

**Modelo de mantenimiento predictivo fundamentado en técnicas tribológicas para los
motores diésel de la empresa Concremóvil S.A.S**

Autor(es):

Gustavo Adolfo Villamil Bravo

Dimar Cáceres León

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

Wilson Guillín Estrada

MSc. en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2025

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	8
1. Racional y estructura del documento	10
1.1. Planteamiento del problema.....	10
1.2. Justificación	14
1.3. Objetivo General.....	15
1.4. Objetivos Específicos.....	15
1.5. Contenido del documento	16
2. Marco teórico	17
2.1. Mantenimiento preventivo y correctivo.....	17
2.2. Mantenimiento predictivo.....	18
2.3. Mantenimiento predictivo a partir de tribología	20
2.3.1. Análisis de aceites lubricantes	21
3. Modelo de mantenimiento predictivo fundamentado en técnicas tribológicas.....	25
3.1. Selección de muestra de estudio y análisis de aceite	25
3.2. Formulación del modelo predictivo basado en técnicas tribológicas	29
4. Resultados de implementación del modelo basado en técnicas tribológicas	32
4.1. Construcción de línea base de operación	32
4.2. Selección de variables tribológicas para el modelo	33
4.3. Implementación del modelo predictivo a partir de variables tribológicas	39
4.4. Impactos de la implementación del modelo de mantenimiento.....	44
Conclusiones	47

Referencias Bibliográficas 49

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Datos experimentales obtenidos para la muestra de estudio</i>	27
Tabla 2 <i>Variables tribológicas preservadas para cada motor analizado.</i>	39

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Distribución de los equipos de flota en Concremóvil S.A.S.</i>	10
Figura 2 <i>Entrega de concreto de la mezcladora (mixer), con autobomba</i>	11
Figura 3 <i>Medición en sitio de las condiciones de un motor diésel para carga pesada.</i>	19
Figura 4 <i>Análisis de laboratorio aceite de motor diésel</i>	23
Figura 5 <i>Toma de muestras de aceite en motores de mixer.</i>	27
Figura 6 <i>Matriz de correlación de Pearson entre parejas de variables experimentales.</i>	30
Figura 7 <i>Distribución de costos de mantenimiento para la flota de Concremóvil (línea base) ...</i>	32
Figura 8 <i>Matriz de correlación para Mixer International ERK-987.</i>	34
Figura 9 <i>Matriz de correlación para Mixer International ERL-047.</i>	36
Figura 10 <i>Matriz de correlación para Mixer Kenworth WFD-485.</i>	37
Figura 11 <i>Matriz de correlación para Generador Caterpillar SR-500.</i>	38
Figura 12 <i>Concentración de metales y contaminantes para los motores de mixer International ERK-987 (a) y ERL-047 (b)</i>	40
Figura 13 <i>Resultados de dilución de aceite en función del tiempo de uso para motores ERK-987 (a), ERL-045 (b) y WFD-485 (c)</i>	41
Figura 14 <i>Análisis de variables tribológicas para el generador SR-500.</i>	43
Figura 15 <i>Análisis de metales y contaminantes del generador SR-500.</i>	44
Figura 16 <i>Comparativa de costos de mantenimiento para motores ISM International.</i>	45
Figura 17 <i>Comparativa de costos de mantenimiento para motores ISM Kenworth</i>	45

Resumen

Título: Modelo de mantenimiento predictivo fundamentado en técnicas tribológicas para los motores diésel de la empresa Concremóvil S.A.S*

Autor: Gustavo Villamil Bravo, Dimar Cáceres León**

Palabras Clave: mantenimiento predictivo, análisis de aceite, tribología, gestión de flotas, industria 4.0

Descripción: Este estudio desarrolló un modelo predictivo de mantenimiento basado en análisis tribológico de aceites lubricantes para equipos diésel de Concremóvil SAS. Mediante el monitoreo sistemático de parámetros clave (viscosidad, metales de desgaste, oxidación y TBN), se establecieron patrones de degradación que permitieron extender los intervalos de mantenimiento de 700 a 1000 horas sin comprometer la integridad de los equipos, mediante la identificación de tendencias en las variables tribológicas medidas en análisis históricos de la muestra, consistente en un conjunto definido de vehículos de la flota de Concremóvil SAS. La implementación piloto mostró reducciones del 20-25% en costos operativos (lubricantes, filtros y mano de obra), con potencial de ahorros mayores al escalarse a toda la flota. El enfoque se alinea con estándares ISO 55001 y combina accesibilidad técnica (bajo requerimiento de infraestructura IoT) con adaptabilidad a condiciones operativas reales. Como limitación, el modelo requiere recalibración para distintos tipos de equipos y entornos, sugiriendo futuras mejoras con integración de machine learning u otros modelos de aprendizaje automático, al igual que la realización de nuevas mediciones que aporten robustez al modelo. Este caso evidencia el valor de las estrategias predictivas para la gestión de activos en la industria pesada, y abre la puerta a futuros desarrollos orientados a la mejora de la gestión de activos de Concremóvil SAS.

* Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Wilson David Guillín Estrada. MSc. en Ingeniería Mecánica.

Abstract

Title: Predictive Maintenance Model Based on Tribological Techniques for Diesel Engines at Concremóvil S.A.S*

Author(s): Gustavo Villamil Bravo, Dimar Cáceres León^{††}

Key Words: predictive maintenance, oil analysis, tribology, fleet management, Industry 4.0

Description: This study developed a predictive maintenance model based on tribological analysis of lubricating oils for diesel equipment at Concremóvil. Through systematic monitoring of key parameters (viscosity, wear metals, oxidation, and TBN), degradation patterns were established, enabling the extension of maintenance intervals from 700 to 1000 hours without compromising equipment integrity. This was achieved by identifying trends in tribological variables measured in historical oil analysis data from a defined sample of vehicles in Concremóvil's fleet. The pilot implementation demonstrated reductions of 20-25% in operational costs (lubricants, filters, and labor), with potential for greater savings when scaled to the entire fleet. The approach aligns with ISO 55001 standards and combines technical accessibility (low IoT infrastructure requirements) with adaptability to real operating conditions. As a limitation, the model requires recalibration for different equipment types and environments, suggesting future improvements through integration with machine learning or other automated learning models, as well as additional measurements to enhance model robustness. This case study highlights the value of predictive strategies for asset management in heavy industry and paves the way for future developments aimed at improving asset management practices at Concremóvil.

* Degree Work

^{††}Faculty of Engineering. School of Mechanical Engineering. Specialization in Maintenance Management. Supervisor: Wilson David Guillín Estrada, M.Sc. in Mechanical Engineering.

Introducción

En el competitivo sector de la producción y distribución de concreto en Colombia, Concremóvil S.A.S. se ha posicionado como líder gracias a su capacidad de producción superior a los 2 millones de metros cúbicos anuales y su amplia cobertura geográfica. Sin embargo, la empresa enfrenta un desafío crítico en la gestión de su flota de 105 unidades, principalmente mezcladoras, donde el actual esquema empírico de mantenimiento preventivo cada 700 horas de operación - basado en experiencia operativa más que en datos técnicos - está generando fallas mecánicas inesperadas, paradas no programadas y pérdidas económicas estimadas en hasta \$43.5 millones de pesos por evento. Esta situación revela una brecha entre las prácticas actuales y las necesidades reales de mantenimiento de los equipos, afectando directamente la confiabilidad del servicio y la eficiencia operativa de la compañía.

El análisis tribológico de aceites lubricantes emerge como solución tecnológica para transformar este paradigma de mantenimiento. Esta metodología, avalada por estándares internacionales como ASTM y ISO, permite evaluar en tiempo real el estado interno de los motores mediante el monitoreo de parámetros clave como viscosidad, contenido de metales de desgaste y contaminantes. Estudios recientes demuestran que su implementación puede reducir hasta en un 60% los costos de mantenimiento correctivo (Connect, 2025), optimizando los intervalos de intervención según las condiciones reales de operación de cada unidad. Para Concremóvil, esto representa una oportunidad estratégica no solo para minimizar paradas no programadas, sino también para garantizar la entrega oportuna del concreto, producto cuyo

tiempo de vida útil es crítico (aproximadamente 2 horas) y cuya pérdida por fallas logísticas impacta directamente los costos de producción.

Este proyecto propone desarrollar e implementar un modelo predictivo de mantenimiento basado en análisis tribológico para los motores diésel de Concremóvil SAS. La iniciativa busca responder a la pregunta central: ¿Cómo optimizar los programas de mantenimiento mediante el análisis de aceite para reducir costos sin comprometer la vida útil de los equipos? A través de un enfoque metodológico que combina muestreo sistemático, análisis de laboratorio y modelado de tendencias, el estudio pretende establecer frecuencias de mantenimiento personalizadas que maximicen la disponibilidad de la flota mientras se minimizan costos operativos. Los resultados esperados incluyen no solo mejoras cuantificables en los indicadores de confiabilidad (reducción del 23.7% en costos de mantenimiento según la fase piloto), sino también el fortalecimiento de la ventaja competitiva de la empresa en el mercado nacional de construcción.

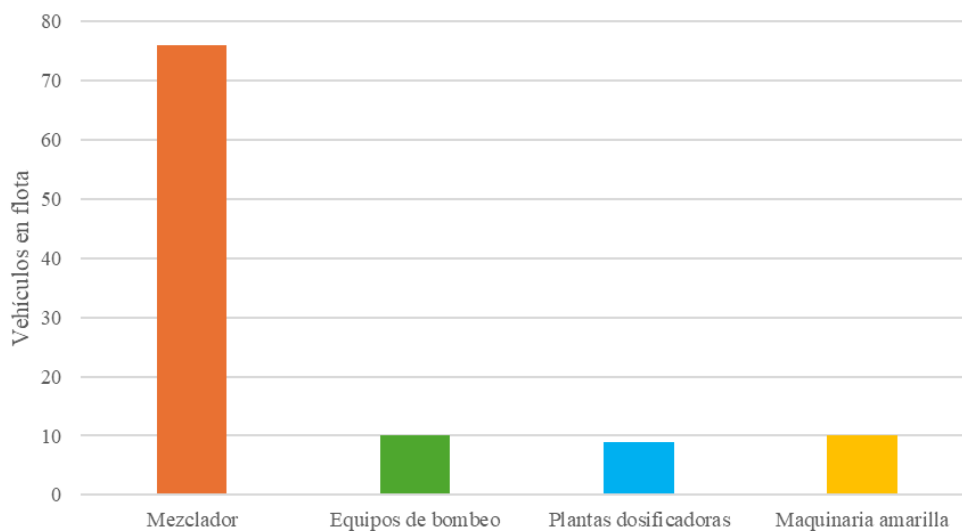
1. Racional y estructura del documento

1.1. Planteamiento del problema

Concremóvil SAS es una empresa colombiana especializada en la producción y transporte de concreto de alta calidad que provee a la industria de la construcción en toda Colombia. Desde el 2005, esta compañía ha incursionado en el sector de la construcción, ofreciendo un portafolio de servicios que varía desde el concreto convencional hasta pisos o pavimentos industriales, llegando a contar con un volumen de producción superior a los 2 millones de metros cúbicos. Como resultado, se ha convertido en una de las empresas líderes del mercado de este producto, llegando a contar con presencia en las principales zonas de influencia del sector, ubicadas en la costa atlántica, Santander y Cundinamarca. Con el fin de proporcionar la entrega segura de sus productos, Concremóvil SAS cuenta con una flota de 105 unidades a la fecha, las cuales se distribuyen según el esquema de la Figura 1.

