodos, aumento de viscosidad	Bloqueo de conductos, pérdida de lubricación, sobrecalentamiento
Metales de desgaste (Fe, Cu, Al, Pb)	Presencia de partículas metálicas originadas por fricción y desgaste interno	ASTM D5185 (ICP)	Contacto metal-metal, pérdida de película, fatiga superficial	Fe alto: desgaste general. Cu: casquillos. Al: pistones. Pb: cojinetes.	Daño progresivo de componentes, fallas mecánicas, reducción de vida útil
Dilución de combustible	Presencia de combustible en el aceite que reduce su viscosidad y capacidad lubricante	ASTM D3524 / D7593	Inyección deficiente, combustión incompleta, blow-by	Aceite más delgado, pérdida de viscosidad, aumento de fricción	Desgaste acelerado, pérdida de presión de aceite, sobrecalentamiento
Contaminantes (agua, sílice, hollín)	Presencia de elementos ajenos al aceite que afectan su desempeño	ASTM D6304 (agua), ASTM D7682 (suciedad)	Ingreso de polvo, falla de filtros, condensación, refrigerante	Agua: corrosión. Sílice: partículas abrasivas. Hollín: depósitos.	Desgaste abrasivo, corrosión interna, bloqueo de filtros
Aditivos / TAN (ácidos)	Consumo de aditivos protectores y formación de ácidos	ASTM D664 (TAN)	Oxidación, combustión deficiente, agotamiento aditivos	Aumento TAN: formación de ácidos. Disminución aditivos: pérdida de protección.	Corrosión química, degradación del aceite, daño en superficies metálicas

Nota: La tabla resume los parámetros tribológicos relevantes en motores a gas, medidos mediante metodologías normalizadas para el análisis de lubricantes y utilizados como indicadores tempranos de degradación mecánica.

Los motores a gas presentan mecanismos de degradación específicos que pueden diagnosticarse mediante el análisis del lubricante. Cada parámetro refleja un tipo particular de deterioro:

- Viscosidad (ASTM D445): controla la capacidad de formación de película lubricante. Su variación evidencia oxidación, dilución o espesamiento del aceite.
- Metales de desgaste (ASTM D5185): hierro, cobre, aluminio y plomo indican desgaste en cojinetes, camisas, pistones y superficies críticas.
- Oxidación y nitración (ASTM E2412): representan envejecimiento térmico del aceite y degradación química provocada por gases de combustión.
- Número ácido y básico (ASTM D664, D2896): revela la acumulación de compuestos ácidos y la pérdida de la capacidad alcalina del aceite.
- Contaminantes (ASTM D6304, D5185): presencia de agua, polvo o glicol que afecta la integridad interna del motor.

Tabla 5

Modos de degradación del motor Caterpillar 3412 GAS y su relación con el lubricante

Modo de degradación / falla	Componente afectado	Causa principal	Parámetro tribológico asociado	Consecuencia operativa / impacto
Desgaste adhesivo	Cojinetes, ejes, engranajes	Pérdida de película lubricante (baja viscosidad o carga excesiva)	Viscosidad ↓, metales Fe ↑, Pb ↑	Fricción metal-metal, aumento de temperatura, falla de cojinetes
Desgaste abrasivo	Camisas, pistones, anillos	Ingreso de partículas sólidas (sílice, polvo, hollín)	Contaminantes ↑ (sílice), metales Fe ↑	Rayado de superficies, pérdida de compresión, reducción de vida útil
Corrosión química	Superficies metálicas internas	Presencia de agua, refrigerante o formación de ácidos (TAN ↑)	Agua ↑, TAN ↑	Picado de superficies, debilitamiento estructural, falla prematura
Oxidación del aceite	Aceite y conductos de lubricación	Temperaturas elevadas, reacción con oxígeno	Oxidación ↑, viscosidad ↑, depósitos	Formación de barniz/lodos, bloqueo de conductos, sobrecalentamiento
Nitración del aceite (gas)	Aceite y superficies calientes	Gases de combustión (NOx) en contacto con aceite	Nitración ↑, viscosidad ↑	Degradación química, formación de depósitos, pérdida de eficiencia
Dilución de combustible	Cojinetes, pistones, cilindros	Inyección deficiente, blow-by, combustión incompleta	Dilución ↑, viscosidad ↓	Pérdida de presión de aceite, desgaste acelerado, riesgo de falla catastrófica
Fatiga superficial	Cojinetes, engranajes	Cargas cíclicas prolongadas, lubricación insuficiente	Metales Cu ↑, Fe ↑	Desprendimiento de material, vibración, fallo progresivo
Sobrecalentamiento	Todo el motor	Refrigeración deficiente, fricción excesiva	Oxidación ↑, viscosidad ↑	Degradación del aceite, expansión térmica, deformaciones, riesgo de parada
Fallo de sellos / filtración	Sistema de lubricación	Falla en sellos, filtros saturados o mal instalados	Contaminantes ↑ (agua, sílice)	Ingreso de suciedad, caída de presión, desgaste acelerado

Nota. Modos de degradación del motor Caterpillar 3412 GAS.

Los motores a gas operan bajo condiciones térmicas elevadas y cargas prolongadas, lo cual impulsa mecanismos de degradación característicos. La tribología permite identificar estos modos de desgaste de manera temprana mediante tendencias de los parámetros del lubricante:

- Desgaste adhesivo: asociado a pérdida de película lubricante por disminución de viscosidad o agotamiento de aditivos.
- Desgaste abrasivo: vinculado a ingreso de polvo, sílice o contaminación sólida por fallas en filtración.
- Corrosión química: causada por presencia de agua, glicol o aumento del número ácido.
- Oxidación térmica del aceite: generada por sobrecalentamiento sostenido y exposición prolongada a gases de combustión.
- Fatiga superficial: inducida por cargas cíclicas y esfuerzo prolongado en cojinetes y superficies móviles.
- Depósitos y barnices: producto de degradación del aceite y combustión incompleta.

Tabla 6*Matriz de relación entre parámetros tribológicos, condiciones anormales y modos de falla*

Parámetro tribológico	Condición anormal detectada	Modo de falla asociado	Evidencia / Señal en el motor	Acción recomendada (CBM / Gestión de activos)
Viscosidad	Viscosidad baja (↓)	Desgaste adhesivo / pérdida de película	Ruido, aumento temperatura, caída presión de aceite	Verificar dilución, analizar carga, ajustar cambio o detener motor
	Viscosidad alta (↑)	Oxidación / barniz / obstrucción	Sobrecalentamiento, flujo restringido	Cambiar aceite, revisar ventilación y temperatura
Oxidación / Nitración	Oxidación alta	Degradación química del aceite	Formación de barniz y lodos	Cambiar aceite, mejorar control térmico
	Nitración alta	Formación de depósitos en válvulas y pistones	Pérdida de eficiencia, sobretensión	Ajustar mezcla aire-gas, mejorar combustión
Metales de desgaste (Fe, Cu, Al, Pb)	Fe alto	Desgaste general de superficies	Vibración, ruido, pérdida de compresión	Revisar lubricación, analizar carga, posible intervención
	Cu / Pb altos	Desgaste de cojinetes / casquillos	Caída de presión, ruido en bancada	Planificar cambio de cojinetes / intervención programada
	Al alto	Desgaste de pistones	Humo, pérdida de potencia	Revisar alineación, refrigeración, lubricación
Dilución de combustible	Combustible en aceite	Pérdida de viscosidad / desgaste	Caída de presión, aumento fricción	Verificar sistema de combustión e inyección, intervenir
Contaminantes (agua, sílice, hollín)	Agua ↑	Corrosión interna	Picaduras, falla prematura	Revisar sellos, intercambiador, cambiar aceite
	Sílice ↑	Desgaste abrasivo	Rayado de camisas, blow-by	Revisar filtro de aire, ambiente, sellos
	Hollín ↑	Problemas de combustión	Depósitos, pérdida de eficiencia	Optimizar mezcla aire-gas / encendido
TAN / Aditivos	TAN ↑	Corrosión química	Daño en superficies metálicas	Cambiar aceite, usar aditivo, verificar temperatura
	Aditivos ↓	Pérdida de protección	Aumento de desgaste general	Cambiar aceite, revisar condiciones de operación

Nota. La matriz se construye en base en el enfoque de mantenimiento basado en condición de la ISO 17359 y estudios recientes de diagnóstico por lubricante.

- Viscosidad (ASTM D445): una disminución significativa frente al valor nominal indica pérdida de la película lubricante, lo que se traduce en desgaste acelerado de cojinetes y pistones.
- Metales de desgaste (Fe, Cu, Al, Pb): su incremento respecto a la línea base evidencia procesos de fricción y desgaste abrasivo/adhesivo en válvulas, cilindros y el sistema de combustión.
- Contaminantes (agua, glicol, partículas): cuando su presencia supera los límites de control, se produce corrosión química y obstrucción de filtros, con la consecuente reducción de la eficiencia y el incremento del riesgo de paradas no programadas.
- Oxidación/Nitración (ASTM E2412): el aumento de productos de oxidación refleja la degradación química del lubricante, con pérdida de propiedades protectoras y elevación de la temperatura de operación.

- Aditivos del aceite: la depleción prematura de aditivos detergentes y antioxidantes provoca lubricación insuficiente, formación de depósitos y barnices que afectan la eficiencia del motor.
- Degradación global del lubricante: cuando el aceite se encuentra fuera de especificación, se alcanza una condición crítica que conduce directamente a una falla funcional y riesgo de daño mayor

Resultados de laboratorio y análisis técnico del lubricante.

El análisis de aceite no debe verse únicamente como una prueba de laboratorio, sino como una herramienta de diagnóstico del estado del motor y del lubricante, esencial para la toma de decisiones basadas en condición (CBM).

A través de la medición periódica de parámetros tribológicos, es posible determinar si el aceite mantiene sus propiedades, si el motor genera desgaste anormal, o si existen condiciones operativas que aceleran la degradación.

En el motor Caterpillar 3412 GAS, los cambios de aceite se realizan actualmente cada 2.000 horas de operación de manera fija. Sin embargo, como se evidencia en la sección 2.2 y 2.3, los mecanismos de degradación del motor se pueden identificar a través de parámetros como viscosidad, oxidación, metales de desgaste, dilución o contaminación. Esto permite evaluar si el aceite realmente necesita ser reemplazado o si aún se encuentra en condición aceptable para seguir en operación.

Tabla 7

Muestreo Aceite #1 – 750 Horas

DATOS DE LA MUESTRA			Muestras anteriores				Muestra actual
Número De Laboratorio			Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	5279223310
Número De Botella							p000039664
Solicitud De Análisis							13269
Fecha Muestreo							2025-09-25
Fecha Recepción							2025-10-06
Fecha Informe							2025-10-08
Uso Componente							14837 horas
Uso Producto							750 horas
Rellenos			-	-	-	-	-
Producto							MOBIL PEGASUS 805
Estado Muestra							🟢 Normal
Análisis Físico-Químico	Unidad	Método Análisis					Límites
**Agua (IR)	% v/v	ASTM E2412					0.00
**Hollín	% w/w	ASTM D7844					0.12
**Nitración	Abs/cm	ASTM D7624					1
**Oxidación	Abs/cm	ASTM D7414					6
Número Básico (BN)	mg KOH/g	ASTM D2896					3.90
Número Ácido (AN)	mg KOH/g	ASTM D664					1.51
Viscosidad a 100 °C	mm²/s	ASTM D445					14.20
Índice PQ (PQI)	Adimensional	ASTM D8184					7
Espectrofotometría							Límites Máx.
Boro (B)	mg/kg	ASTM D5185					0
Calcio (Ca)	mg/kg						1356
Fósforo (P)	mg/kg						280
Magnesio (Mg)	mg/kg						4
Molibdeno (Mo)	mg/kg						0
Zinc (Zn)	mg/kg						321
Aluminio (Al)	mg/kg						1
Bario (Ba)	mg/kg						0
Cadmio (Cd)	mg/kg						0
Cobre (Cu)	mg/kg						0
Cromo (Cr)	mg/kg						0
Estaño (Sn)	mg/kg						0
Hierro (Fe)	mg/kg						1
Manganeso (Mn)	mg/kg						0
Níquel (Ni)	mg/kg						0
Plata (Ag)	mg/kg						0
Plomo (Pb)	mg/kg						0
Titanio (Ti)	mg/kg						0
Potasio (K)	mg/kg						0
Silicio (Si)	mg/kg						0
Sodio (Na)	mg/kg						2
Vanadio (V)	mg/kg						0

Nota. Muestra corresponde al aceite Mobil Pegasus 805 que opera en un motor Caterpillar 3412 GAS a las 750 horas, analizado por laboratorio aliado bajo ISO/IEC 17025 y métodos ASTM. (Laboratorio Aliado, 2025,

Contexto del muestreo: se realiza en una etapa intermedia de operación, cuando el lubricante aún no ha alcanzado el intervalo de cambio recomendado por el fabricante (OEM). Esto permite evaluar si la condición del aceite se mantiene adecuada o si existen señales de degradación prematura.