Figura 1

Distribución de los equipos de flota en Concremóvil S.A.S.



La mayor parte de estas unidades, corresponden a unidades de tipo mezclador, como se muestra en la Figura 2, las cuales se emplean para transportar el concreto hasta las instalaciones del cliente final, manteniendo las condiciones de la mezcla, como su contenido de humedad y propiedades mecánicas, en el rango idóneo para su uso por parte del cliente (Marco, 2019). Para cumplir con este propósito, la flota de vehículos emplea motores de combustión interna, siendo el Diésel el combustible más usual de la operación.

Figura 2

Entrega de concreto de la mezcladora (mixer), con autobomba



Nota. En esta figura se muestra el proceso de entrega del concreto de un mezclador, con servicio de autobomba.

Sin embargo, existe una brecha de conocimiento que afecta al rendimiento de las operaciones de Concremovil SAS, la cual se encuentra relacionada a las frecuencias de mantenimiento de los vehículos en la flota. Aunque existen fabricantes que recomiendan realizar tareas de mantenimiento cada 250 horas de operación (Palmer, 2018), hoy en día Concremovil SAS sigue un esquema empírico para gestionar dichas tareas, basado en experiencia previa del personal de mantenimiento; como resultado, las acciones de mantenimiento preventivo se realizan cada 700 horas de operación.

El enfoque mencionado anteriormente, aunque funcional en términos generales, no considera variables críticas como el desgaste real de los componentes, las condiciones operativas particulares de cada unidad, ni el entorno en el que se desempeñan los vehículos. Es por esta razón que no es inusual la aparición de fallas mecánicas inesperadas, que conducen a paradas no programadas de los equipos, las cuales afectan directamente la confiabilidad del servicio y la eficiencia operativa de Concremóvil SAS, pues puede conducir a la pérdida de contratos, penalizaciones por incumplimiento en tiempos de entrega y deterioro de la reputación de la compañía. A manera de referencia, una parada no programada de un vehículo, puede causar pérdidas de hasta \$43.5 MCOP, los cuales provienen del tiempo que el equipo se encuentra fuera de servicio (que en algunos casos puede ser del orden de semanas), y del concreto no transportado durante la parada.

Lo anterior indica que las consecuencias económicas de este modelo de mantenimiento son significativas. Además de la reducción en disponibilidad de la flota, los costos asociados a reparaciones correctivas suelen ser considerablemente más altos que los de un mantenimiento planificado, ya que implican la sustitución urgente de piezas, mano de obra no programada y, en algunos casos, el uso de servicios externos. Por ende, es necesario establecer una nueva filosofía de mantenimiento que reconcilie la frecuencia requerida de mantenimiento de los equipos, con las condiciones reales de operación de estos, con el fin de reducir al mínimo la ocurrencia de eventos no programados y así garantizar la continuidad de las operaciones de Concremóvil SAS.

Frente a este panorama, el análisis tribológico del aceite lubricante se presenta como una herramienta con alto potencial para transformar el enfoque actual de mantenimiento. Esta técnica permite monitorear en tiempo real el estado de los componentes internos del motor, a través del estudio de partículas metálicas, contaminantes y propiedades fisicoquímicas del lubricante (IK4-

TEKNIKER, 2025), lo que permitiría anticipar fallas, optimizar los intervalos de mantenimiento y extender la vida útil de los equipos, contribuyendo así a una gestión más eficiente y rentable de la flota. De acuerdo con estudios realizados en la literatura, se estima que la implementación de una estrategia de gestión tribológica de mantenimiento de activos tiene el potencial de reducir los costos de mantenimiento correctivo hasta en un 50-60%, debido a la optimización del uso de lubricantes y la disminución de paros no programados (Connect, 2025). Además, permitiría una toma de decisiones más informada, basada en datos objetivos y específicos de cada unidad, lo que fortalecería la planificación logística y aumentaría la competitividad de la empresa en el sector.

Como se mencionó anteriormente, para Concremóvil SAS, asegurar la disponibilidad de su flota es esencial para garantizar la calidad del servicio proporcionado. Por esta razón, se considera que, mediante la implementación de técnicas tribológicas, se podría incrementar la disponibilidad de la flota operativa en Concremóvil SAS, lo que se traduciría en un producto de valor agregado para los valores que representa la compañía. Es por esto que, en el marco de este trabajo, se ha planteado la siguiente pregunta de investigación:

¿Podrá un modelo de mantenimiento predictivo con base en análisis de aceite brindarnos información para poder disminuir costos de mantenimiento sin afectar la vida útil de los equipos?

1.2. Justificación

El desarrollo de este proyecto se encuentra justificado, en primer lugar, en la necesidad actual de Concremóvil SAS de garantizar la disponibilidad de la flota para la entrega del producto al cliente a tiempo, y que no presente retrasos en sus procesos. Debido a que el concreto no permite ser contenido dentro del equipo por tiempos largos. Dado que se requiere garantizar las propiedades mecánicas y químicas del concreto, el diseño de mezcla se realiza para que sea entregado en máximo dos horas, pero en la práctica este tiempo varía mucho por las condiciones del medio ambiente, lo que convierte el proceso de entrega en una actividad de suma importancia: cualquier fallo que se tenga en el proceso de entrega, puede repercutir en la pérdida total del producto, e impacta directamente al costo de producción.

En segundo lugar, se genera un gran impacto a la reducción del costo de mantenimiento, ya que se evitarán fallos imprevistos, permitiendo la intervención del equipo antes de que ocurra la falla, y aumentando la frecuencia de los mantenimientos preventivos; favoreciendo también la disponibilidad. Adicionalmente, la implementación de este proyecto permitirá conocer el estado real de los motores y se tendrán bases confiables para la toma de decisiones en cuanto a la extensión de los periodos de rutinas de mantenimiento preventivo, basado en las condiciones de los equipos y sus correctas intervenciones correctivas de ser necesarias.

1.3. Objetivo General

- Implementar un modelo de mantenimiento predictivo fundamentado en técnicas tribológicas para los motores diésel de la empresa Concremóvil S.A.S

1.4. Objetivos Específicos

- Identificar los parámetros tribológicos establecidos por el fabricante para los motores en la flota de Concremóvil SAS.
- Adquirir muestras de aceites de los motores de Concremóvil SAS, para evaluación de viscosidad, partículas de desgaste y partículas contaminantes
- Desarrollar un modelo de mantenimiento predictivo que, a partir de las características medidas del aceite, permita establecer las frecuencias de intervención en la flota disponible.
- Implementar el modelo de mantenimiento propuesto en la flota de Concremovil SAS a partir de las frecuencias de intervención obtenidas de las muestras de aceites.
- Evaluar el impacto de la implementación del modelo propuesto en costos y en los indicadores de disponibilidad.

1.5. Contenido del documento

El capítulo 1 del documento presenta la justificación y el racional que motivan la realización del proyecto, destacando la importancia de optimizar la gestión del mantenimiento en una flota de vehículos perteneciente a una empresa del sector concreto. Se abordan las limitaciones del enfoque empírico tradicional y se plantea la necesidad de una estrategia basada en el análisis técnico. Además, se formulan los objetivos generales y específicos del trabajo, orientados a mejorar la disponibilidad operativa y reducir los costos por fallas inesperadas mediante el uso de herramientas tribológicas.

En el capítulo 2 se exponen los conceptos teóricos fundamentales que sustentan el proyecto, con énfasis en las distintas estrategias de mantenimiento: preventivo, correctivo, predictivo y proactivo. Se detallan las diferencias entre cada enfoque, su aplicabilidad en entornos industriales y las implicaciones que tiene una mala gestión del mantenimiento en la vida útil de los equipos. También se revisan estudios previos y buenas prácticas asociadas al monitoreo de condiciones mediante análisis de lubricantes.

El capítulo 3 describe la metodología adoptada para la implementación de la herramienta tribológica en el mantenimiento preventivo de la flota. Se explica el proceso de toma de muestras de aceite, así como la frecuencia de análisis y las herramientas tecnológicas utilizadas para interpretar los resultados. Esta sección también incluye la planificación del trabajo de campo y los criterios de intervención definidos a partir del diagnóstico tribológico.

Finalmente, el capítulo 4 presenta los resultados obtenidos tras aplicar la metodología propuesta y su correspondiente análisis. Además, se discuten los aprendizajes derivados de la implementación y se proponen recomendaciones para consolidar el uso de herramientas tribológicas como parte integral del sistema de mantenimiento de la empresa.

2. Marco teórico

2.1. Mantenimiento preventivo y correctivo

El mantenimiento industrial es un componente crítico para garantizar la confiabilidad de los equipos y minimizar costos operativos. De acuerdo con el International Journal of Prognostics and Health Management las empresas que implementan estrategias de mantenimiento adecuadas pueden reducir sus costos de operación hasta en un 30% y aumentar la disponibilidad de equipos en un 25% (Arena et al., 2021; Thomas & Weiss, 2021). Esto adquiere mayor valor en entornos operativos exigentes, como el transporte de concreto premezclado, donde los vehículos están sometidos a condiciones variables de carga, terreno y clima, la adopción de estrategias adaptativas y basadas en el estado real de los equipos se vuelve fundamental para garantizar la continuidad del servicio y minimizar los riesgos de fallas inesperadas.

De forma general, el mantenimiento abarca dos enfoques tradicionales, a saber:

- **El mantenimiento correctivo**, el cual se ejecuta una vez que ocurre una falla.

Aunque puede ser inevitable en ciertos casos, su uso como estrategia principal suele causar tiempos de inactividad prolongados y afectaciones a la planificación operativa.

- **El mantenimiento preventivo**, el cual se realiza previo a la materialización de un evento de falla, y se basa en la programación de intervenciones a intervalos regulares de tiempo o uso (por ejemplo, cada cierta cantidad de horas de operación).

Hoy en día, los enfoques tradicionales de mantenimiento presentan limitaciones significativas en entornos industriales modernos: el mantenimiento preventivo, basado en intervalos fijos, suele generar costos innecesarios por reemplazo anticipado de componentes que aún tenían vida útil remanente (fenómeno conocido como sobre-mantenimiento), mientras que el

mantenimiento correctivo, al actuar solo tras la falla, conlleva paradas no planificadas que pueden costar hasta \$500,000 diarios en equipos críticos (Evocon Team, 2023). Aplicado al contexto del mantenimiento de motores, ambos métodos carecen de adaptabilidad a las condiciones reales de operación: el primero ignora variables como carga térmica o contaminación, y el segundo reacciona tardíamente, cuando el daño ya ha comprometido otros sistemas. Un análisis de McKinsey en 2022, reveló que el 42% de las intervenciones preventivas en flotas diésel eran innecesarias, mientras que el 60% de las fallas repentinas en motores ocurrían antes de los intervalos programados (Stern et al., 2020).

Debido a estas limitaciones, en años recientes el mantenimiento predictivo ha surgido como una solución que, basada en la condición actual del activo de interés, permiten planificar de manera más eficiente las acciones de mantenimiento, al implementar estrategias que permiten anticipar la aparición de fallos en los equipos con una alta precisión.

2.2. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo (también conocido como mantenimiento basado en condición), emerge como solución al integrar tecnologías y análisis tribológico para optimizar decisiones. Al monitorear variables clave (viscosidad, metales de desgaste, contaminantes) en tiempo real, este enfoque reduce costos operativos en 20-30% y aumenta la disponibilidad de equipos al anticipar fallos con 95% de precisión (PwC Belgium, 2023). Este enfoque comenzó a desarrollarse en la industria entre mediados de los años 80 y 90 del siglo XX. En la actualidad, esta filosofía se aplica principalmente a equipos críticos en plantas que han implementado estrategias avanzadas de gestión de activos, mediante herramientas como el CMMS (Computerized Maintenance Management Systems), las cuales ayudan a planificar, rastrear y optimizar las actividades de mantenimiento.

La transición observada en años recientes de los enfoques tradicionales de mantenimiento hacia el mantenimiento basado en condición ha sido posible con el desarrollo e integración de sensórica que monitorea en tiempo real las condiciones de los equipos, como se muestra en la Figura 3. Con la convergencia de tecnologías digitales, las empresas han logrado reducir sus costos de operación hasta en un 40% y disminuir las fallas no planificadas en un 70%, superando ampliamente los resultados de los esquemas tradicionales basados en intervalos fijos (Behrendt et al., 2021). La clave reside en la capacidad de estos sistemas para procesar flujos masivos de datos operacionales, identificando patrones que escapan a los análisis convencionales.

Figura 3

Medición en sitio de las condiciones de un motor diésel para carga pesada.



2.3. Mantenimiento predictivo a partir de tribología

La tribología es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación de los componentes mecánicos en movimiento. En el contexto del mantenimiento predictivo, el análisis tribológico del aceite lubricante se ha consolidado como una herramienta eficaz para diagnosticar el estado interno de los motores sin necesidad de desmontarlos. Este análisis permite detectar partículas metálicas producto del desgaste, contaminantes como agua o combustible, y variaciones en las propiedades fisicoquímicas del lubricante, como la viscosidad, la acidez o la presencia de aditivos degradados.

Según investigaciones publicadas en la literatura (Agocs et al., 2021; Al Sheikh Omar et al., 2021; Duran et al., 2024; Pan et al., 2023; Wolak & Zajac, 2018), el monitoreo de estos parámetros permite establecer correlaciones directas entre el comportamiento del lubricante y el desgaste de componentes críticos, como cojinetes, cilindros y ejes. A partir de esta información, es posible identificar patrones de deterioro, anticipar fallas potenciales y tomar decisiones informadas sobre el momento óptimo para realizar intervenciones de mantenimiento.

La implementación de esta técnica en flotas vehiculares pesadas ofrece ventajas significativas, como la reducción de paradas no programadas, la extensión de la vida útil de los componentes, la mejora en la planificación logística y la disminución de los costos operativos asociados a fallas imprevistas. Investigaciones han demostrado que esta aproximación puede extender la vida útil del aceite hasta un 30% adicional en motores diésel pesados, mientras detecta anomalías como dilución de combustible con un 92% de precisión antes de que alcancen niveles críticos (Adesoji et al., 2024; Mohapatra et al., 2023). Además, la digitalización de estos procesos mediante plataformas en la nube facilita la toma de decisiones predictivas en flotas

distribuidas geográficamente, creando ecosistemas de mantenimiento conectados y autónomos que representan el futuro de la gestión de activos industriales.

2.3.1. Análisis de aceites lubricantes

El análisis de lubricantes constituye una metodología esencial para evaluar las condiciones operativas de motores y equipos industriales, sirviendo como piedra angular en estrategias de mantenimiento predictivo. Esta técnica diagnostica el estado del aceite mediante la identificación temprana de contaminantes y partículas de desgaste, previniendo fallos mayores y optimizando los costos de mantenimiento.

La fase inicial del proceso - la recolección de muestras - requiere especial atención técnica. Las muestras deben obtenerse durante la operación normal del equipo, utilizando protocolos estandarizados y materiales adecuados para garantizar su representatividad. Este cuidado meticuloso en la etapa de muestreo es determinante para la precisión de los resultados posteriores.

Los análisis se realizan en laboratorios acreditados que aplican diversos métodos de evaluación, desde pruebas físico-químicas hasta espectroscopía avanzada. Estos exámenes permiten caracterizar tanto el estado del lubricante como las condiciones mecánicas del equipo, proporcionando datos valiosos para la gestión proactiva del mantenimiento (Adesoji et al., 2024).

De forma general, un análisis de aceites incluye el desarrollo de las siguientes pruebas:

- **Viscosidad:** Mide la resistencia del aceite a fluir, la viscosidad adecuada es crucial para la lubricación efectiva de los componentes. Cambios en la viscosidad pueden indicar contaminación o degradación del aceite.

- **Espectrometría de Emisión Atómica:** Analiza la composición química del aceite, detecta la presencia de metales de desgaste, aditivos y contaminantes. Esto ayuda a identificar el desgaste de componentes y la contaminación por partículas externas.
- **Análisis de Partículas (Ferrograma):** Examina las partículas metálicas presentes en el aceite, permite evaluar el tipo y la cantidad de desgaste en los componentes mecánicos. Las partículas grandes pueden indicar un desgaste severo.
- **Prueba de Agua (Karl Fischer):** Mide el contenido de agua en el aceite, la presencia de agua puede causar corrosión y degradación del aceite, afectando la lubricación y la vida útil de los componentes.
- **Análisis de Contaminantes:** Identifica contaminantes como polvo, suciedad y otros materiales extraños., la contaminación puede acelerar el desgaste de los componentes y reducir la eficiencia del aceite.
- **Prueba de Acidez (Número de Acidez Total - TAN):** Mide la acidez del aceite, un aumento en la acidez puede indicar oxidación del aceite y la presencia de productos de degradación, lo que puede afectar la lubricación y causar corrosión.
- **Prueba de Oxidación:** Evalúa el grado de oxidación del aceite, la oxidación puede llevar a la formación de lodos y barnices que afectan el rendimiento del aceite y la protección de los componentes.
- **Prueba de Espuma:** Mide la tendencia del aceite a formar espuma, la formación de espuma puede reducir la capacidad de lubricación y causar problemas en los sistemas hidráulicos y de transmisión.

Como resultado de estas pruebas, se obtienen reportes que listan los resultados más relevantes de los equipos, como se muestra en la Figura 4. Estos resultados comprenden, mas no se limitan, a las siguientes variables tribológicas:

Figura 4

Análisis de laboratorio aceite de motor diésel

Tipo de filtro: Informacion solicitada Indice de Micrón: 0		Fabricante del Producto: SHELL Nombre del Producto: RIMULA R4 L Grado de Viscosidad: SAE 15W40																						
Comentarios		Chequear la fuente de fuga del combustible (inyectores, líneas etc.). El combustible se encuentra en un NIVEL SEVERO; DILUCION POR COMBUSTIBLE ha ocasionado que la viscosidad disminuya SEVERAMENTE; La DILUCIÓN DEL COMBUSTIBLE reduce el aceite del motor. Como consecuencia, se produce una REDUCCIÓN en la LUBRICIDAD y la SOLIDEZ DE LA PELÍCULA, lo cual podría causar un incremento de desgaste; El resultado infrarrojo indica que la OXIDACIÓN se encuentra en un nivel MENOR. Sugerimos supervisar el intervalo de drenaje y la temperatura de funcionamiento; El PLOMO se encuentra en un NIVEL MENOR y puede ser METAL DE REVESTIMIENTO de LOS COJINETES PRINCIPALES/DE BIELA; Se reconoció el cambio de filtro y lubricante; Remuestre a la mitad de tiempo del intervalo de cambio;																						
Muestra #	Metales de Desgaste (ppm)										Metales Contaminantes		Fuente de Varios Metales (ppm)				Metales Aditivos (ppm)							
	Hierro	Cromo	Niquel	Aluminio	Cobre	Plomo	Estaño	Cadmio	Plata	Vanadio	Silice	Sodio	Potasio	Titanio	Molibdeno	Antimonio	Manganeso	Litio	Boro	Magnesio	Calcio	Bario	Fósforo	Zinc
1	28	1	1	4	5	2	1	0	0	0	7	3	0	0	48	0	0	0	93	910	1064	1	1095	1265
2	11	0	0	4	2	0	0	0	0	0	4	1	1	0	40	1	0	0	34	519	1471	0	845	876
3	17	1	1	2	2	5	1	0	0	0	5	4	2	0	43	0	0	0	39	293	1355	1	741	881
Muestra #	Información de muestra							Contaminantes			Propiedades de líquido													
	Fecha de toma	Fecha de recibo	Tiempo de Aceite h	Tiempo de unidad h	Cambio de Aceite galón	Aceite Agregado	Cambio de Filtro	Dilución de Combustible %	Hollín %	Agua %	Viscosidad 40 ° C cSt	Viscosidad 100 ° C cSt	Número de Acido mg KOH / g	No. Básico D4739 mg KOH / g	Oxidación abs / cm	Nitración abs / 0.1mm								
1	06-sep-2022	29-sep-2022	2000	16294	Sí	0	Sí	<2 - Estimado	0.7 - E2412	<.1 - FTIR		13.2			34	10								
2	22-ene-2023	31-ene-2023	700	11295	Sí	0	Sí	<2 - Estimado	1.0 - E2412	<.1 - FTIR		13.3			17	7								
3	14-may-2023	29-may-2023	808	18103	Sí	0	Sí	>10 - GC	0.8 - E2412	<.1 - FTIR		8.0			21	8								
Muestra #	Cuento de Particulas (particulas/mL)										Análisis Adicionales													
	Código ISO	> 4	> 6	> 10	> 14	> 21	> 38	> 70	> 100	Método de prueba														
1	Basado en 4/6/14	(particula s / mL)	(particula s / mL)	(particula s / mL)	(particula s / mL)	(particula s / mL)	(particula s / mL)	(particula s / mL)	(particula s / mL)															

Nota: Esta imagen nos muestra los resultados de varias muestras de aceite en un motor diésel Cumins ISL.