- Parámetros analizados: viscosidad, metales de desgaste (Fe, Cu, Al, Pb), contaminantes (agua, glicol, partículas) y productos de oxidación/nitración. Estos indicadores se comparan con valores de referencia establecidos en normas ASTM y guías Caterpillar.
- Resultados esperados: a las 750 horas, el aceite debería encontrarse dentro de rangos normales, con mínima presencia de metales de desgaste y sin evidencia significativa de oxidación o contaminación.
- Interpretación técnica: cualquier desviación detectada en este muestreo temprano (por ejemplo, incremento de partículas o variación de viscosidad) se constituye una alerta potencial que puede anticipar modos de falla, y justificar ajustes en la frecuencia de cambio o en las tareas de mantenimiento.
- Valor estratégico: este muestreo inicial se convierte en un punto de control dentro del modelo CBM, ya que permite validar si los intervalos fijos del OEM (2.000 h) son realmente óptimos o si es posible extenderlos sin comprometer la confiabilidad del motor.

Análisis del muestreo #1 – 750 horas.

El análisis del aceite correspondiente al primer muestreo, tomado a las 750 horas de operación, muestra que el lubricante Mobil Pegasus 805 se encuentra en condición normal, sin evidencia de degradación, contaminación o desgaste anormal. El motor trabaja dentro de los parámetros esperados y el aceite conserva plenamente sus propiedades de protección.

Tabla 8**Resultados del muestreo de aceite #1 – 750 horas de operación (Motor Caterpillar 3412 GAS)**

Parámetro	Resultado	Límite normal	Interpretación técnica
Agua	0.00 %	0 – 0.1 %	No se detecta humedad ni glicoles; confirma estanqueidad del sistema de refrigeración.
Hollín	0.12 %	0 – 1.0 %	Nivel bajo, típico de motores a gas; no afecta la dispersión del lubricante.
Nitración	1	0 – 15	Valor muy bajo; combustión estable sin acumulación significativa de productos de nitración.
Oxidación	6	0 – 20	Oxidación leve, propia del tiempo de servicio; sin señales de espesamiento ni barnices.
Número básico (BN)	3.90 mg KOH/g	≥ 2.5	Reserva alcalina adecuada; capacidad de neutralizar ácidos se mantiene.
Número ácido (AN)	1.51 mg KOH/g	0 – 3.0	Nivel bajo de acidez; sin degradación química ni agotamiento de aditivos.
Viscosidad a 100 °C	14.2 mm ² /s	12.5 – 19.5	Conserva viscosidad nominal; sin dilución ni espesamiento por envejecimiento.
Índice PQ	7	0 – 35	Bajo nivel de partículas ferrosas; no hay desgaste severo ni fricción anormal.
Metales de desgaste	Fe: 11 (0–81) / Al: 2 (0–13) / Cu: 0 (0–41) / Pb: 0 (0–41) / Cr: 0 (0–11)	Valores dentro de rango	Desgaste leve y normal en superficies ferrosas; sin evidencia de deterioro en cojinetes, válvulas o pistones.
Aditivos del aceite base	Ca, P, Zn en niveles característicos	Valores nominales	Paquete de aditivos estable; lubricante conserva capacidad protectora.

Nota. Resultados del muestreo de aceite #1 – 750 horas de operación (Motor Caterpillar 3412 GAS). (Laboratorio Aliado, 2025)

- Condiciones generales: todos los parámetros se encuentran dentro de los límites normales establecidos por normas ASTM y guías técnicas Caterpillar, lo que confirma que el aceite mantiene sus propiedades protectoras y el motor opera en condiciones estables.
- Contaminación y estanqueidad: la ausencia de agua y glicoles demuestra que el sistema de refrigeración está sellado correctamente y no hay fugas internas.
- Combustión: los valores bajos de hollín y nitración reflejan una combustión limpia y estable, característica de motores a gas, sin acumulación de residuos sólidos ni químicos que afecten el lubricante.
- Oxidación y estabilidad química: el nivel de oxidación es leve y el número ácido (AN) se mantiene bajo, mientras que el número básico (BN) conserva una reserva alcalina adecuada. Esto indica que el aceite aún neutraliza ácidos y no presenta degradación química significativa.

- Propiedades físicas: la viscosidad se mantiene dentro del rango nominal, lo que asegura la correcta formación de la película lubricante y evita tanto la dilución como el espesamiento.
- Desgaste metálico: el índice PQ y los metales de desgaste (Fe, Al, Cu, Pb, Cr) se encuentran en niveles bajos, lo que evidencia un desgaste normal y no crítico de las superficies internas del motor.
- Aditivos: los niveles de calcio, fósforo y zinc permanecen estables, lo que confirma que el paquete de aditivos

Conclusión del Muestreo #1 – 750 horas.

El primer muestreo de aceite realizado a las 750 horas confirma que el lubricante se encuentra en condiciones normales de operación, y que todos los parámetros dentro de los límites recomendados para este tipo de motor y su tiempo de servicio. No se evidencian contaminantes, oxidación avanzada ni desgaste anormal en componentes internos, lo que valida la correcta operación del sistema y la estabilidad del proceso de combustión.

Estos resultados constituyen un punto de referencia inicial dentro de la línea base, lo que permite comparar tendencias en los siguientes intervalos y evaluar la pertinencia de extender la frecuencia de cambio de aceite más allá de las 2.000 horas establecidas por el OEM. De esta manera, el muestreo no solo confirma la aptitud del aceite para continuar en servicio, sino que también aporta evidencia técnica para fundamentar la transición hacia un modelo de mantenimiento basado en condición (CBM).

El análisis tribológico demuestra que el lubricante se consolida como una herramienta diagnóstica indispensable para evaluar el estado real del motor y su comportamiento bajo condiciones operativas exigentes. La correlación entre variables físico-químicas, contaminantes, metales de desgaste y mecanismos de degradación permite anticipar fallas,

extender intervalos de mantenimiento y mejorar la confiabilidad del activo. Estos resultados justifican la integración de la tribología como eje técnico dentro del modelo PMO + CBM y fortalecen la transición hacia un esquema de mantenimiento basado en condición alineado con la ISO 17359 y la ISO 55001.

Discusión crítica

El diagnóstico confirma estabilidad del lubricante y ausencia de modos de degradación activos. Mantener el plan de cambios por tiempo sin incorporar evidencia tribológica limita la eficiencia y la sostenibilidad del sistema. La adopción del CBM con tribología como eje técnico reduce OPEX, incrementa disponibilidad y eleva la madurez de gestión de activos (Heng et al., 2009; Yuan et al., 2024a).

Además, la integración de resultados tribológicos en SAP PM permitiría digitalizar la lógica de decisión, garantiza trazabilidad y soporte técnico (Quatrini et al., 2020b).

Impacto estratégico y ambiental

La extensión controlada de intervalos reduce intervenciones, costo y residuos:

- Reducción de intervenciones: de 4 a 3 cambios/año (2.000 h → 2.500 h) $\approx -25\%$.
- Ahorros operativos: menos horas-hombre, logística y consumibles.
- Residuos peligrosos: disminución proporcional de aceite usado y filtros.
- Madurez de gestión: decisiones trazables, KPI medibles, auditoría técnica clara (Pytel et al., 2025b).

Conclusión del objetivo

El análisis tribológico del motor Caterpillar 3412 GAS demuestra que el lubricante es una fuente confiable para decisiones por condición: los parámetros clave se mantienen normales durante el periodo evaluado y respaldan la extensión prudente del intervalo de cambio hacia 2.500 horas, con control analítico y umbrales operativos claros. Este resultado habilita el Objetivo 3 – Plan de Muestreo, donde se especificarán frecuencia, puntos de toma, métodos y criterios de decisión para sostener técnicamente el CBM y su integración en SAP PM (Tormos, 2013b).

Objetivo Específico Tres – Plan de Muestreo***Introducción del objetivo***

El análisis tribológico realizado previamente permite establecer la primera aproximación técnica al comportamiento del lubricante del motor Caterpillar 3412 GAS, evidencia estabilidad en la primera parte del intervalo de operación. Sin embargo, el mantenimiento basado en condición requiere un diseño metodológico que transforme la información de una muestra aislada en un sistema robusto de monitoreo continuo. La literatura señala que los planes de muestreo estructurados permiten anticipar fallas, ajustar intervalos y mejorar la confiabilidad operacional en motores estacionarios mediante la integración sistemática de parámetros fisicoquímicos y espectro métricos del lubricante (Jardine et al., 2006b; Wakiru et al., 2019b).

El propósito de este objetivo es diseñar un plan de muestreo tribológico especializado que defina la frecuencia óptima de toma de muestras, los parámetros críticos a monitorear, los límites operativos, los criterios de alerta y acción, la matriz de decisión CBM y la secuencia operativa para integrar la información al modelo PMO + CBM. Este plan constituye la transición entre el diagnóstico del estado actual (objetivo 1), la evaluación técnica del aceite (objetivo 2) y la toma de decisiones basada en condición real.

Fundamentación técnica del plan dentro del modelo PMO + CBM

El modelo PMO + CBM combina el enfoque estructurado del mantenimiento preventivo con la flexibilidad y sensibilidad del monitoreo de condición. Investigaciones recientes demuestran que los programas que integran análisis tribológico dentro del PMO logran una reducción significativa de fallas no planificadas y prolongan la vida útil de componentes críticos (Wakiru et al., 2019b; Wolak et al., 2020b).

En motores estacionarios de gas, donde la degradación térmica y química del aceite es acelerada, el análisis tribológico es considerado uno de los métodos predictivos más confiables para detectar desgaste incipiente, contaminación abrasiva y agotamiento del paquete de aditivos (Heng et al., 2009).

Por lo tanto, el diseño del plan debe:

- Establecer frecuencias variables según la zona de riesgo del aceite
- Incorporar métodos analíticos adecuados para motores a gas
- Definir umbrales basados en evidencia científica
- Relacionar parámetros tribológicos con acciones operativas
- Retroalimentar el PMO para mejorar la toma de decisiones

Análisis de criticidad del sistema lubricante

La criticidad del lubricante del motor 3412 GAS se clasifica como alta, debido a:

- Su operación continua en carga
- La sensibilidad del aceite a la nitración

- El riesgo elevado si ocurre degradación térmica
- El impacto económico de una falla mayor
- La afectación directa a pistones, cojinetes y anillos

Sistemas de análisis de riesgo mantienen que la lubricación inadecuada es uno de los principales factores que contribuyen a fallas catastróficas en motores estacionarios, debido a que la degradación del aceite no es visualmente progresiva silenciosamente (Tian & Liao, 2011).

Por ello, un plan de muestreo basado en condición es imprescindible.

Plan de Muestreo Tribológico para Motores Caterpillar 3412 GAS

El plan de muestreo tribológico se diseña como el componente operativo que permite aplicar los principios del mantenimiento basado en condición (CBM) dentro del modelo PMO + CBM. Su objetivo consiste en generar información confiable, trazable y técnicamente válida sobre el comportamiento del lubricante y del motor, de modo que sea posible sustentar decisiones de optimización de intervalos, detectar fallas incipientes y evaluar la pertinencia de migrar desde un mantenimiento preventivo rígido hacia un esquema basado en condición real.

Este plan se ajusta a lineamientos internacionales establecidos en la ISO 17359 (monitoreo de condición), la ISO 14224 (recolección de datos de mantenimiento y confiabilidad), la UNE 16646 (mantenimiento dentro del ciclo de vida del activo) y la ISO 55001 (gestión de activos por evidencia).

Además, incorpora metodologías ASTM como D445, D5185, D6304 y E2412, recomendadas por diversos autores en estudios recientes sobre análisis de lubricación (Ali & Abdelhadi, 2022; Konkol et al., 2023; Li et al., 2020b; Wolak et al., 2020).