- Indicadores de contaminación y degradación, como dilución de combustible (%), hollín (%), agua (%), oxidación (abs/cm), nitración (abs/0.1mm)

- Propiedades físicoquímicas, como la viscosidad a 40°C y 100°C (en cSt), su número básico (BN) (mg KOH/g) y número ácido (mg KOH/g)
- Concentraciones (en ppm) de metales de desgaste, como cromo (Cr), níquel (Ni), aluminio (Al), cobre (Cu), plomo (Pb), cadmio (Cd), plata (Ag), vanadio (V), silicio (Si), sodio (Na), potasio (K), titanio (Ti), molibdeno (Mo), antimonio (Sb), manganeso (Mn), litio (Li), boro (B), magnesio (Mg), calcio (Ca), bario (Ba), estaño (Sn), zinc (Zn)

En el caso de la Figura 4, el reporte demuestra la presencia de contaminación por la dilución de ACPM en el aceite, probablemente por falla en los componentes de inyección, que implica una disminución en la viscosidad del lubricante y hace que se aumente el desgaste de los componentes internos.

3. Modelo de mantenimiento predictivo fundamentado en técnicas tribológicas

El presente trabajo se considera como un estudio de corte teórico-experimental, orientado a validar la pregunta de investigación establecida en el capítulo 1. Para lograr esta validación, al igual que la consecución de los objetivos específicos del proyecto, el desarrollo del modelo de mantenimiento predictivo se ha dividido en una serie de fases metodológicas, las cuales se indican a continuación.

3.1. Selección de muestra de estudio y análisis de aceite

Como parte de la metodología del presente proyecto, se seleccionó una muestra de la flota total de Concremóvil, que a la fecha consiste en 105 vehículos, como se indicó en el capítulo 1. Esta selección se hizo en compañía del personal operativo de Concremóvil, buscando un compromiso entre representatividad estadística con viabilidad operativa. Basados en este criterio, se escogieron cuatro unidades que representan la mayoría de la población de activos de la compañía. Esta muestra incluye:

- Dos mixers (mezcladoras) con motores ISM International, correspondientes a las unidades ERK-987 y ERL-047, que representan unidades con uso intensivo en operaciones de concreto.
- Un mixer con motor ISM Kenworth, correspondiente a la unidad WFD-485, utilizado en operaciones de alto rendimiento.
- Un generador Caterpillar, correspondiente a la unidad SR-500, que hace parte de las unidades que operan en condiciones de funcionamiento sostenido.

Estas unidades cuentan con tiempos de servicio superiores a las 15000 horas, por lo que su selección permitió capturar las variaciones propias de diferentes configuraciones mecánicas y

patrones de uso, siguiendo las recomendaciones de ASTM D4057 para muestreo representativo en equipos industriales (ASTM International, 2022).

El protocolo de muestreo implementado consideró tanto las especificaciones técnicas de los fabricantes como los estándares internacionales para análisis de aceites. Previo a la toma de muestras, se coordinó con los operadores para realizar el procedimiento durante ventanas de mantenimiento programado, minimizando así el impacto en la productividad operacional. Un aspecto crítico fue asegurar que los motores estuvieran en condiciones operativas estables, por lo que se mantuvieron funcionando durante al menos 15 minutos antes del muestreo para garantizar la homogeneización del aceite, tal como lo recomiendan los manuales técnicos de Caterpillar (Caterpillar Inc., 2023)

La toma de muestras se realizó de forma diferente para cada equipo. De este modo, para los mixers International y Kenworth, el punto de muestreo seleccionado fue la válvula de purga en la línea de presión de aceite (como se muestra de manera ilustrativa en la Figura 5) , utilizando el método de vacío con botellas esterilizadas para prevenir contaminación cruzada. Por otro lado, en el caso del generador Caterpillar, se empleó el puerto dedicado en el cárter con una jeringa de muestreo especializada. Cada muestra fue meticulosamente etiquetada con información clave como código del equipo, horas de servicio exactas (registradas con dispositivos digitales), fecha y condiciones ambientales durante el muestreo, creando así un registro completo y trazable para la formulación del modelo, el cual incluyó datos históricos de análisis de aceite de los últimos 2 años de operación de los equipos. Esta integración de datos históricos con muestras actuales sigue la metodología propuesta por (Toms et al., 2008), que destaca la importancia de los registros cronológicos para identificar tendencias de degradación.

Figura 5

Toma de muestras de aceite en motores de mixer.



Como resultado de esta intervención, se obtuvieron alrededor de 33 puntos de datos, los cuales se muestran parcialmente en la Tabla 1. El listado completo de datos medidos, se encuentra disponible en el apéndice A.

Tabla 1

Datos experimentales obtenidos para la muestra de estudio

Motor ISM International (ERK-987)					
Muestra #	Fecha de toma	Tiempo de Aceite (h)	Tiempo de unidad (h)	Dilución de Combustible (%)	Viscosidad 100 °C (cSt)
1	29/08/2022	522	11,312	2.1	12.7
2	22/01/2023	700	12,555	2.2	12.7
3	14/05/2023	931	13,486	2.8	12.6
4	5/09/2023	1002	14,488	2.1	12.4
5	17/12/2023	869	15,357	2	12.6

6	20/04/2024	969	16,326	2.4	12.7
7	20/07/2024	645	16971	10	8.1
8	15/12/2024	1077	18048	1.8	12.9
Motor ISM International (ERL-047)					
Muestra #	Fecha de toma	Tiempo de Aceite (h)	Tiempo de Unidad (h)	Dilución de Combustible (%)	Viscosidad 100°C (cSt)
1	15/02/2023	700	12163	2.1	12.5
2	4/06/2023	871	13034	2.6	12.5
3	17/09/2023	911	13945	2.1	12.5
4	6/10/2024	961	16669	2.5	12.9
5	9/03/2025	1095	17764	2	13.3
Generador Caterpillar (SR-500)					
Muestra #	Fecha de toma	Tiempo de Aceite (h)	Tiempo de unidad (h)	Dilución de Combustible (%)	Viscosidad 100 °C (cSt)
4	7/07/2022	636	9320	2	14.1
5	8/07/2022	636	9320	2	14.2
6	20/08/2022	455	9775	2	14.3
7	26/10/2022	830	10605	2	13.4
8	18/12/2022	667	11272	2	13.4
9	27/02/2023	860	12132	5.4	12.7
10	23/04/2023	624	12756	7.7	11.5
11	20/05/2023	317	13073	9.3	10.5
12	13/06/2023	249	13322	8.1	10.6
13	14/07/2023	384	13706	8.2	10.5
14	13/08/2023	357	14063	10	9.2
15	1/10/2023	608	14671	1.4	13.2
16	5/11/2023	438	15109	2	14.1
17	17/12/2023	466	15575	2	15
18	7/04/2024	568	16597	2	14.4
Motor ISM Kenworth (WFD-485)					
Muestra #	Fecha de toma	Tiempo de Aceite (h)	Tiempo de unidad (h)	Dilución de Combustible (%)	Viscosidad 100 °C (cSt)
1	9/02/2023	700	14759	2	13.3
2	3/06/2023	852	15611	2.6	11.6
3	14/01/2024	834	17321	2.2	12.4
4	19/05/2024	841	18162	2.5	12.3
5	13/10/2024	869	19031	1.8	13

3.2. Formulación del modelo predictivo basado en técnicas tribológicas

Aunque los fabricantes de motores y las normas internacionales (como ASTM D4378 o ISO 4406) establecen un conjunto amplio de variables tribológicas para evaluar la condición del aceite lubricante, la relevancia de cada parámetro puede variar significativamente según las características operativas del equipo. Factores como el régimen de carga, las condiciones ambientales, el tipo de combustible y los hábitos de conducción influyen en la tasa de degradación del lubricante, lo que hace necesario adaptar los modelos de mantenimiento predictivo a cada contexto específico (Jardine et al., 2006).

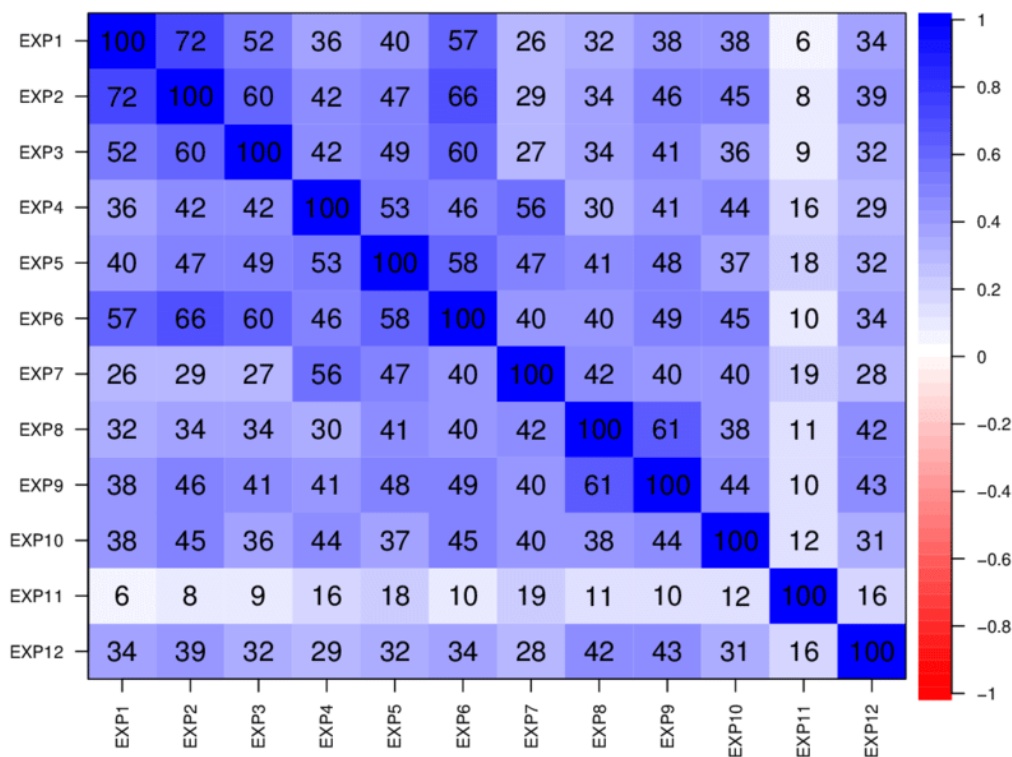
Con este fin, el modelo de mantenimiento predictivo basado en técnicas tribológicas se encuentra orientado:

- a) Definir las variables con potencial influencia sobre la necesidad de mantenimiento del aceite,
- b) Establecer un análisis exploratorio de los datos, orientado a definir relaciones entre las variables identificadas, y
- c) Estimar el momento óptimo de intervención de mantenimiento preventivo en función del comportamiento de las variables tribológicas con mayor influencia.

Con este fin en mente, el proceso de identificación de variables con potencial influencia en la degradación del aceite se fundamenta en un análisis cuantitativo de interdependencias. Para ello, se emplea una matriz de correlación, construida utilizando el coeficiente de Pearson y similar a la presentada en la Figura 6 para evaluar sistemáticamente las relaciones lineales entre las variables tribológicas medidas. Siguiendo las recomendaciones de (Hauke & Kossowski, 2011), es factible descartar aquellas variables con una correlación superior a 0.7, dado que no aportan más información del fenómeno que se desea evaluar.

Figura 6

Matriz de correlación de Pearson entre parejas de variables experimentales.



Una vez identificadas las variables con mayor relevancia estadística para el análisis, la fase exploratoria se apoyó en técnicas gráficas avanzadas, como diagramas de dispersión y líneas de tendencia, para visualizar relaciones lineales entre variables y horas de servicio, complementando el análisis de correlación. De esta forma, este método permite identificar puntos de cambio en las variables tribológicas del aceite, valores atípicos que podrían indicar condiciones anómalas, o agrupamientos naturales en los datos, mientras que las líneas de tendencia se emplean para caracterizar esta evolución temporal, empleando una aproximación lineal en los datos.

A partir del análisis exploratorio de datos, se identificaron tendencias consistentes en la evolución de parámetros tribológicos en el aceite lubricante de los motores monitoreados, las cuales fueron validadas con los límites técnicos establecidos por la normativa o por el fabricante. De este modo, se estableció establecer un límite conservador en el cual los aceites aún se encuentran en sus parámetros aceptables, pero suficientemente cercanos a sus umbrales como para justificar acciones preventivas. Al ser un modelo basado en datos, este no es un modelo predictivo estadísticamente generalizable (por ejemplo, con un intervalo de confianza formal), sino una primera aproximación para obtener una estimación práctica inicial con el fin de orientar decisiones de mantenimiento, las cuales se validaron mediante la observación de las variables tribológicas una vez implementado esta nueva frecuencia de mantenimiento. Este enfoque exploratorio también sirve como base para una futura ampliación del modelo, a medida que se incorporen más muestras y vehículos a la base de datos.

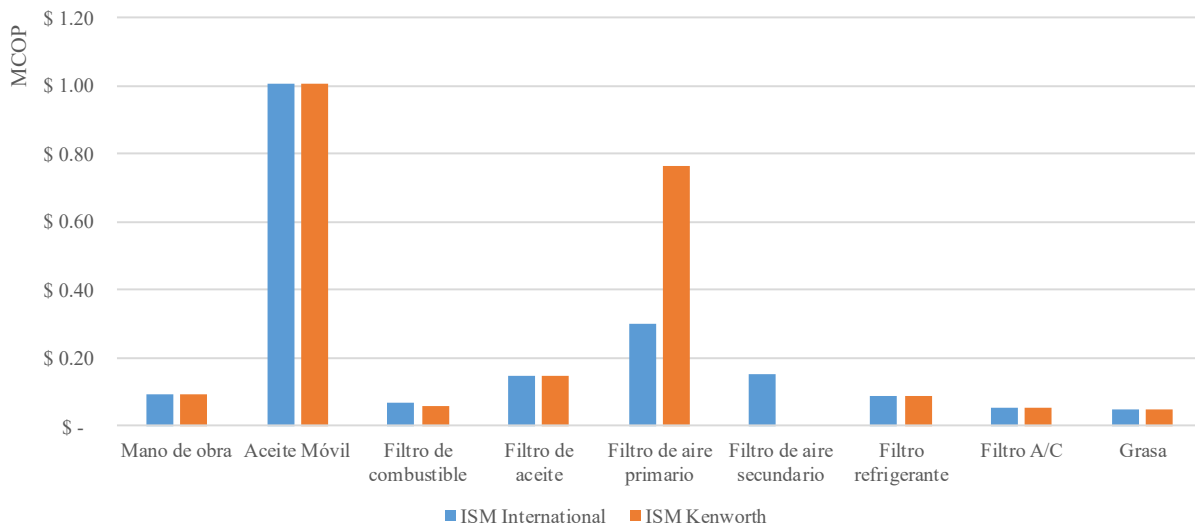
4. Resultados de implementación del modelo basado en técnicas tribológicas

4.1. Construcción de línea base de operación

A partir de los datos proporcionados por Concremóvil SAS, se estableció la línea base de la operación actual del mantenimiento de su flota. Mientras que en secciones anteriores se estableció que la frecuencia actual de mantenimiento corresponde a 700 horas, los costos asociados a tareas de mantenimiento varían en función del motor utilizado, siguiendo el esquema indicado en la Figura 7. De esta figura se evidencia que los mayores costos de las tareas de mantenimiento se encuentran en el aceite, el cual puede llegar a representar hasta el 51% de los costos totales de mantenimiento, y en el cambio de los filtros de aire, los cuales representan alrededor del 40% del total.

Figura 7

Distribución de costos de mantenimiento para la flota de Concremóvil (línea base)



A partir de la Figura 7, se observa además que los costos totales de esta labor representan alrededor de \$ 1.9 MCOP para los motores ISM International (como las unidades ERK-987 y ERL-047), y \$ 2.3 MCOP para los motores ISM Kenworth (como el motor WFD-485). Teniendo

en cuenta las frecuencias de mantenimiento establecidas anteriormente, estos valores equivalen a tarifas de \$ 2794 y \$ 2759 COP por hora de servicio de cada tipo de motor, respectivamente.

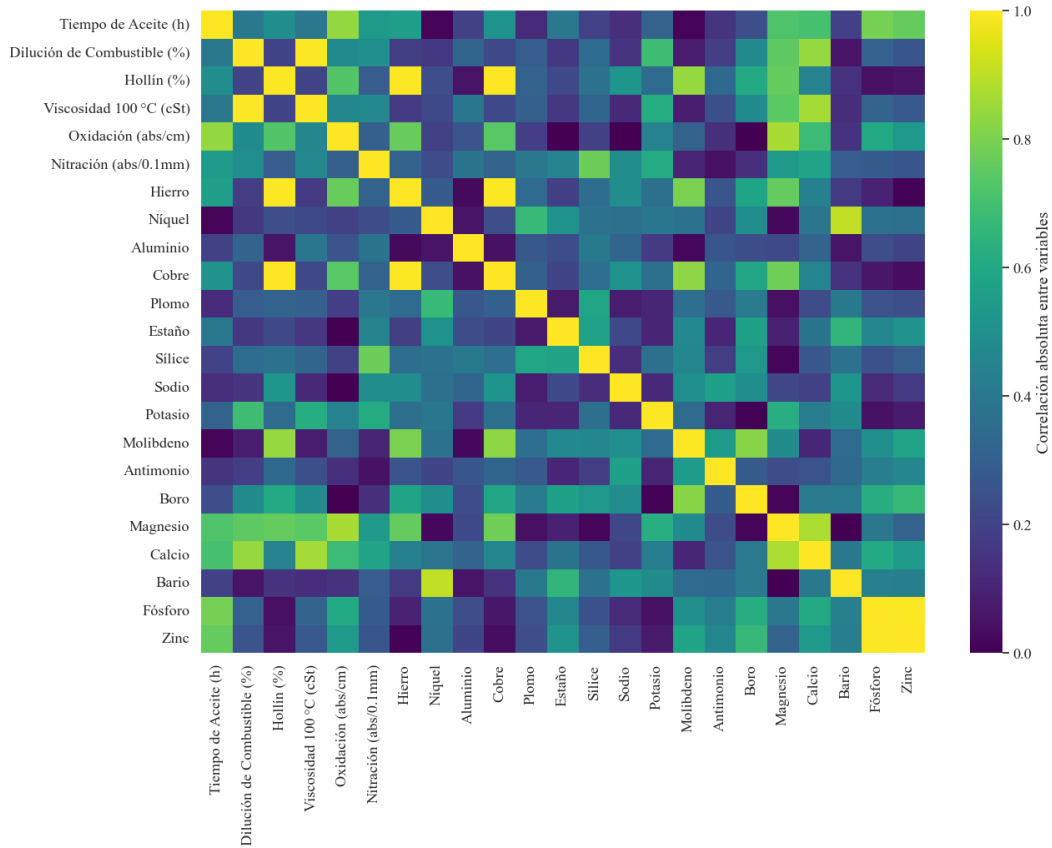
Estos son los valores que se emplearon para validar la implementación de la metodología propuesta en el presente trabajo.

4.2. Selección de variables tribológicas para el modelo

Una vez definida la línea base de la operación de Concremóvil SAS, se definieron los parámetros tribológicos a emplear la definición de las frecuencias de intervención de los motores Diésel empleados en la compañía. Dado que se cuenta con diferentes tamaños de muestra para cada vehículo analizado, se determinaron matrices de correlación individuales para cada uno de ellos. De este modo, la matriz de la Figura 8 muestra los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos para el mixer International ERK-987.

Figura 8

Matriz de correlación para Mixer Internacional ERK-987.



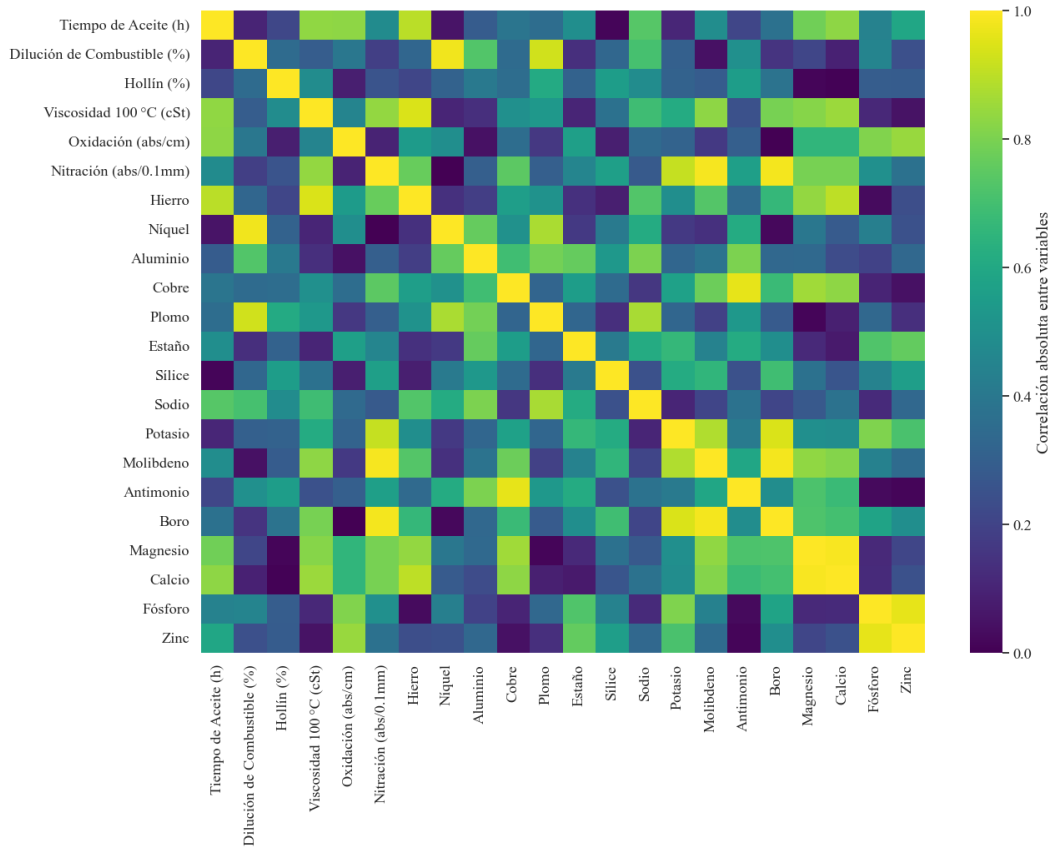
A partir de esta matriz, se evidencia una fuerte correlación entre elementos típicamente asociados a los paquetes de aditivos del lubricante, como el calcio, magnesio, bario, zinc y fósforo, al igual que entre parámetros como la oxidación, la nitración y el tiempo de uso del aceite, lo que indica la existencia de relaciones entre sus variables tribológicas y el tiempo de servicio de la unidad. Por otro lado, algunos metales provenientes del desgaste de componentes mecánicos, como el hierro, níquel, cobre, aluminio y plomo, muestran correlaciones entre sí, lo que sugiere la existencia de patrones de desgaste generalizado o fallas simultáneas en distintos componentes del sistema lubricado, posiblemente asociadas a condiciones severas de operación o pérdida de eficacia del lubricante. Finalmente, los contaminantes externos como sílice, sodio y