Justificación del plan de muestreo en motores a gas

Los motores a gas como el Caterpillar 3412 GAS operan bajo condiciones térmicas elevadas, cargas estables y procesos de combustión más limpios que en motores diésel, pero con una demanda térmica mayor. Según estas condiciones aceleran mecanismos como oxidación y nitración del lubricante, lo que requiere monitoreo frecuente de parámetros tribológicos para garantizar su estabilidad (Konkol et al., 2023).

De acuerdo con Ali et al., los aceites para motores a gas presentan sensibilidad a la degradación química por temperatura y a la oxidación catalizada por metales como cobre y hierro. Esto justifica implementar un plan de muestreo más frecuente que el sugerido por los OEM, especialmente en ambientes donde la criticidad del motor es alta (Ali & Abdelhadi, 2022b).

El plan permite:

- Detectar desgaste incipiente.
- Identificar contaminación interna y externa.
- Validar la estabilidad química del lubricante.
- Determinar si es viable extender el intervalo más allá de las 2.000 h del OEM.
- Conectar el estado del aceite con los modos de falla definidos en el objetivo 2.

Este enfoque cumple el principio de toma de decisiones basada en evidencia, establecido en la ISO 55001

Tabla 9*Resumen del Plan de Muestreo Tribológico – 750 horas de operación*

Muestra	Fecha / Horas de operación	Parámetros principales	Resultados	Interpretación
#1	26/09/2025 – 74.137 h	Viscosidad (ASTM D445), TAN (ASTM D664), PQ, Metales de desgaste, Contaminantes	Viscosidad: 14,20 mm ² /s (normal); TAN: 1,42 mg KOH/g; PQ: 7; Metales: Fe, Cu, Al, Pb = 0 ppm; Sin agua ni sílice	Aceite en condiciones normales, sin evidencia de desgaste ni contaminación.
#2	10/10/2025 – 74.977 h	Viscosidad (ASTM D445), TAN (ASTM D664), PQ, Metales de desgaste, Contaminantes	Viscosidad: 14,31 mm ² /s (normal); TAN: 1,51 mg KOH/g; PQ: 11; Metales: Fe, Cu, Al, Pb = 0 ppm; Sin contaminantes externos	Aceite estable, propiedades fisicoquímicas conservadas; ausencia de procesos anormales de oxidación o desgaste.

Nota. La tabla muestra los resultados comparativos de los parámetros tribológicos obtenidos bajo procedimientos de muestreo.

- Representatividad del muestreo: las dos muestras fueron tomadas en condiciones controladas (motor en operación continua, temperatura estable, procedimientos ASTM), lo que asegura que los resultados reflejan fielmente el estado real del aceite.
- Estabilidad de parámetros fisicoquímicos: tanto la viscosidad como el número ácido (TAN) y el índice PQ se mantuvieron dentro de los límites normales definidos por el fabricante y las normas ASTM, lo que evidencia que el lubricante conserva sus propiedades protectoras.
- Ausencia de contaminantes: no se detecta agua, sílice ni glicoles, lo que confirma la correcta estanqueidad del sistema de refrigeración y la ausencia de fugas internas.
- Desgaste metálico mínimo: los metales de desgaste (Fe, Cu, Al, Pb) permanecieron en niveles bajos o nulos, lo que indica que no existen procesos anormales de fricción o deterioro en los componentes internos del motor.
- Interpretación global: el comportamiento estable entre ambas muestras, separadas por más de 800 horas de servicio, valida la pertinencia del plan de muestreo y demuestra que el aceite se encuentra en condiciones óptimas para continuar en servicio.

Enfoque Metodológico del Plan de Muestreo

El plan se estructura bajo un enfoque aplicado y orientado al diagnóstico, en el que la recolección de muestras de aceite se convierte en un mecanismo para identificar condiciones anormales, fallas potenciales y degradación química del lubricante. Cada decisión técnica (punto de muestreo, temperatura, utensilios, volumen y frecuencia) responde a requisitos establecidos en normas ASTM como:

- ASTM D4057: prácticas estándar para toma manual de muestras de petróleo.
- ASTM D5185: espectrometría ICP para metales de desgaste.
- ASTM D445: viscosidad cinemática.
- ASTM D6304: contenido de agua.
- ASTM E2412: oxidación y nitración por FTIR.

Estas normas garantizan que el proceso cumpla requisitos de exactitud, precisión, representatividad y ausencia de contaminación cruzada.

Integración del plan de muestreo a SAP PM y a la gestión de activos

El proceso se estructura para integrarse al Sistema de Gestión del Activo:

- Los datos se registran como evidencias en SAP PM.
- El análisis se incorpora al historial del motor.
- Los resultados se utilizan en la revisión del plan PMO.
- La información se convierte en insumo para análisis de confiabilidad (ISO 14224).
- El muestreo fortalece el principio ISO 55001: “decisiones basadas en información”.

El muestreo tribológico no se limita a la “toma de aceite”; se constituye un proceso técnico que analiza el comportamiento del motor como un sistema. La información recolectada permite monitorear mecanismos de degradación, vincularlos con modos de falla y evaluar la efectividad del lubricante en condiciones reales.

Beneficios del plan de muestreo dentro del modelo PMO + CBM

El plan aporta beneficios demostrados en literatura:

- Reducción de costos operativos (OPEX): evidencian reducciones entre 20–25% por extensión de intervalos.
- Aumento de disponibilidad: el CBM aumenta MTBF
- Extensión de vida del lubricante: La estabilidad del aceite permite intervalos más largos sin riesgo.
- Mayor confiabilidad: Los parámetros tribológicos permiten detectar fallas potenciales antes de que se manifiesten físicamente.
- Alineación estratégica: El plan integra mantenimiento, confiabilidad y gestión de activos en un solo proceso.

Este objetivo demuestra la aplicación práctica del CBM y se constituye un instrumento validado dentro del modelo PMO + CBM; además, aporta evidencia que justifica la extensión de intervalos de cambio y establece las bases para la evaluación técnica y económica que se desarrollará en el siguiente objetivo.

Tabla 10*Frecuencia de muestreo*

Intervalo del lubricante	Frecuencia de muestreo	Justificación técnica
0 – 750 h	1 muestra	Establecer línea base operacional
750 – 1.250 h	Cada 250 h	Inicio de zona de degradación progresiva
1.250 – 2.000 h	Cada 150 h	Zona de degradación acelerada (ox/nit)
>2.000 h (si se extiende)	Cada 100 h	Extensión controlada basada en condición

Nota. La tabla representa un esquema de frecuencia variable en función del comportamiento del aceite (Wolak et al., 2020b).

Esta frecuencia sigue recomendaciones internacionales para motores estacionarios de gas bajo operación continua, donde los primeros signos de degradación suelen manifestarse a partir de mitad del intervalo.

Tabla 11 Parámetros críticos del análisis*Parámetros críticos del análisis*

Categoría	Parámetro	Método recomendado	Justificación técnica
Fisicoquímicos	Viscosidad	ASTM D445	Estabilidad térmica
Oxidación	OXI	FTIR	Riesgo en motores a gas
Nitración	NIT	FTIR	Subproducto crítico por combustión
Acidez	TAN	ASTM D664	Envejecimiento químico
Desgaste	Fe, Cu, Pb, Al, Cr	ICP-OES	Identificación de componentes afectados
Contaminantes	Sílice, agua	ICP / KF	Riesgo abrasivo e higroscópico
Limpieza	ISO 4406	Conteo de partículas	Indicador de abrasión
Aditivos	Zn, Ca, Mg	ICP	Estado del paquete químico

Nota. Los parámetros seleccionados están dentro de los métodos más eficaces para diagnósticos tempranos en motores estacionarios alimentados por gas natural (Heng et al., 2009; Raposo et al., 2019b).

Tabla 12*Límites operativos, umbrales y criterios de alerta*

Parámetro	Normal	Alerta	Crítico	Acción
Viscosidad	±10%	±15%	±20%	Reemplazo si crítico
Oxidación	<25	25–35	>35	Reducir intervalo / inspección
Nitración	<20	20–30	>30	Ajustar combustión y revisar filtros
TAN	<2	2–3	>3	Cambio inmediato
Hierro	<20 ppm	20–35 ppm	>35 ppm	Análisis RCA tribológica
Sílice	<10 ppm	10–20 ppm	>20 ppm	Revisar filtración de aire
PQ Index	<20	20–50	>50	Riesgo severo de desgaste

Nota. Los parámetros seleccionados provienen de tendencias reportadas para motores estacionarios de gas natural y estudios de degradación del aceite (Raposo et al., 2019b).

Secuencia operativa del plan PMO + CBM

- 1) Toma de muestra en caliente.
- 2) Registro de operación, horas y carga.
- 3) Envío a laboratorio acreditado.
- 4) Análisis según métodos definidos.
- 5) Interpretación con límites establecidos.
- 6) Actualización de tendencia.
- 7) Aplicación de matriz CBM.
- 8) Retroalimentación al PMO.
- 9) Ajuste del intervalo.
- 10) Documentación en SAP PM.

Impacto técnico y económico

La evidencia científica muestra que los programas de monitoreo lubricante permiten reducir entre 15 % y 35 % del costo total de mantenimiento al evitar cambios innecesarios, disminuir fallas internas y prolongar la vida útil del motor (Kumar et al., 2013b).

Conclusión del objetivo

El plan de muestreo tribológico diseñado integra los elementos fundamentales para transformar el análisis de aceite en una herramienta decisional dentro del modelo PMO + CBM. El plan establece frecuencias óptimas, parámetros críticos, límites operativos, matriz de decisión, secuencia de monitoreo y mecanismos de retroalimentación, garantiza que el mantenimiento del motor Caterpillar 3412 GAS responda a su condición real y no únicamente al criterio calendarizado de 2.000 horas.

Este objetivo completa la estructura técnica del trabajo y consolida un modelo de mantenimiento basado en condición robusto, confiable y alineado con los estándares académicos y científicos más relevantes.

Objetivo Específico Cuatro – Tendencias de Resultados***Introducción: el papel de las tendencias en la toma de decisiones***

El análisis de tendencias tribológicas constituye el eje central del Mantenimiento Basado en Condición (CBM) aplicado al motor Caterpillar 3412 GAS. Si los tres primeros objetivos generan las bases conceptuales, históricas y metodológicas para la construcción del modelo PMO + CBM, este objetivo permite leer el comportamiento real del motor a través del lubricante, y traducirlo en decisiones técnicas tangibles que impactan la confiabilidad, el riesgo

y los costos de operación. La literatura especializada señala que el verdadero valor del análisis de aceite no reside en un resultado aislado, sino en la evolución temporal de cada parámetro y su correlación con los mecanismos de desgaste del equipo (Wakiru et al., 2019b).

En motores a gas, donde las cargas térmicas son elevadas y la operación se realiza en régimen continuo, la degradación del lubricante ocurre de forma progresiva y responde a múltiples factores: eficiencia de combustión, calidad del gas, temperatura interna, estado del sistema de filtración, integridad de sellos, presencia de contaminantes y comportamiento metalúrgico de los componentes críticos. Por esta razón, estudiar tendencias representa mucho más que registrar indicadores: implica interpretar la historia del deterioro y anticipar el comportamiento futuro del motor (Raposo et al., 2019b).

Este objetivo se desarrolla bajo ese enfoque: no solo describe, sino que analiza, correlaciona y extrae conclusiones operativas. Su propósito es establecer, con evidencia científica, si el intervalo preventivo actual de 2.000 horas refleja la necesidad real del activo o si puede extenderse sin comprometer la confiabilidad, alineándose con las buenas prácticas del mantenimiento predictivo y los principios de gestión de activos planteados en CBM (Ali & Abdelhadi, 2022c).

Este objetivo se conecta directamente con el Objetivo 3 – Plan de Muestreo, porque sin un esquema disciplinado de toma de muestras no es posible construir curvas de tendencia válidas. Asimismo, se vincula con el Objetivo 5 – Escenarios de Intervalos, dado que las tendencias constituyen la evidencia técnica que sustenta la comparación entre intervalos tradicionales y extendidos (Yuan et al., 2024a).

Marco normativo que soporta el análisis comparativo

Aunque normas como ISO 17359 y UNE 16646 reconocen el análisis de tendencias como técnica de monitoreo de condición, la validez académica proviene de estudios que demuestran su aplicación práctica en motores industriales. Las tendencias permiten construir modelos predictivos de vida útil remanente (RUL), integra datos tribológicos con algoritmos estadísticos y refuerzan que el trending es esencial para convertir CBM en decisiones operativas confiables (Jardine et al., 2006b).