potasio, al igual que aditivos como molibdeno, boro y antimonio, muestran baja o escasa correlación con otras variables, debido a su baja detectabilidad tras la degradación del aceite (Toms et al., 2008).

Por otro lado, la matriz de correlación para el mixer International ERL-047, se muestra en la Figura 9. Al igual que en la primera matriz, se observa una fuerte correlación entre calcio, fósforo, zinc, magnesio y bario, elementos comúnmente presentes en paquetes de aditivos detergentes, antidesgaste y antioxidantes, lo que sugiere que estos elementos se comportan de manera conjunta, ya sea por estar formulados así en el aceite base o por presentar un patrón de consumo o degradación asociado al tiempo de uso. Sin embargo, las relaciones entre viscosidad, oxidación y nitración son menos consistentes, lo que podría indicar mayor variabilidad en las condiciones operativas o en el tipo de aceite, aunque se mantiene la independencia de los contaminantes externos. Adicionalmente, se observa cierta correlación en metales de desgaste como plomo y estaño, los cuales podrían provenir de cojinetes (Gołębiowski et al., 2024).

Figura 9

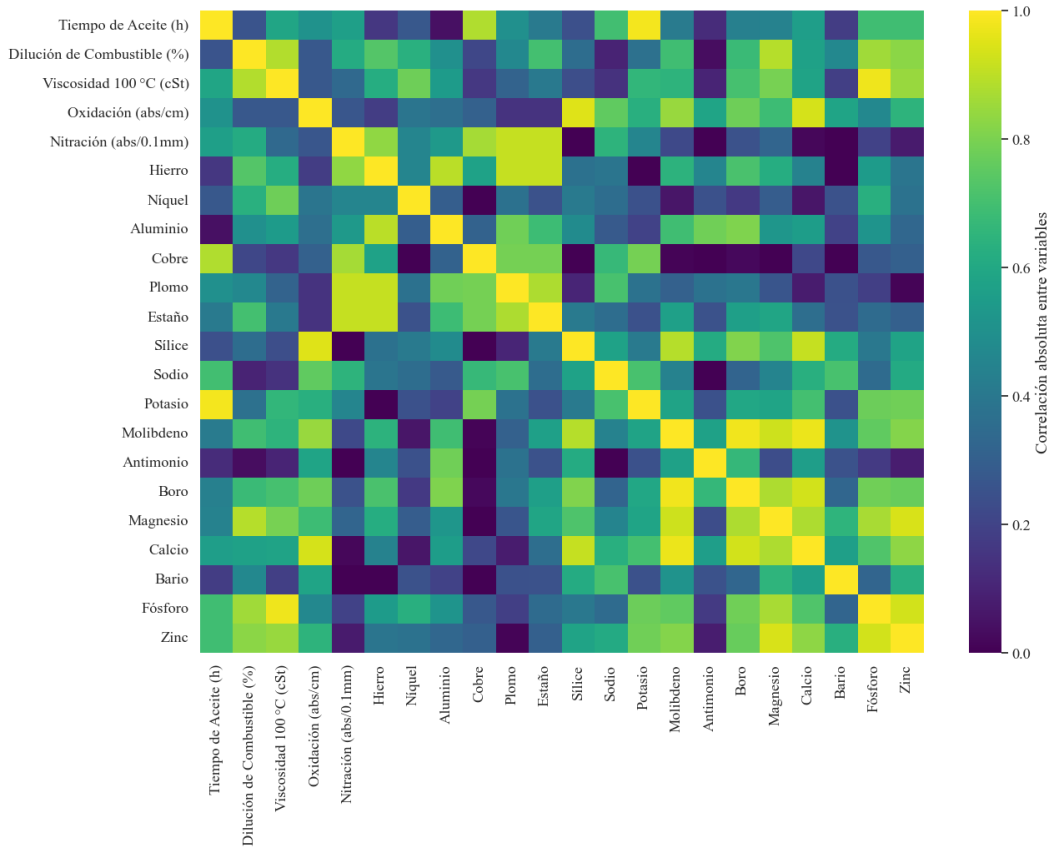
Matriz de correlación para Mixer Internacional ERL-047.



Mientras que las matrices observadas hasta el momento mantienen cierta estructura correlacional, la matriz de correlación para la mixer Kenworth WFD-485, mostrada en la Figura 10, refleja un sistema con alta variabilidad y baja estructura correlacional, dado que la viscosidad muestra correlaciones débiles con oxidación y nitración, y no se observan agrupamientos entre metales de desgaste, a pesar de que aditivos como cobre fósforo, zinc, calcio y magnesio siguen mostrando relaciones moderadas a fuertes. Por otro lado, esta variabilidad se observa también en aditivos como molibdeno, antimonio y boro, los cuales no presentan correlaciones significativas entre sí.

Figura 10

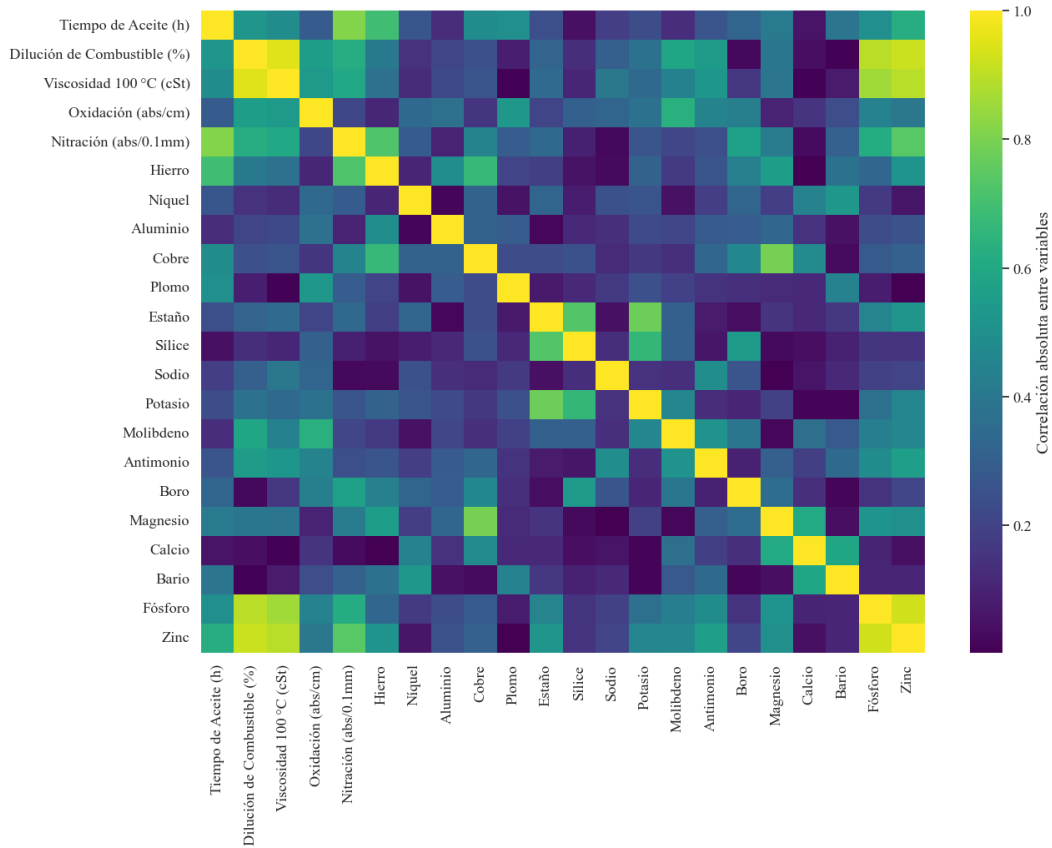
Matriz de correlación para Mixer Kenworth WFD-485.



A diferencia de los casos anteriores, la matriz del generador Caterpillar SR-500, mostrada en la Figura 11, muestra una mayor heterogeneidad entre las variables, dado que se mantiene una fuerte correlación entre elementos como el fósforo, zinc y calcio, pero las relaciones entre oxidación y nitración con otras variables se debilitan, dificultando el seguimiento del envejecimiento del aceite. En la misma medida, las correlaciones entre metales de desgaste son bajas o inconsistentes, sugiriendo condiciones de desgaste más específicas o casos individuales. Esto es coherente con el comportamiento observado en el equipo, el cual, aunque consta con un motor Diésel para generar energía, su frecuencia de uso como equipo estático es considerablemente diferente a la observada en los motores disponibles en los mixer.

Figura 11

Matriz de correlación para Generador Caterpillar SR-500.



A partir de los resultados de la matriz de correlación, se definen las variables tribológicas que explican el comportamiento experimental observado en las muestras, las cuales, como se mencionó en el capítulo 3, corresponden a aquellas cuyo coeficiente absoluto de correlación de Pearson es superior a 0.7. De esta forma, se reduce las variables tribológicas a estudiar en cada caso, al conjunto establecido en la Tabla 2.

Tabla 2

Variables tribológicas preservadas para cada motor analizado.

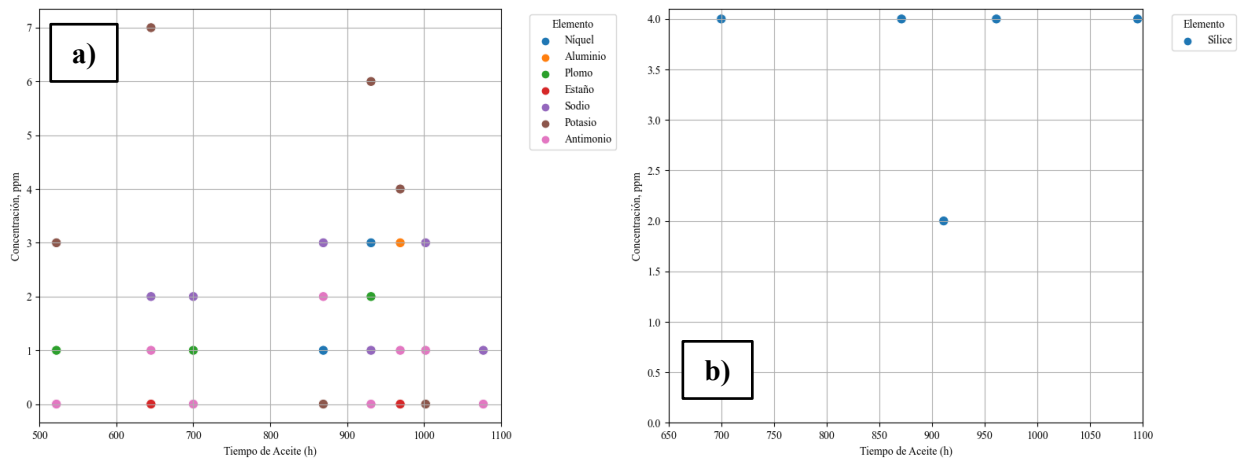
Mixer Internacional ERK-987	Mixer Internacional ERL-047	Mixer Kenworth WFD- 485	Gen. Caterpillar SR-500
Tiempo de aceite (h)	Tiempo de aceite (h)	Tiempo de aceite (h)	Tiempo de aceite (h)
Dilución de combustible (%)	Dilución de combustible (%)	Dilución de combustible (%)	Dilución de combustible (%)
Hollín (%)	Hollín (%)	Oxidación (abs/cm)	Oxidación (abs/cm)
Nitración (abs/0.1 mm)	Sílice	Nitración (abs/0.1 mm)	Níquel
Níquel			AluminioCobre
Aluminio			Plomo
Plomo			Estaño
Estaño			Sodio
Sodio			Molibdeno
Potasio			Antimonio
Antimonio			Boro
			Calcio
			Bario

4.3. Implementación del modelo predictivo a partir de variables tribológicas

Una vez definidas las variables tribológicas de interés, se implementó un análisis de tendencias a partir de las muestras obtenidas en campo. Con este fin, la Figura 12 describe el comportamiento de la concentración de aditivos y otros componentes en función del tiempo de uso del aceite, observada para los mixer ERK-987 y ERL-047.

Figura 12

Concentración de metales y contaminantes para los motores de mixer International ERK-987 (a) y ERL-047 (b)



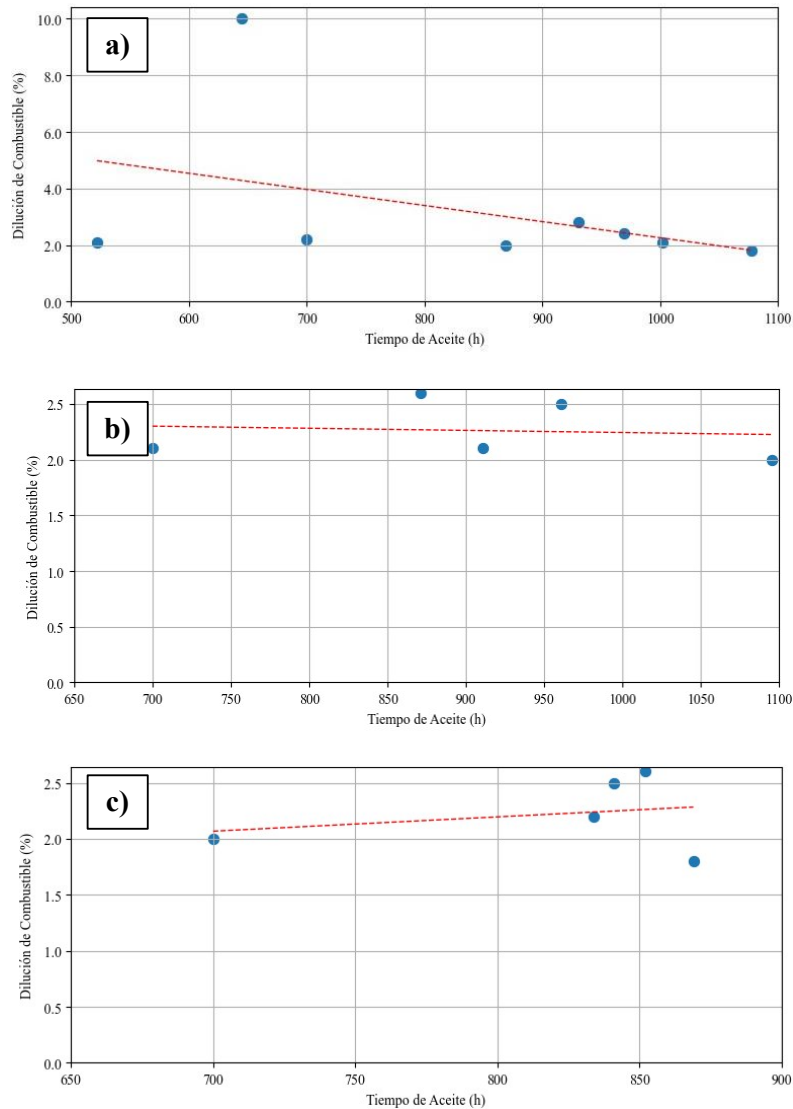
A partir de la figura anterior, se observa la ausencia de una tendencia clara de la concentración de estos componentes, dado que para el motor ERK-987, la mayoría de los elementos fluctúan en rangos bajos (entre 0 y 3 ppm) incluso más allá de las 700 horas actuales de intervención, como se muestra en la Figura 12a. En la misma medida, el contenido de sílice en el motor ERL-047 se mantiene estable en 4 ppm, con una única disminución a 2 ppm alrededor de las 900 horas. La única excepción a este comportamiento consiste en el potasio, el cual alcanza valores de hasta 7 ppm cerca de las 600 y 950 horas, lo que puede indicar un evento aislado de contaminación por refrigerante.

Los resultados anteriores sugieren que no se observa evidencia de degradación acelerada ni acumulación de contaminantes en el aceite hasta las 1000 o 1500 horas de operación, por lo que, en función de estos parámetros, existe un riesgo mínimo al extender los mantenimientos hasta este punto de operación. Lo anterior, se ve respaldado con el análisis a las variables

tribológicas restantes, como la dilución del aceite, la cual se muestra en la Figura 13 para los motores ERK, ERL y WFD.

Figura 13

Resultados de dilución de aceite en función del tiempo de uso para motores ERK-987 (a), ERL-045 (b) y WFD-485 (c)



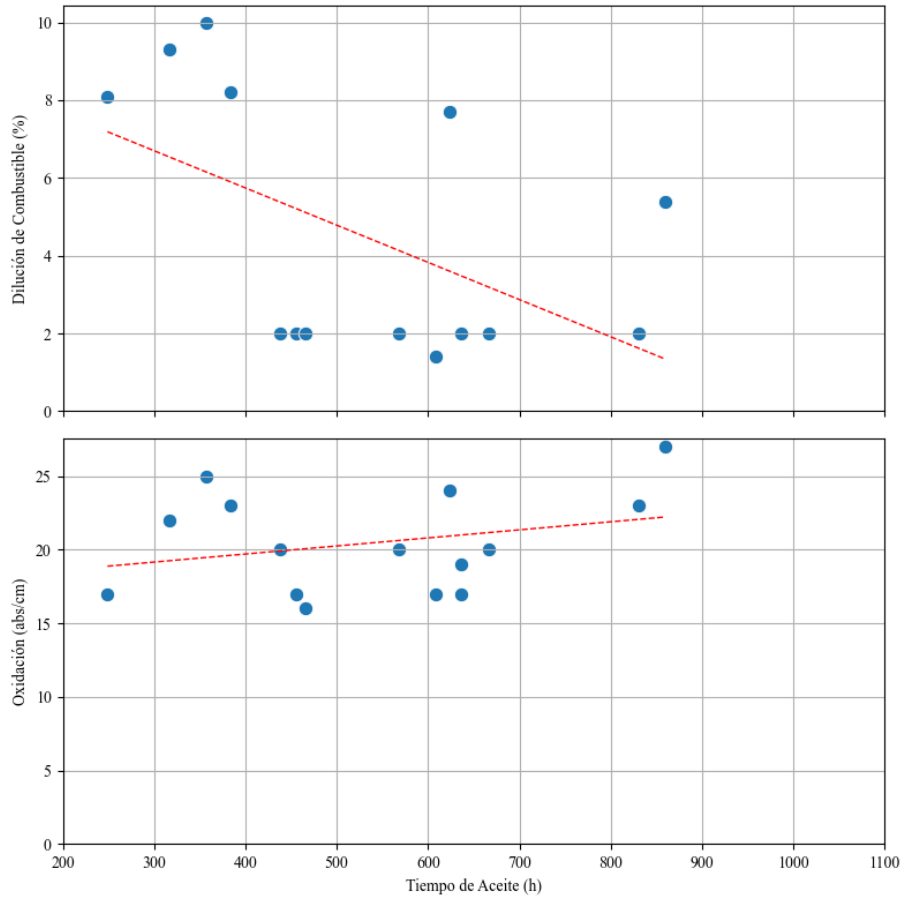
Como se observa en la figura anterior, la dilución se mantiene estable en el tiempo, entre el 2 y 4%, y la tendencia indica un comportamiento casi constante en los datos experimentales.

Aunque hay un valor extremo cerca de las 650 horas para el motor ERK-987 (como se observa en la Figura 13a), la tendencia general es moderadamente estable, lo que sugiere que las tareas de mantenimiento pueden extenderse hasta un máximo de 1000 horas, sin comprometer la operación segura de los equipos, o sin requerir una urgencia de reemplazo del aceite, bajo las condiciones actuales de uso de los equipos. Con base en los datos analizados, se recomienda implementar una estrategia piloto para extender los intervalos de cambio de aceite hasta las 1000 horas en los equipos, con monitoreo continuo de los parámetros tribológicos para validar esta extensión en condiciones reales de operación.