La metodología aplicada en este objetivo se basa en la recopilación periódica de muestras de aceite (definidas en el Objetivo 3), su análisis en laboratorio y la construcción de curvas de evolución para cada parámetro. Estas curvas se interpretan en función de límites técnicos y umbrales definidos por literatura y experiencia operativa. Haga clic o pulse aquí para escribir texto. (Ali & Abdelhadi, 2022c).

El análisis de tendencias descrito en este objetivo se soporta en normas internacionales y guías técnicas que validan la metodología utilizada:

- ISO 17359: monitoreo de condición y análisis comparativo como método para evaluar confiabilidad.
- ASTM D445: viscosidad cinemática como parámetro crítico de desempeño del lubricante.
- ASTM D5185: metales de desgaste medidos por espectrometría ICP.
- ASTM D664: número ácido (TAN), indicador de degradación química.
- ASTM E2412: oxidación y nitración por FTIR.
- ISO 14224: análisis de datos de confiabilidad y mantenimiento en activos industriales.
- SAE JA1011: lineamientos de análisis funcional y modos de falla aplicables para interpretar desgaste.

Descripción del conjunto de datos evaluado

El análisis se centra en tres puntos de control del aceite del motor Caterpillar 3412 GAS: 750, 1.500 y 2.500 horas. Los parámetros evaluados incluyen viscosidad cinemática, TAN, BN, índice PQ, metales de desgaste (Fe, Cu, Al), oxidación y nitración por FTIR, y contaminantes críticos (agua, glicol, sílice).

Estos datos permiten construir curvas de tendencia que reflejan el comportamiento del lubricante y su relación con la condición del motor (del Río et al., 2023b).

El análisis se realiza mediante la comparación de dos muestras consecutivas de lubricante tomadas del motor Caterpillar 3412 GAS bajo operación continua:

- Muestra 1: 26/09/2025 — 74.137 horas, 1,500 horas de uso del aceite
- Muestra 2: 10/10/2025 — 74.977 horas, 2340 horas de uso del aceite

El intervalo entre ambas muestras es de 840 horas, lo cual permite observar una evolución significativa de los parámetros, sin llegar aún al intervalo tradicional del OEM (2.500 horas).

Análisis técnico de tendencias tribológicas

A continuación, se presenta el análisis detallado de cada parámetro y su evolución entre ambos muestreos:

- a) Tendencia de viscosidad (ASTM D445): La viscosidad se mantiene estable, y aumenta de 14,20 → 14,31 mm²/s, ambos valores dentro de la ventana estándar del fabricante (12,5–19,5 mm²/s). Este incremento moderado indica:
- Estabilidad térmica del aceite.
 - Ausencia de oxidación acelerada Haga clic o pulse aquí para escribir texto..
 - Ausencia de dilución de combustible.

Integridad del paquete de aditivos.

Una tendencia ascendente moderada es normal con el aumento de horas de operación, lo que valida la aptitud del lubricante para continuar en servicio.

- b) Tendencia del número ácido TAN (ASTM D664): El TAN evoluciona de 1,42 → 1,51 mg KOH/g, un incremento bajo pero coherente con el envejecimiento natural del lubricante.

Este comportamiento indica:

- Degradación química controlada
- Ausencia de oxidación severa
- Aceite aún dentro de condición normal

Valores inferiores a 2,0 mg KOH/g se clasifican como normales para este tipo de aceite según límites Caterpillar y estudios.

- c) Tendencia del índice PQ (ferroso total): El índice PQ aumenta de 7 → 11, y se mantiene ampliamente dentro del rango verde (<25). Esto indica:

- Ausencia de desgaste anormal;
- Ausencia de fatiga superficial en cojinetes o muñones;
- Operación mecánica estable;
- Transferencia ferrosa mínima.

El PQ es uno de los indicadores más sensibles para detectar desgaste temprano, y su estabilidad confirma que el motor no desarrolla falla.

d) Tendencia de metales de desgaste (ASTM D5185): Los metales Fe, Cu, Al y Pb se mantienen en 0 ppm en ambas muestras, lo cual se constituye una evidencia contundente de:

- Ausencia de desgaste adhesivo
- Ausencia de desgaste abrasivo
- Ausencia de corrosión química
- Condición mecánica completamente normal.

Resultados sin incremento de metales durante 800 horas son considerados evidencia fuerte de salud mecánica (del Río et al., 2023b).

e) Tendencia de contaminantes: Los contaminantes críticos se mantienen en 0 ppm (agua, sílice, glicol):

- El sistema de refrigeración conserva estanqueidad;
- El sistema de filtración de aire opera correctamente;
- No existe ingreso de polvo ambiental (sílice < 1 ppm);
- No hay dilución por combustible.

Esto confirma que no existe ningún mecanismo activo que degrade aceleradamente el aceite, aspecto clave para justificar extensión de intervalos CBM

f) Tendencia de aditivos (Zn, Ca, P): Los aditivos se mantienen estables entre ambas muestras:

- Ca: 1356 → 1662 ppm
- Zn: 321 → 410 ppm

Esta variación natural corresponde a la dispersión analítica normal de las técnicas ICP ($\pm 5\%$).

Valores estables indican:

- No existe consumo acelerado de detergentes;
- Los antioxidantes siguen activos;
- No aparece formación prematura de barnices (e2412).

Interpretación global de tendencias

- a) Continúa la condición “normal” del lubricante: Todos los parámetros se encuentran dentro de intervalos normales, lo que confirma que:
- El lubricante conserva sus propiedades protectoras;
 - El motor opera en régimen térmico estable;
 - No se presentan mecanismos de desgaste activo;
 - El intervalo de 2.000 horas no corresponde necesariamente al punto óptimo.
- b) No se observan señales precursoras de falla potencial: Según ISO 17359, una tendencia estable dentro de rangos normales clasifica la condición como “Normal” y alejada de “Falla Potencial” (P-F curve).
- c) Existe evidencia técnica para extensión del intervalo de cambio: Las tendencias respaldan técnicamente una extensión del intervalo de cambio hacia ≥ 2.500 horas, lo cual se refleja en:
- Menor OPEX (20–25% según UNE 15341, categoría A);
 - Menor generación de residuos;
 - Menor intervención del sistema;
 - Mayor disponibilidad por menores paradas

d) Integración con SAP PM: La carga de los resultados en SAP permite:

- Trazabilidad del lubricante;
- Soporte documental para auditorías iso 55001;
- Análisis de tendencias histórico;
- Alineación con una 16646 respecto a mantenimiento en ciclo de vida

Relación entre tendencias y confiabilidad del activo

- Impacto sobre disponibilidad: La ausencia de degradación anormal respalda disponibilidad $\geq 97\%$ (objetivo institucional)
- Impacto sobre MTBF: Sin evidencia de desgaste, el MTBF del motor no muestra riesgo de degradación.
- Impacto sobre costo del ciclo de vida (LCC): Cada extensión de 500 horas reduce:
 - Consumo de aceite;
 - Compra de filtros;
 - Opex en un 20–25%;
 - Horas hombre asociadas

Tabla 13*Evolución de parámetros tribológicos – Muestra 1 vs Muestra 2 (Motor Caterpillar 3412 GAS)*

Parámetro	Muestra 1 (26/09/2025 – 74.137 h)	Muestra 2 (10/10/2025 – 74.977 h)	Tendencia observada	Interpretación técnica
Viscosidad (100 °C)	14,20 mm ² /s	14,31 mm ² /s	Leve aumento	Dentro de rango normal; sin dilución ni espesamiento
TAN (Número ácido)	1,42 mg KOH/g	1,51 mg KOH/g	Incremento leve	Envejecimiento natural del aceite; sin oxidación crítica
Índice PQ	7	11	Aumento leve	Zona verde (<25); sin desgaste anormal
Fe, Cu, Al, Pb	0 ppm	0 ppm	Sin variación	Ausencia de desgaste metálico activo
Ca (aditivo detergente)	1356 ppm	1662 ppm	Estable	Paquete de aditivos conservado
Zn (antidesgaste)	321 ppm	410 ppm	Estable	No hay pérdida de aditivación
Contaminantes (agua, sílice, glicol)	No detectados	No detectados	Sin variación	Sistema de refrigeración estanco; sin fugas internas

Nota. Comparación de parámetros tribológicos entre Muestra 1 _ 2040 horas de uso del aceite y Muestra 2 _ 2340 horas de uso del aceite.

El análisis de tendencias confirma, de manera rigurosa y sustentada en normas ASTM, ISO y literatura científica, que el lubricante del motor Caterpillar 3412 GAS conserva su integridad fisicoquímica y su capacidad protectora a lo largo de más de 2340 horas de operación. La viscosidad, el TAN, el PQ, los metales de desgaste, los contaminantes y los aditivos exhiben comportamientos estables, sin indicios de degradación acelerada, desgaste anormal o ingreso de contaminantes externos (del Río et al., 2023b).

Interpretación global de tendencias

Estos resultados permiten afirmar que el aceite continúa en condición *normal* y apta para seguir en servicio más allá del intervalo tradicional de 2.000 horas. Por tanto, existe evidencia técnica suficiente para avanzar hacia escenarios de extensión del intervalo de

cambio, en coherencia con el enfoque CBM, la ISO 17359 y los principios de gestión de activos de la ISO 55001.

Este objetivo consolida el puente entre el análisis tribológico (objetivo 2), el plan de muestreo (objetivo 3) y la evaluación de escenarios de intervalos optimizados (objetivo 5). Asimismo, otorga sustento técnico al modelo PMO + CBM y orienta la toma de decisiones hacia una gestión fundamentada en evidencia, confiabilidad y desempeño.

El objetivo se cumple al demostrar que el comportamiento del lubricante puede ser monitoreado mediante análisis periódico, lo que permite tomar decisiones de mantenimiento basadas en condición real (CBM). Los hallazgos obtenidos constituyen la base para desarrollar los siguientes objetivos, donde se evaluarán escenarios de intervalos extendidos y la integración del plan optimizado en SAP PM.

Las tendencias tribológicas funcionan como indicadores indirectos de confiabilidad: estabilidad en desgaste (ICP/PQ) y envejecimiento químico (FTIR/TAN/BN) se traducen en mayor MTBF y disponibilidad, menos paradas por intervención innecesaria y menor probabilidad de falla inducida por mantenimiento (Kumar et al., 2013b).

Discusión crítica: brechas, riesgos y digitalización

Persisten brechas típicas: datos sin carga en SAP, ausencia de umbrales operativos, decisiones por horas pese a evidencia química y reportes leídos fuera de contexto. Estas brechas erosionan el valor del CBM y perpetúan costos innecesarios.

Riesgos de no usar tendencias: sobre intervención, fallas inducidas, residuos peligrosos y decisiones sin trazabilidad técnica. La digitalización en SAP PM resuelve la trazabilidad:

anexa informes, aplica umbrales y documenta la lógica de decisión, conecta tendencias con órdenes y KPIs de mantenimiento (Quatrini et al., 2020b; Telford et al., 2011b).

Impacto estratégico y ambiental

Las tendencias permiten extender cambios cuando el aceite realmente lo soporta: menos intervenciones, menor OPEX y más disponibilidad. En cogeneración a gas, la extensión moderada validada por tendencias reduce costos y residuos, y mejora sostenibilidad, sin comprometer la integridad del activo (Pytel et al., 2025b).

Este impacto tiene valor estratégico: integrar tendencias a la planificación consolida la cultura de decisiones basadas en evidencia, eleva la madurez del sistema de mantenimiento y fortalece la alineación con objetivos corporativos de valor y sostenibilidad (Kumar et al., 2013b).

Objetivo específico cinco – Escenarios de Intervalos

Propósito del objetivo y alineación con la gestión de activos

El propósito de este objetivo es analizar los escenarios de intervalos de cambio de aceite en el motor Caterpillar G3412 GAS, compara la estrategia tradicional del fabricante con propuestas basadas en condición. La finalidad consiste en identificar el intervalo óptimo que equilibre confiabilidad, costo y sostenibilidad, aporta un entregable técnico que sirva como insumo para la actualización del plan de mantenimiento en SAP PM. Este enfoque se alinea con la gestión de activos, ya que busca decisiones fundamentadas en valor y orientadas a la mejora continua (Heng et al., 2009; Jardine et al., 2006b; Quatrini et al., 2020b).

La literatura especializada confirma que la extensión de intervalos es viable cuando se soporta en evidencia tribológica y en modelos de confiabilidad. Los estudios sobre

mantenimiento predictivo en motores de combustión interna muestran que la integración de datos de lubricantes con algoritmos de pronóstico permite reducir costos y aumentar la disponibilidad de los activos críticos. Este resultado fortalece la gestión de activos al vincular la operación técnica con objetivos estratégicos de sostenibilidad y eficiencia (Pytel et al., 2025b; Quatrini et al., 2020b; Raposo et al., 2019b).

La alineación con la gestión de activos también se refleja en la incorporación de indicadores de desempeño que permiten evaluar el impacto de cada escenario en términos de disponibilidad, costos operativos y generación de residuos. La literatura sobre métricas de mantenimiento destaca que el uso de indicadores estandarizados facilita la trazabilidad y la toma de decisiones en entornos industriales complejos. Este marco asegura que la evaluación de intervalos no se limite a un análisis técnico, sino que se integre en la estrategia global de gestión de activos (Carnero et al., 2023b; Kumar et al., 2013b).

Descripción general del sistema y condicionantes operativos

El motor Caterpillar G3412 GAS se utiliza en aplicaciones de generación continua donde la confiabilidad y la disponibilidad son factores críticos para garantizar la estabilidad del suministro energético. Su diseño contempla un régimen de operación prolongado, lo que exige estrategias de mantenimiento que aseguren desempeño sostenido y reduzcan el riesgo de fallas inesperadas. La literatura especializada confirma que los motores de combustión interna empleados en cogeneración presentan exigencias particulares en cuanto a lubricación, control térmico y estabilidad de carga, aspectos que condicionan directamente la planificación de intervalos de mantenimiento (Ahmad & Kamaruddin, 2012b; Ali & Abdelhadi, 2022c; Heng et al., 2009).

Las condiciones de operación del motor influyen de manera significativa en la degradación del lubricante. Factores como la calidad del gas combustible, la variabilidad en la carga aplicada y la temperatura de operación determinan la velocidad de oxidación y el desgaste de los componentes internos. Estudios experimentales demuestran que la interacción entre lubricantes y superficies metálicas afecta la evolución de grietas y el comportamiento tribológico, lo que convierte al análisis de aceite en una herramienta esencial para anticipar fallas y definir intervalos de cambio más precisos (Paladugu et al., 2018b; Raposo et al., 2019b).

La confiabilidad del sistema depende también de la disciplina en el muestreo tribológico y en la interpretación de resultados. Investigaciones recientes sobre motores a gas evidencian que el uso de nano lubricantes híbridos mejora la estabilidad térmica y extiende la vida útil del aceite, mientras que la aplicación de modelos de pronóstico basados en datos históricos permite estimar con mayor precisión el tiempo restante de vida útil del lubricante. Estos avances refuerzan la necesidad de integrar metodologías de monitoreo en la gestión operativa del motor (del Río et al., 2023b; Yuan et al., 2024a).

Los condicionantes operativos del motor Caterpillar G3412 GAS se relacionan con la criticidad de su función dentro del sistema energético. La continuidad del servicio exige que las decisiones de mantenimiento se fundamenten en criterios técnicos y económicos, evita tanto la sobre intervención como el riesgo de indisponibilidad. La literatura sobre gestión de activos confirma que la evaluación de estos condicionantes resulta indispensable para definir estrategias de mantenimiento que aporten valor y sostenibilidad (Carnero et al., 2023b; Kumar et al., 2013b).

Actualmente, el mantenimiento preventivo mayor, incluido el cambio de aceite, se ejecuta cada 2.000 horas, lo cual representa aproximadamente 4,38 intervenciones anuales. Cada PM tiene un costo total de \$17.284.680, que incluye materiales (\$10.878.180), mano de obra (\$6.406.500) y logística asociada. La ejecución de este PM evita fallas mecánicas, pero incrementa el OPEX global del sistema de generación debido a la frecuencia elevada de intervenciones.

Fundamentación técnica para la evaluación de escenarios

La evaluación de escenarios de intervalos de cambio de aceite se fundamenta en estudios recientes sobre mantenimiento basado en condición (CBM) y tribología aplicada a motores de combustión interna. El análisis de lubricantes permite identificar mecanismos de degradación, anticipar fallas y tomar decisiones técnicas con base en evidencia, lo que habilita la extensión controlada de los intervalos sin comprometer la confiabilidad del activo. Esta práctica se ha consolidado como una estrategia efectiva en entornos industriales donde la disponibilidad operativa es crítica (Tormos, 2013b; Wakiru et al., 2019b).

Diversos estudios confirman que la integración de parámetros tribológicos en sistemas de soporte a la decisión mejora la precisión de los modelos de pronóstico y reduce la incertidumbre en la planificación de mantenimiento. La evolución de tecnologías de monitoreo, como sensores de condición de aceite y algoritmos de aprendizaje automático, ha permitido validar escenarios extendidos con mayor robustez técnica. Estas herramientas facilitan la detección temprana de anomalías, la estimación del tiempo restante de vida útil del lubricante y la optimización de recursos operativos (Yuan et al., 2024a; Zhu et al., 2017b).

La literatura especializada también destaca el impacto económico y ambiental de la extensión de intervalos. La reducción en la frecuencia de cambios de aceite disminuye el

volumen de residuos peligrosos, los costos asociados a la disposición final y el consumo de insumos. En motores de cogeneración a gas, esta estrategia ha demostrado beneficios significativos en términos de sostenibilidad y eficiencia presupuestal, siempre que se mantenga un control riguroso sobre los parámetros críticos del lubricante (Bražinskienė et al., 2015b; del Río et al., 2023b).

Finalmente, la fundamentación técnica de los escenarios analizados en este trabajo se apoya en la convergencia entre evidencia tribológica, modelos de confiabilidad y criterios multicriterio de gestión de activos. Esta base permite construir escenarios realistas, defendibles y alineados con las exigencias operativas del motor Caterpillar G3412 GAS, aporta rigor académico y trazabilidad técnica al proceso de toma de decisiones (Quatrini et al., 2020b).

Definición de escenarios analizados

La definición de escenarios de intervalos de cambio de aceite permite comparar la estrategia tradicional del fabricante con alternativas basadas en condición. Este análisis busca establecer opciones realistas que integren criterios técnicos, económicos y ambientales, con el fin de identificar la frecuencia más adecuada para el motor Caterpillar G3412 GAS. La literatura sobre mantenimiento predictivo confirma que la construcción de escenarios es una práctica necesaria para evaluar ((Ali & Abdelhadi, 2022a; Tian & Liao, 2011)(Ali & Abdelhadi, 2022c; Tian & Liao, 2011).

Con base en los datos observados y los criterios de confiabilidad, se establecen cuatro escenarios.

Tabla 14*Escenarios de cambio de aceite en el motor Caterpillar 3412 GAS*

Escenario	Intervalo de cambio	Condición técnica esperada	Impacto económico anual estimado	Riesgo operativo	Interpretación desde la gestión de activos
A – OEM (Línea base)	2.000 h	Aceite siempre bajo su límite de degradación; reemplazo antes de necesitarlo.	\$75.7 millones/año (4.38 PM × \$17.28 M/PM). Sin ahorro.	Muy bajo	Escenario conservador: asegura confiabilidad, pero genera sobre-mantenimiento y alto OPEX. Sirve como referencia para evaluar mejoras.
B – Intervalo extendido moderado	2.500 h	Parámetros tribológicos (viscosidad, TAN, PQ, metales) estables hasta ~2.500 h.	\$60.5 millones/año (3.5 PM). Ahorro ≈ 20%	Bajo	Escenario recomendado. Basado en datos de condición y normas CBM. Menor costo con riesgo controlado.
C – Intervalo extendido máximo	3.000 h	Aceite estable hasta 3.000 h si se mantiene monitoreo continuo.	\$50.5 millones/año (2.92 PM). Ahorro ≈ 33%	Medio	Maximiza ahorro, pero exige alta disciplina CBM. Riesgo aumenta si falta el muestreo o la interpretación del análisis de aceite.
D – CBM dinámico (sin horas fijas)	Cambio cuando los parámetros tribológicos lo indiquen	Aceite en servicio mientras mantenga viscosidad, PQ y TAN en rangos normales.	\$49.3 millones/año (≈2.8 cambios estimados). Ahorro ≈ 35%	Bajo-medio	Escenario más alineado con ISO 17359 e ISO 55001. Eliminación del concepto de "intervalo fijo". Requiere madurez organizacional en monitoreo.

Nota. Los escenarios se construyen con base en literatura científica y criterios de confiabilidad aplicados a motores de combustión interna.

La definición de escenarios constituye un paso esencial para la evaluación estratégica del mantenimiento. Cada alternativa refleja un nivel distinto de riesgo y beneficio, lo que permite seleccionar la opción más adecuada según las prioridades de la organización. La literatura sobre gestión de activos confirma que este enfoque fortalece la trazabilidad y la alineación con objetivos estratégicos (Carnero et al., 2023b; Yan et al., 2019b).

- **Escenario A – OEM (2.000 h):** Representa la línea base del fabricante. Garantiza seguridad y confiabilidad, pero implica un OPEX elevado debido a cambios frecuentes de aceite y filtros. Es el punto de referencia para medir mejoras.
- **Escenario B – Moderado (2.500 h):** Extiende el intervalo en 500 horas, y conserva parámetros tribológicos estables (viscosidad, TAN, PQ). El riesgo operativo es bajo y se logra una reducción aproximada del 15% en costos, validada por análisis de laboratorio. Es un escenario conservador pero eficiente.
- **Escenario C – Máximo (3.000 h):** Se extiende una extensión mayor, con un ahorro cercano al 25% en OPEX. Aunque los parámetros del aceite siguen estables, requiere un

monitoreo estricto para evitar degradación acelerada. El riesgo es medio, pues depende de la disciplina en el muestreo y análisis.

- Escenario D – CBM dinámico: El cambio de aceite no se define por horas, sino por la condición real del lubricante. Se estiman ahorros de hasta 30%, con riesgo bajo-medio siempre que se mantenga un plan de muestreo periódico y trazable. Es el escenario más alineado con la filosofía CBM y la ISO 17359, aunque exige mayor disciplina organizacional.

La definición de estos escenarios responde a la necesidad de equilibrar confiabilidad y costo, considera la criticidad del motor en la operación continua. Estudios sobre modelos de mantenimiento confirman que la evaluación de alternativas permite reducir incertidumbre y mejorar la toma de decisiones en entornos industriales (Kumar et al., 2013b; Quatrini et al., 2020b).

Evaluación estratégica: impacto en la gestión de activos

La evaluación de los escenarios definidos se realiza con base en indicadores de desempeño ampliamente utilizados en la literatura, como disponibilidad, MTBF, MTTR y costos de mantenimiento. Estos indicadores permiten medir el impacto de cada intervalo en la confiabilidad del motor y en la eficiencia operativa de la organización. La literatura sobre métricas de mantenimiento confirma que el uso de indicadores estandarizados facilita la trazabilidad y la toma de decisiones en entornos industriales complejos (Kumar et al., 2013b).

El análisis económico considera los costos asociados a lubricantes, filtros y horas-hombre requeridas para cada intervención. La reducción en la frecuencia de cambios de aceite disminuye el gasto anual y mejora la eficiencia presupuestal. Estudios recientes sobre optimización de intervalos en motores de cogeneración demuestran que la extensión controlada

de los intervalos genera ahorros significativos sin comprometer la confiabilidad del sistema (Pytel et al., 2025b; Yan et al., 2019b).

Tabla 15

Análisis económico de los escenarios

Escenario	Intervalo	PM/año	Costo anual (COP)	Horas de indisponibilidad	Variación OPEX
A (OEM)	2.000 h	4	\$ 69.138.720	32 h	Base
B (2.500)	2.500 h	3	\$ 51.854.040	24 h	-15% a -20%
C (3.000)	3.000 h	3	\$ 51.854.040	24 h	-20% a -25%
D (CBM)	Condición	2-3	\$46-52 M aprox.	16-24 h	-25% a -30%

Nota. Los valores se estiman con base en costos de lubricantes, filtros y horas-hombre asociadas a PM. Costo PM de \$17.284.680/año.

La evaluación técnica confirma que el intervalo de 2.500 horas mantiene un nivel aceptable de confiabilidad y reduce el riesgo de fallas inducidas por intervenciones innecesarias. Desde el punto de vista económico, este escenario representa un ahorro del 15–20% en OPEX, lo que coincide con resultados reportados en estudios sobre mantenimiento predictivo en motores industriales. La evidencia respalda que la extensión moderada de intervalos constituye una estrategia viable y sostenible (Heng et al., 2009; Raposo et al., 2019b).

El impacto ambiental también se considera en la evaluación. La disminución en la frecuencia de cambios de aceite reduce la generación de residuos peligrosos y el consumo de insumos, lo que fortalece la sostenibilidad del sistema. Investigaciones sobre lubricantes avanzados confirman que la optimización de intervalos contribuye a la reducción de la huella ambiental en operaciones industriales (Bražinskienė et al., 2015b; del Río et al., 2023b).

Tabla 12*Evaluación comparativa del desempeño técnico según escenarios de intervalo de cambio de aceite*

Indicador (UNE 15341 / ISO 14224)	Escenario OEM (2.000 h)	Escenario 2.500 h	Escenario 3.000 h	Escenario CBM Dinámico	Base conceptual / cita
Disponibilidad técnica	97.0 %	97.6 %	98.0 %	98.3 %	UNE 15341 – KPI B1 (Carnero, 2023)
MTBF estimado (h)	1.250	1.380	1.500	1.520	ISO 14224 – fórmula RAM (Ali et al., 2022)
MTTR promedio (h)	4.5	4.5	4.5	4.5	ISO 14224 – mantenibilidad (Wolak, 2020)
Frecuencia cambio aceite	2.000 h	2.500 h	3.000 h	Según condición	SAE JA1011 – decisión basada en función y consecuencias
Costo anual lubricantes (COP)	\$75.0 M	\$60.0 M	\$53.0 M	\$48.0 M	Ali (2022), tendencias de reducción OPEX por CBM
Ahorro frente al OEM	—	20%	30%	36%	Wolak (2020), optimización predictiva
Riesgo técnico	Bajo	Bajo	Medio	Bajo-Medio	ISO 17359 – monitoreo de condición
Alineación estratégica	Media	Alta	Alta	Muy alta	ISO 55001 – decisiones basadas en evidencia

Nota. La tabla compara el comportamiento del desempeño técnico, económico y estratégico bajo cuatro escenarios de intervalo de cambio de aceite en el motor Caterpillar 3412 GAS.

Evaluación estratégica: impacto en la gestión de activos

La evaluación de los escenarios de intervalos de cambio de aceite no se limita a un análisis técnico y económico, sino que también considera el impacto estratégico en la gestión de activos. La extensión de intervalos influye en la madurez organizacional, en la sostenibilidad y en la capacidad de la empresa para alinear sus decisiones de mantenimiento con objetivos corporativos. La literatura sobre gestión de activos confirma que las decisiones basadas en valor fortalecen la trazabilidad y la integración de la operación con la estrategia empresarial (Carnero et al., 2023b; Kumar et al., 2013b).

La reducción en la frecuencia de intervenciones programadas disminuye el riesgo de fallas inducidas y aumenta la disponibilidad del sistema. Este efecto se traduce en una mayor confiabilidad del motor y en una mejor utilización de los recursos técnicos. Estudios sobre mantenimiento predictivo en la industria energética muestran que la optimización de intervalos

contribuye a la mejora continua y a la consolidación de prácticas de gestión de activos orientadas a resultados (Quatrini et al., 2020b; Yan et al., 2019b).

El impacto ambiental también forma parte de la evaluación estratégica. La disminución de residuos peligrosos derivados de lubricantes y filtros se alinea con políticas de sostenibilidad y responsabilidad corporativa. Investigaciones recientes sobre lubricantes avanzados confirman que la optimización de intervalos reduce la huella ambiental y fortalece la reputación de las organizaciones en materia de gestión sostenible (Bražinskienė et al., 2015b).

Finalmente, la evaluación estratégica demuestra que el escenario optimizado de 2.500 horas no solo aporta beneficios técnicos y económicos, sino que también fortalece la gestión de activos al integrar confiabilidad, sostenibilidad y eficiencia. Este resultado se convierte en un insumo clave para la actualización del plan de mantenimiento en SAP PM, asegura que las decisiones técnicas se alineen con la estrategia global de la organización.

Discusión crítica y validación académica

La discusión crítica de los escenarios confirma que la extensión moderada de intervalos constituye la opción más equilibrada para el motor Caterpillar G3412 GAS. El escenario optimizado de 2.500 horas mantiene la confiabilidad del sistema, reduce costos operativos y disminuye la generación de residuos peligrosos. La literatura especializada respalda que la extensión controlada de intervalos es viable cuando se fundamenta en evidencia tribológica y en modelos de confiabilidad aplicados a motores de combustión interna (Bouguerriou et al., 2005; Tormos, 2013b).

El análisis comparativo demuestra que los escenarios más agresivos, como el de 3.000 horas, ofrecen mayores ahorros económicos, pero incrementan el riesgo técnico. La evidencia

científica confirma que las decisiones de mantenimiento deben equilibrar riesgo y beneficio, evita tanto la sobre intervención como la exposición a fallas críticas. Estudios sobre gestión de activos señalan que la optimización de intervalos debe considerar criterios multicriterio que integren confiabilidad, costo y sostenibilidad (Carnero et al., 2023b; Quatrini et al., 2020b).

La validación académica se refleja en estudios recientes sobre motores de cogeneración a gas. La integración de datos tribológicos con algoritmos de pronóstico permite reducir costos y aumentar la disponibilidad. El uso de lubricantes avanzados contribuye a disminuir la huella ambiental, mientras que la optimización de intervalos fortalece la sostenibilidad operativa. Estos hallazgos coinciden con los resultados obtenidos en este trabajo, lo que respalda la elección del escenario optimizado (Pytel et al., 2025b; Yan et al., 2019b).

Finalmente, la discusión crítica valida que el intervalo de 2.500 horas representa un entregable técnico maduro y defendible. Este escenario integra confiabilidad, sostenibilidad y eficiencia, lo que lo convierte en la opción más adecuada para la actualización del plan de mantenimiento en SAP PM. La literatura confirma que la selección de intervalos basados en condición fortalece la madurez organizacional y la trazabilidad de las decisiones en la gestión de activos (Heng et al., 2009; Raposo et al., 2019b).

Objetivo Específico Seis – Actualización del Plan de Mantenimiento Optimizado

Propósito del objetivo y conexión con el entregable anterior

El propósito de este objetivo es actualizar el plan de mantenimiento del motor Caterpillar G3412 GAS en la plataforma SAP PM, integra los resultados obtenidos en el análisis de escenarios de intervalos. La transición desde un esquema tradicional hacia una estrategia

optimizada basada en condición permite mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y fortalecer la trazabilidad técnica. La literatura sobre gestión de activos confirma que la actualización de planes de mantenimiento debe reflejar decisiones fundamentadas en valor y evidencia técnica (Carnero et al., 2023b; Quatrini et al., 2020b).

Estructura del plan de mantenimiento actual

El plan actual contempla intervenciones programadas cada 2.000 horas, sigue las recomendaciones del fabricante. Este enfoque garantiza confiabilidad básica, pero genera sobre intervención, costos elevados y acumulación de residuos peligrosos. La estructura incluye actividades de cambio de aceite, reemplazo de filtros, inspección de componentes y limpieza de sistemas auxiliares. Estudios sobre mantenimiento preventivo señalan que los planes basados únicamente en frecuencia fija tienden a perder eficiencia (Ali & Abdelhadi, 2022a; Heng et al., 2009)(Ali & Abdelhadi, 2022c; Heng et al., 2009).

Limitaciones del plan actual

El plan actual presenta limitaciones técnicas y económicas que justifican su actualización. La sobre intervención incrementa el riesgo de fallas inducidas, mientras que los costos asociados a lubricantes y filtros afectan el presupuesto operativo. Además, la frecuencia fija no considera la variabilidad de las condiciones de operación ni la evidencia tribológica disponible. Investigaciones sobre confiabilidad en motores de combustión interna confirman que los planes rígidos reducen la capacidad de adaptación y limitan la eficiencia organizacional (Bouguerriou et al., 2005; Yan et al., 2019b).

Propuesta de actualización del plan optimizado

La propuesta de actualización incorpora un intervalo de 2.500 horas como nuevo estándar, respaldado por evidencia tribológica y análisis de confiabilidad. El plan se reorganiza

en SAP PM para reflejar esta frecuencia, ajusta las órdenes de trabajo, los materiales requeridos y los recursos técnicos. Además, se incluye una lógica condicional para activar intervenciones anticipadas en caso de que los parámetros del análisis de aceite superen los umbrales definidos. La literatura sobre CBM confirma que los planes dinámicos mejoran la adaptabilidad y reducen el riesgo técnico (Pytel et al., 2025b; Tormos, 2013b).

Tabla 16

Cuadro de Impacto – Escenario 2.500 h

Dimensión	Evidencia / Resultado	Impacto
Técnico	Parámetros tribológicos estables (viscosidad, TAN, PQ) y ausencia de contaminantes/metales de desgaste	Garantiza confiabilidad operativa del motor y seguridad en la extensión del intervalo
Económico	Reducción aproximada del OPEX en 15% (menos cambios de aceite y filtros, menor tiempo de parada)	Ahorro tangible en costos de mantenimiento y mayor disponibilidad del activo
Ambiental	Menor consumo de lubricante y reducción proporcional en residuos peligrosos	Contribuye a sostenibilidad operacional y disminuye huella ambiental
Estratégico	Integración de resultados en SAP PM y alineación con ISO 55001 y UNE 16646	Fortalece la gestión de activos, mejora trazabilidad y posiciona a la organización en estándares internacionales

Nota. La reorganización se realiza en SAP PM, ajusta la frecuencia, los materiales y la lógica de activación.

Impacto técnico del plan optimizado

El nuevo plan mantiene la confiabilidad del motor al reducir el número de intervenciones innecesarias y al integrar evidencia tribológica en la toma de decisiones. La literatura sobre confiabilidad confirma que la reducción de intervenciones programadas disminuye el riesgo de fallas inducidas y mejora la disponibilidad del sistema. Este impacto técnico fortalece la gestión de activos al garantizar continuidad operativa en entornos críticos (Heng et al., 2009; Kumar et al., 2013b).

Impacto económico del plan optimizado

La actualización del plan permite reducir costos operativos en un rango estimado del 15–20% anual. La disminución en el consumo de lubricantes y filtros, junto con la reducción de horas-hombre, genera ahorros significativos en OPEX. Estudios sobre optimización de intervalos en motores de cogeneración confirman que la extensión moderada de intervalos produce beneficios económicos sin comprometer la confiabilidad (Pytel et al., 2025b; Raposo et al., 2019b).

Tabla 17

Impacto económico del plan optimizado

Elemento	Plan actual (OEM)	Plan optimizado (CBM)
Intervalo base	2.000 horas	2.500 horas
Actividades PM	Fijas	Condicionales + fijas
Costos estimados	\$69.138.720/año	\$51.854.040/año
Frecuencia de PM	4 por año	3 por año
Trazabilidad en SAP	Básica	Avanzada

Nota. La comparación asume tres PM/año para el plan optimizado (intervalo 2.500 h) y cuatro PM/año para el plan actual (intervalo 2.000 h).

Impacto ambiental del plan optimizado

La reducción en la frecuencia de cambios de aceite disminuye la generación de residuos peligrosos y el consumo de insumos. Este efecto contribuye a la sostenibilidad del sistema y fortalece la responsabilidad corporativa. Investigaciones sobre lubricantes avanzados confirman que la optimización de intervalos reduce la huella ambiental y mejora la eficiencia energética (Bražinskienė et al., 2015b; del Río et al., 2023b).

Integración en SAP PM y trazabilidad

La implementación del nuevo plan en SAP PM incluye la creación de órdenes de trabajo con frecuencia ajustada, la actualización de listas de materiales y la configuración de alertas condicionales. Esta integración mejora la trazabilidad de las decisiones técnicas y permite auditar el cumplimiento del plan en tiempo real. La literatura sobre gestión digital de activos destaca que los sistemas ERP fortalecen la gobernanza técnica y la alineación con objetivos estratégicos (Kumar et al., 2013b; Quatrini et al., 2020b).

Discusión crítica y validación académica

La discusión crítica confirma que el plan optimizado de 2.500 horas representa un equilibrio adecuado entre confiabilidad, costo y sostenibilidad. Los planes más agresivos, como el de 3.000 horas, ofrecen mayores ahorros, pero incrementan el riesgo técnico. La literatura especializada valida que las decisiones de mantenimiento deben considerar criterios multicriterio que integren confiabilidad, costo y sostenibilidad (Bouguerriou et al., 2005; Quatrini et al., 2020b).

Síntesis y transición al objetivo siguiente

La actualización del plan de mantenimiento optimizado constituye un entregable técnico consolidado, alineado con los resultados del objetivo cinco. Este nuevo plan fortalece la confiabilidad del motor, reduce costos operativos y mejora la sostenibilidad del sistema. Además, establece una base sólida para el siguiente objetivo, donde se evaluará el impacto ambiental de las decisiones de mantenimiento (Pytel et al., 2025b).

Recomendación técnica y alineación estratégica

Se recomienda adoptar el intervalo de 2.500 horas como estándar operativo inicial para los motores Caterpillar G3412 GAS, integrándolo en SAP PM como plan optimizado

bajo enfoque PMO + CBM. Este intervalo se valida con base en evidencia tribológica, análisis de confiabilidad y resultados económicos obtenidos en la evaluación de escenarios. La literatura especializada confirma que la extensión moderada de intervalos permite reducir costos, mantener la confiabilidad y fortalecer la trazabilidad técnica (Raposo et al., 2019b; Tormos, 2013b).

El nuevo plan debe incluir análisis tribológicos cada 750–1.000 horas, como mecanismo de control técnico para anticipar desviaciones y activar intervenciones condicionales. Esta práctica mejora la capacidad de respuesta del sistema y permite mantener la disponibilidad del activo en niveles óptimos. Estudios sobre CBM en motores de cogeneración confirman que el monitoreo continuo de lubricantes es clave para sostener intervalos extendidos sin comprometer la confiabilidad (Wakiru et al., 2019b; Yuan et al., 2024a).

Se recomienda evaluar, después del primer ciclo operativo, la viabilidad de avanzar hacia un intervalo de 3.000 horas o hacia un esquema CBM completamente dinámico. Esta decisión debe basarse en el desempeño técnico observado, en los resultados de los análisis tribológicos y en la evolución de los indicadores de confiabilidad. La literatura sobre gestión de activos sugiere que los planes de mantenimiento deben evolucionar conforme a la madurez organizacional y a la capacidad de monitoreo disponible (Carnero et al., 2023b; Kumar et al., 2013b).

Tabla 18

Estructura metodológica de los objetivos específicos: propósito, insumos y resultados esperados

Objetivo	Propósito	Insumos principales	Resultados esperados
1. Línea Base	Diagnosticar el plan vigente y su coherencia con la criticidad del motor	Plan OEM + SAP PM, registros históricos, indicadores UNE 15341	Identificación de brechas, redundancias y riesgos
2. Análisis Tribológico	Caracterizar el lubricante y sus mecanismos de degradación	Muestreos de aceite, parámetros físico-químicos, literatura tribológica	Evidencia técnica sobre estabilidad y desgaste
3. Plan de Muestreo	Estandarizar la toma de muestras y parámetros de análisis	Criticidad del sistema lubricante, normas ASTM, SAP PM	Plan reproducible y trazable de muestreo
4. Tendencias de Resultados	Evaluar la evolución cronológica de parámetros tribológicos	Datos de muestreo, KPIs técnicos	Identificación de patrones de degradación y confiabilidad
5. Escenarios de Intervalos	Comparar intervalos tradicionales vs. extendidos	Tendencias tribológicas, condicionantes operativos, análisis económico	Validación de intervalos óptimos, impacto en OPEX y confiabilidad
6. Plan Optimizado	Integrar el modelo CBM-PMO en SAP PM	Resultados de escenarios, KPIs, lineamientos ISO 55000	Plan institucionalizado, trazable y sostenible

Nota: Esta tabla resume la lógica metodológica que guía el desarrollo de cada objetivo específico, articula su propósito, los insumos técnicos utilizados y los resultados esperados. Permite visualizar la progresión del modelo PMO + CBM y su coherencia con el propósito general del trabajo.

Descripción de cómo se alcanza el logro de objetivos

Objetivo Específico Uno – Línea Base de Mantenimiento

Este objetivo se alcanza mediante la recopilación y análisis de información técnica del motor, incluye parámetros de operación, condiciones de servicio y configuración del sistema de lubricación. Esta línea base permite establecer el contexto técnico necesario para evaluar la confiabilidad y el desempeño del lubricante. La literatura especializada confirma que el conocimiento detallado del sistema es esencial para diseñar estrategias de mantenimiento efectivas (Bouguerriou et al., 2005).

Además, se incorporan estudios sobre degradación de lubricantes en motores de gas, que evidencian cómo la variabilidad operacional afecta la vida útil del aceite y la confiabilidad del sistema.

Objetivo Específico Dos – Análisis Tribológico

Este objetivo se desarrolla mediante el análisis tribológico de muestras de aceite tomadas en campo, evalúa parámetros como viscosidad, contenido de metales, oxidación y presencia de contaminantes. Este análisis permite comprender el desgaste real del sistema y anticipar fallas. La literatura tribológica confirma que el monitoreo del lubricante es clave para implementar mantenimiento basado en condición (Tormos, 2013b; Wakiru et al., 2019b).

Se integran estudios sobre nano lubricantes y sensores de condición, que refuerzan la importancia de evaluar el comportamiento del aceite en tiempo real para mejorar la confiabilidad del motor (Zhu et al., 2017b).

Objetivo Específico Tres – Plan de Muestreo

Este objetivo se aborda mediante la implementación de un plan de muestreo estructurado, con frecuencias definidas entre 750 y 1.000 horas, puntos de toma estandarizados y protocolos de envío a laboratorio. El plan permite obtener datos confiables para el análisis tribológico y para la toma de decisiones en mantenimiento. La literatura sobre CBM destaca que los planes de muestreo bien diseñados son fundamentales para garantizar la calidad del diagnóstico (Telford et al., 2011b).

También se consideran criterios de representatividad, trazabilidad y repetibilidad, alineados con estándares internacionales (Minng Tan & Raghavan, 2008; Yuan et al., 2024)ng Tan & Raghavan, 2008; Yuan et al., 2024).

Objetivo Específico Cuatro – Tendencias de Resultados

Este objetivo se desarrolla mediante la interpretación de los resultados del análisis tribológico, identifica tendencias de desgaste, degradación y contaminación. Se aplican herramientas gráficas y criterios técnicos para evaluar la evolución del aceite a lo largo del tiempo. La literatura confirma que el análisis de tendencias permite anticipar fallas y ajustar los intervalos de mantenimiento (Heng et al., 2009).

Se integran modelos de pronóstico y algoritmos de estimación de vida útil remanente, que permiten complementar el análisis técnico con métricas predictivas (Si et al., 2011).

Objetivo Específico Cinco – Escenarios de Intervalos de Cambio de Aceite

El logro de este objetivo se alcanza mediante la construcción de escenarios comparativos que incluyen la estrategia del fabricante (OEM), un intervalo optimizado de 2.500 horas, un intervalo ambicioso de 3.000 horas y un esquema dinámico basado en condición. Cada escenario se evalúa con indicadores técnicos y económicos como disponibilidad, MTBF, MTTR y OPEX, lo que permite medir el impacto en la confiabilidad y en los costos operativos. La literatura especializada confirma que la definición de escenarios es una práctica necesaria para reducir incertidumbre y fortalecer la toma de decisiones en sistemas críticos (Jardine et al., 2006b).

El análisis económico se desarrolla considerando costos de lubricantes, filtros y horas-hombre, mientras que el análisis técnico se centra en la confiabilidad y en la reducción de fallas inducidas. Los resultados muestran que el intervalo de 2.500 horas representa un equilibrio adecuado entre confiabilidad, costo y sostenibilidad. Este hallazgo se valida con estudios recientes sobre motores de cogeneración, que demuestran que la extensión moderada de intervalos genera ahorros significativos sin comprometer la confiabilidad (Pytel et al., 2025b).

La discusión crítica confirma que los escenarios más agresivos, como el de 3.000 horas, ofrecen mayores ahorros, pero incrementan el riesgo técnico. Por ello, se concluye que el intervalo de 2.500 horas constituye el entregable técnico más defendible, al integrar confiabilidad, sostenibilidad y eficiencia. Este resultado se convierte en insumo clave para la actualización del plan de mantenimiento en SAP PM (Bouguerriou et al., 2005).

Objetivo Específico Seis – Conclusiones Integradas y Validación del Modelo PMO + CBM

El logro de este objetivo se alcanza mediante la reorganización del plan de mantenimiento en SAP PM, integra el intervalo optimizado de 2.500 horas como nuevo estándar operativo. La actualización incluye la creación de órdenes de trabajo con frecuencia ajustada, la actualización de listas de materiales y la configuración de alertas condicionales basadas en análisis tribológicos. Este proceso fortalece la trazabilidad técnica y asegura que las decisiones de mantenimiento se alineen con la estrategia global de gestión de activos (Carnero et al., 2023b; Kumar et al., 2013b).

El impacto técnico se refleja en la reducción de intervenciones innecesarias y en la mejora de la disponibilidad del motor. El impacto económico se traduce en un ahorro estimado del 15–20% en OPEX anual, mientras que el impacto ambiental se evidencia en la disminución de residuos peligrosos y en el consumo reducido de insumos. La literatura sobre sostenibilidad confirma que la optimización de planes técnicos contribuye a la eficiencia energética y a la reducción de la huella ambiental (del Río et al., 2023b).

Finalmente, la recomendación técnica establece que el intervalo de 2.500 horas debe adoptarse como estándar inicial, acompañado de análisis tribológicos cada 750–1.000 horas.

Se sugiere evaluar, después del primer ciclo operativo, la viabilidad de avanzar hacia un intervalo de 3.000 horas o hacia un esquema CBM completamente dinámico. Esta recomendación se valida con literatura especializada y constituye el entregable consolidado del objetivo seis (Tormos, 2013b).

Síntesis final de logros

La ejecución de los seis objetivos específicos permite consolidar un proceso metodológico progresivo que inicia con el conocimiento de la línea base del sistema de lubricación, continúa con la comprensión del comportamiento tribológico del aceite, aplica un plan de muestreo estructurado, analiza las tendencias de resultados, evalúa escenarios de intervalos y culmina con la actualización de los planes de mantenimiento en SAP PM. Esta secuencia asegura que cada objetivo aporte un componente esencial para la optimización del mantenimiento del motor Caterpillar G3412 GAS (Jardine et al., 2006b).

El logro conjunto de los objetivos confirma que la integración de análisis tribológicos, indicadores de desempeño y evaluación de escenarios permite fundamentar decisiones técnicas con impacto económico y ambiental. La actualización del plan de mantenimiento optimizado refleja la madurez alcanzada en la gestión de activos, al reducir costos, mejorar la confiabilidad y disminuir la generación de residuos peligrosos (Carnero et al., 2023b).

En síntesis, los objetivos alcanzados cumplen el propósito general de la investigación: demostrar que la optimización de intervalos de cambio de aceite mediante metodologías PMO + CBM constituye una estrategia técnica, económica y ambientalmente sostenible, capaz de fortalecer la disponibilidad del activo y la eficiencia del sistema de gestión de mantenimiento (Kumar et al., 2013b; Tormos, 2013b; Wakiru et al., 2019b).

Resultados más relevantes

La presente unidad expone los hallazgos más significativos obtenidos a partir del cumplimiento de los objetivos específicos de la investigación. Los resultados se organizan en cuatro dimensiones: técnicas, económicas, ambientales y estratégicas, con el fin de mostrar de manera integral el impacto de la optimización de los intervalos de cambio de aceite en el motor Caterpillar G3412 GAS.

La estructura responde a la secuencia metodológica previamente desarrollada, en la que el conocimiento de la línea base, la comprensión tribológica, la aplicación del plan de muestreo y el análisis de tendencias permiten fundamentar la evaluación de escenarios y la actualización de los planes de mantenimiento en SAP PM. De esta manera, los resultados se presentan no solo como cifras o comparaciones, sino como evidencia crítica que valida la pertinencia de la propuesta y su alineación con la gestión de activos y la sostenibilidad.

En este capítulo se destacan los aportes más relevantes para la confiabilidad del motor, la reducción de costos operativos, la disminución de residuos peligrosos y la consolidación de un plan de mantenimiento optimizado, constituye la base para las conclusiones y recomendaciones finales de la investigación.

Resultados técnicos

- Intervalos de cambio de aceite: comparación entre OEM (2.000 h), optimizado (2.500 h), ambicioso (3.000 h) y CBM dinámico.
- Confiabilidad: mejora en MTBF y disponibilidad con el intervalo optimizado.
- Tribología: tendencias de desgaste y contaminantes que validan la extensión moderada del intervalo.

Resultados económicos

- OPEX anual: reducción estimada del 15–20% con el intervalo de 2.500 h.
- Costos directos: ahorro en lubricantes, filtros y horas-hombre.
- Comparación de escenarios: tabla con costos acumulados por año en cada intervalo.

Resultados ambientales

- Residuos peligrosos: disminución proporcional al menor consumo de aceite y filtros.
- Huella ambiental: reducción de emisiones indirectas asociadas a la producción y disposición de insumos.

Resultados estratégicos

- Gestión de activos: integración del plan optimizado en SAP PM con trazabilidad digital.
- Madurez organizacional: alineación con ISO 55001 y mejores prácticas internacionales.
- Recomendación final: adoptar 2.500 h como estándar inicial, con posibilidad de evolución hacia 3.000 h o CBM dinámico.

Conclusiones

Conclusiones técnicas

- La optimización del intervalo de cambio de aceite a 2.500 horas garantiza un equilibrio entre confiabilidad y disponibilidad del motor Caterpillar G3412 GAS.
- El análisis tribológico confirma que la extensión moderada del intervalo no compromete el desempeño del lubricante ni incrementa riesgos de falla.
- La aplicación del plan de muestreo y el análisis de tendencias fortalecen la capacidad predictiva del sistema de mantenimiento.

Conclusiones económicas

- La reducción del OPEX anual se estima entre **15–20%**, principalmente por menor consumo de lubricantes, filtros y horas-hombre.
- El escenario optimizado de 2.500 horas representa la mejor relación costo–beneficio frente a los intervalos OEM y ambiciosos.
- La evaluación comparativa demuestra que los ahorros económicos se logran sin comprometer la confiabilidad técnica.

Conclusiones ambientales

- La disminución en el consumo de insumos reduce la generación de residuos peligrosos, contribuye a la sostenibilidad del sistema.
- La optimización del intervalo de cambio de aceite se alinea con prácticas de gestión ambiental y con estándares internacionales de sostenibilidad.
- El impacto ambiental positivo refuerza la pertinencia de integrar criterios ecológicos en la gestión de activos industriales.

Conclusiones estratégicas

- La actualización del plan de mantenimiento en SAP PM consolida la trazabilidad digital y fortalece la madurez organizacional en gestión de activos.
- La investigación demuestra que la integración de metodologías PMO + CBM constituye una estrategia sostenible y replicable en otros sistemas críticos.
- Se recomienda adoptar el intervalo de 2.500 horas como estándar inicial, acompañado de monitoreo tribológico, y evaluar posteriormente la transición hacia intervalos de 3.000 horas o esquemas CBM dinámicos.

En síntesis, las conclusiones confirman que la optimización de intervalos de cambio de aceite mediante metodologías PMO + CBM constituye una estrategia técnica, económica, ambiental y estratégica que fortalece la confiabilidad del motor Caterpillar G3412 GAS, reduce costos operativos, minimiza impactos ambientales y consolida la gestión de activos en la organización. Estos hallazgos validan el propósito general de la investigación y ofrecen una base sólida para futuras aplicaciones en sistemas industriales similares.

Recomendaciones

Recomendaciones técnicas

- Adoptar el intervalo de 2.500 horas como estándar inicial para el motor Caterpillar G3412 GAS, acompañado de análisis tribológicos cada 750–1.000 horas.
- Implementar un plan de muestreo estandarizado que garantice la representatividad y trazabilidad de las muestras de aceite.
- Fortalecer el monitoreo de tendencias de resultados mediante herramientas gráficas y modelos predictivos de vida útil remanente.

Recomendaciones económicas

- Consolidar un sistema de control de costos en SAP PM que permita medir el impacto económico de la optimización de intervalos.
- Reinvertir los ahorros generados en programas de confiabilidad y capacitación técnica del personal.
- Evaluar periódicamente la relación costo–beneficio de los intervalos de cambio de aceite para mantener la sostenibilidad financiera

Recomendaciones ambientales

- Establecer indicadores ambientales asociados al consumo de lubricantes y generación de residuos peligrosos.
- Integrar prácticas de economía circular en la gestión de aceites usados, alineadas con normativas locales e internacionales.
- Promover la adopción de lubricantes avanzados o nanolubricantes que reduzcan el impacto ambiental y mejoren la eficiencia energética.

Recomendaciones estratégicas

- Incorporar la optimización de intervalos como parte de la política de gestión de activos de la organización, alineada con ISO 55001.
- Utilizar SAP PM como plataforma central para la trazabilidad digital y la integración de metodologías PMO + CBM.
- Evaluar, tras el primer ciclo operativo, la viabilidad de avanzar hacia intervalos de 3.000 horas o hacia un esquema CBM dinámico, siempre respaldado por evidencia tribológica.

En síntesis, las recomendaciones planteadas buscan garantizar que los resultados obtenidos se traduzcan en mejoras sostenibles y replicables en otros sistemas industriales. La adopción del intervalo optimizado, la integración de prácticas ambientales y la consolidación de la gestión digital en SAP PM constituyen acciones estratégicas que fortalecen la confiabilidad, reducen costos y posicionan a la organización en un nivel superior de madurez en gestión de activos.

Síntesis final de la investigación

Como trabajo de profundización, esta síntesis final integra los resultados obtenidos con el propósito general de la investigación, destaca su impacto técnico, económico, ambiental y estratégico, y proyecta su aplicación hacia esquemas avanzados de gestión de activos.

La investigación demuestra que la optimización de los intervalos de cambio de aceite en el motor Caterpillar G3412 GAS, mediante la integración de metodologías PMO y CBM, constituye una estrategia técnica, económica, ambiental y estratégica que fortalece la confiabilidad del activo, reduce costos operativos y minimiza impactos ambientales. Los resultados obtenidos validan el propósito general del estudio y confirman que la gestión de activos, apoyada en análisis tribológicos y en la actualización digital de planes de mantenimiento en SAP PM, ofrece un camino sostenible y replicable para sistemas industriales similares.

Las conclusiones sintetizan la pertinencia de la propuesta, mientras que las recomendaciones plantean acciones concretas para consolidar su aplicación y evolución hacia esquemas dinámicos basados en condición. En conjunto, este trabajo aporta evidencia científica y práctica que contribuye al avance de la ingeniería de mantenimiento y a la sostenibilidad de la operación industrial.

Referencias

- Ahmad, R., & Kamaruddin, S. (2012a). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.02.002>
- Ali, A., & Abdelhadi, A. (2022a). Condition-Based Monitoring and Maintenance: State of the Art Review. *Applied Sciences*, 12(2), 688. <https://doi.org/10.3390/app12020688>
- Bouguerriou, N., Haritopoulos, M., Capdessus, C., & Allam, L. (2005). Novel cyclostationarity-based blind source separation algorithm using second order statistical properties: Theory and application to the bearing defect diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(6), 1260–1281. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.07.007>
- Bražinskienė, D., Ručinskienė, A., & Asadauskas, S. (2015a, November 26). Miniaturization of Lubricant Degradation Testing for Natural Gas Engines. *Proceedings of the 8th International Scientific Conference “BALTTTRIB 2015.”* <https://doi.org/10.15544/balttrib.2015.01>
- Carnero, M. C., Martínez, P., & Gutiérrez, L. (2023a). Fuzzy multicriteria evaluation and trends of asset management performance. *Case Studies in Construction Materials*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02660>
- del Río, J. M. L., Rial, R., Nasser, K., & Guimarey, M. J. G. (2023b). Experimental Investigation of Tribological and Rheological Behaviour of Hybrid Nanolubricants

for Applications in Internal Combustion Engines. *Tribology Letters*, 71(1), 25.

<https://doi.org/10.1007/s11249-023-01697-5>

Heng, A., Zhang, S., Tan, A. C. C., & Mathew, J. (2009). Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(3), 724–739.

<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.06.009>

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006a). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.

<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>

Konkol, I., Cebula, J., Świerczek, L., Sopa, J., Sopa, J., & Cenian, A. (2023). Characterization of Deposits Formed in Gas Engines Fuelled by Coal Mine Methane. *Materials*, 16(6), 2517. <https://doi.org/10.3390/ma16062517>

Kumar, U., Galar, D., Parida, A., Stenström, C., & Berges, L. (2013a). Maintenance performance metrics: a state-of-the-art review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 19(3), 233–277. <https://doi.org/10.1108/JQME-05-2013-0029>

Kumar, U., Galar, D., Parida, A., Stenström, C., & Berges, L. (2013b). Maintenance performance metrics: a state-of-the-art review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 19(3), 233–277. <https://doi.org/10.1108/JQME-05-2013-0029>

- Li, Y., Peng, S., Li, Y., & Jiang, W. (2020a). A review of condition-based maintenance: Its prognostic and operational aspects. *Frontiers of Engineering Management*, 7(3), 323–334. <https://doi.org/10.1007/s42524-020-0121-5>
- Ming Tan, C., & Raghavan, N. (2008). A framework to practical predictive maintenance modeling for multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(8), 1138–1150. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.09.003>
- Mora, A., & Orozco, L. (2021). *Proyecto Integrador I y II UCN*.
- Paladugu, M., Lucas, D. R., & Scott Hyde, R. (2018a). Effect of lubricants on bearing damage in rolling-sliding conditions: Evolution of white etching cracks. *Wear*, 398–399, 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.001>
- Pennacchi, P., Bachschmid, N., & Vania, A. (2006). A model-based identification method of transverse cracks in rotating shafts suitable for industrial machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(8), 2112–2147. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.04.005>
- Pytel, K., Filipek, R., Kalwar, A., Piaskowska-Silarska, M., Hudy, W., Depešová, J., & Kurdziel, F. (2025a). Proactive Maintenance and Data-Driven Optimization of Mineral Lubricating Oil in a Gas Engine Cogeneration System Extending Oil Change Intervals for Cost Savings and a Reduced Environmental Footprint. *Energies*, 18(1), 154. <https://doi.org/10.3390/en18010154>

- Quatrini, E., Costantino, F., Di Gravio, G., & Patriarca, R. (2020a). Condition-Based Maintenance—An Extensive Literature Review. *Machines*, 8(2), 31.
<https://doi.org/10.3390/machines8020031>
- Raposo, H., Farinha, J. T., Fonseca, I., & Galar, D. (2019a). Predicting condition based on oil analysis – A case study. *Tribology International*, 135, 65–74.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.041>
- Si, X.-S., Wang, W., Hu, C.-H., & Zhou, D.-H. (2011). Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches. *European Journal of Operational Research*, 213(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.11.018>
- Telford, S., Mazhar, M. I., & Howard, I. (2011a). Condition Based Maintenance (CBM) in the oil and gas industry: An overview of methods and techniques. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM 2011)* (pp. 1152–1159).
<https://ieomsociety.org/ieom2011/pdfs/IEOM176.pdf>
- Tian, Z., & Liao, H. (2011). Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(5), 581–589. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.12.023>
- Tormos, B. (2013a). Engine Condition Monitoring Based on Oil Analysis. In *Encyclopedia of Tribology* (pp. 970–977). Springer US.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_1149

- Wakiru, J. M., Pintelon, L., Muchiri, P. N., & Chemweno, P. K. (2019a). A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 118, 108–132.
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.08.039>
- Wolak, A., Krasodonski, W., & Zajac, G. (2020a). FTIR analysis and monitoring of used synthetic oils operated under similar driving conditions. *Friction*, 8(5), 995–1006. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0344-9>
- Yan, S., Ma, B., Zheng, C., & Chen, J. (2019a). An Optimal Lubrication Oil Replacement Method Based on Selected Oil Field Data. *IEEE Access*, 7, 92110–92118. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2927426>
- Yuan, W., Li, X., Gu, H., Zhang, F., & Miao, F. (2024a). Engine remaining useful life prediction based on PSO optimized multi-layer long short-term memory and multi-source information fusion. *Measurement and Control*, 57(5), 638–649.
<https://doi.org/10.1177/00202940231214868>
- Zhu, X., Zhong, C., & Zhe, J. (2017a). Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring — A review. *Tribology International*, 109, 473–484.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.01.015>