Mientras que estos resultados son aplicables para los motores mencionados, el análisis de los datos obtenidos para el generador SR-500 (señalados en la Figura 14), indica que la dilución de combustible presenta valores elevados (8%–10%) en las primeras 300–400 horas de operación, lo que sugiere un posible ingreso de combustible al cárter debido a inyección deficiente o ciclos de trabajo cortos. Sin embargo, a partir de las 450 horas, se observa una disminución progresiva, estabilizándose alrededor del 2% entre las 500 y 700 horas. Aunque se detecta un ligero repunte hacia las 860 horas (5.5%), la tendencia general es decreciente, como lo indica la línea de tendencia en la dilución de combustible. Por otro lado, la oxidación del aceite muestra una dispersión entre 15 y 27 abs/cm, con los valores más altos concentrados entre las 300 y 400 horas. Aunque hay fluctuaciones, la tendencia general es ligeramente creciente, lo que apunta a una degradación progresiva del lubricante por exposición a altas temperaturas o intervalos prolongados sin renovación. Este comportamiento es consistente con el envejecimiento natural del aceite y la acumulación de estrés térmico, lo cual podría afectar su desempeño a largo plazo si no se gestiona adecuadamente (Kayode et al., 2023).

Figura 14

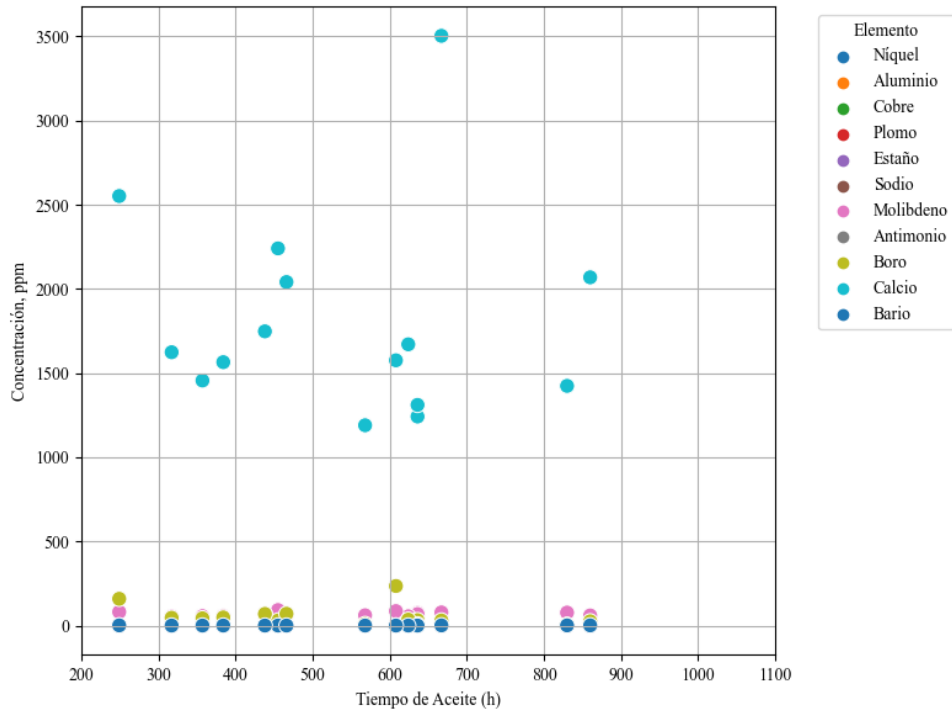
Análisis de variables tribológicas para el generador SR-500.



Por otro lado, el análisis de metales y aditivos de la Figura 15 revela un perfil estable, sin indicios de desgaste acelerado o contaminación crítica. El calcio, presente en concentraciones variables (1400–3500 ppm), destaca como principal componente, probablemente asociado a detergentes en el aceite. El boro y molibdeno se mantienen en rangos normales (50–150 ppm), lo que sugiere una formulación adecuada del lubricante, mientras que la concentración de metales de desgaste (níquel, aluminio, cobre, plomo y estaño), son bajas, con solo algunos picos aislados que podrían relacionarse con desgaste localizado o arrastre de partículas, lo que refuerza la necesidad de monitoreo continuo para evitar riesgos de lubricación inadecuada.

Figura 15

Análisis de metales y contaminantes del generador SR-500.



4.4. Impactos de la implementación del modelo de mantenimiento

Una vez validado el uso de 1000 horas como la frecuencia de mantenimiento para los equipos de la flota de Concremóvil SAS, se realizó un análisis comparativo de los beneficios que aportaría la implementación de mantenimiento con esta frecuencia, teniendo en cuenta los resultados del análisis de la sección anterior. Para ello, la Figura 16 muestra una comparación entre los costos de mantenimiento antes y después de la implementación para los motores ISM International, mientras que la Figura 17 realiza esta misma comparación, para los motores ISM Kenworth. Uno de los hallazgos más relevantes es la reducción en el costo asociado al aceite, que representa la mayor proporción del mantenimiento total. Asimismo, componentes como los filtros de aire (primario y secundario) muestran una reducción en su costo unitario al espaciar las

intervenciones. En contraste, otros elementos como la mano de obra, el refrigerante, la grasa o los filtros A/C no presentan incrementos significativos, por lo que se logran tarifas de \$ 2249 y \$ 2435 COP por hora de servicio de cada tipo de motor, lo que a su vez representan reducciones del 20% y 25% con respecto a la línea base, respectivamente.

Figura 16

Comparativa de costos de mantenimiento para motores ISM International.

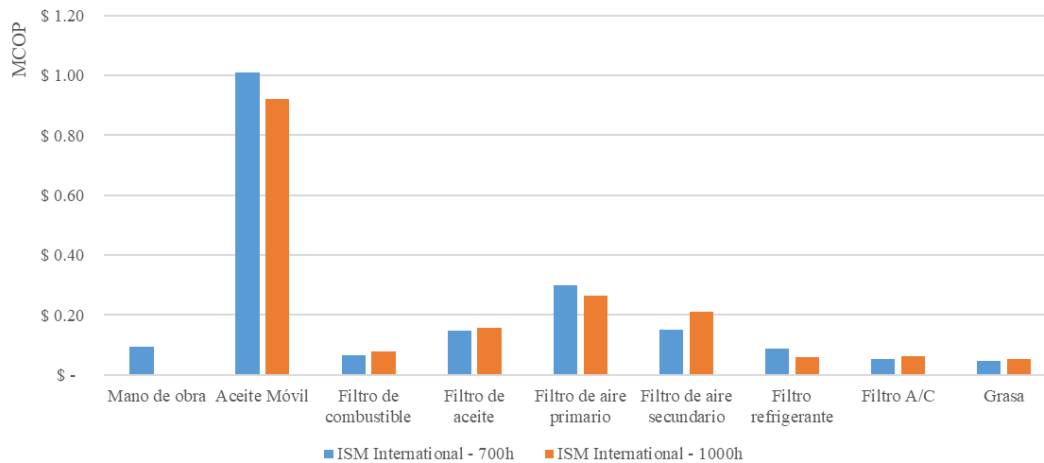
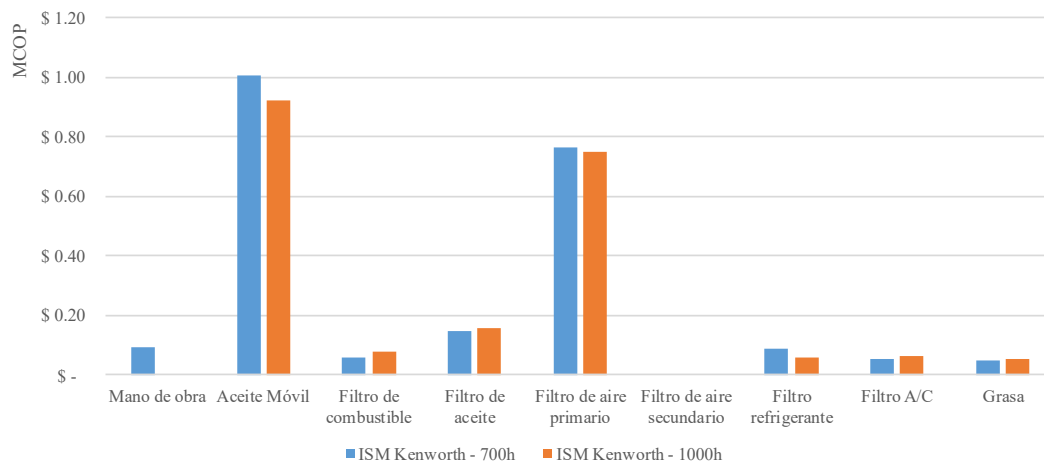


Figura 17

Comparativa de costos de mantenimiento para motores ISM Kenworth



Además de las reducciones en costo unitario de tareas de mantenimiento, otro beneficio de la implementación de mantenimientos a 1000 horas consiste en la disminución directa de los costos anuales de operación. Según Caterpillar (2015) y Cummins Inc. (2022), la combinación de lubricantes sintéticos de alto rendimiento con sistemas de monitoreo de condición permite extender los cambios de aceite hasta 1000 o incluso 1200 horas, especialmente en aplicaciones con condiciones de carga moderada y control de contaminantes. Esta medida no solo reduce el consumo de insumos, sino que también disminuye la frecuencia de paradas programadas, aumentando así la disponibilidad operativa de los equipos y reducciones de hasta un 30% en intervenciones, disminuyendo los tiempos muertos y el uso de recursos logísticos.

Conclusiones

Este trabajo propuso un modelo de mantenimiento predictivo basado en técnicas tribológicas, utilizando el análisis de aceite lubricante como herramienta principal para evaluar el estado de los equipos. Mediante el monitoreo sistemático de parámetros clave como viscosidad, metales de desgaste, oxidación y TBN, se establecieron patrones de degradación que permitieron anticipar fallos y optimizar los intervalos de intervención. El modelo se fundamentó en un enfoque empírico, combinando análisis de tendencias con umbrales críticos definidos según especificaciones técnicas y condiciones operativas reales.

Los resultados demostraron que, al implementar este modelo, la frecuencia de mantenimiento podría extenderse de 700 a 1000 horas sin comprometer la integridad del lubricante ni la maquinaria. Esto se logró al identificar ventanas de intervención precisas, basadas en la evolución de las variables tribológicas y su proximidad a límites preestablecidos. Por ejemplo, la detección temprana de contaminación por combustible o desgaste anormal de metales permitió ajustar los intervalos de cambio de aceite y filtros, maximizando su vida útil sin riesgos operativos.

Para Concremóvil SAS, la adopción de este modelo generaría beneficios significativos, incluyendo una reducción del 20-25% en los costos asociados al uso de equipos (ahorro en lubricantes, filtros y mano de obra). Si se escala a toda la flota, las mejoras en eficiencia podrían traducirse en ahorros aún mayores, al minimizar paradas no planificadas y extender la vida útil de los componentes críticos. Además, al alinearse con estándares como la ISO 55001, el modelo fortalece la gestión de activos y la confiabilidad operacional.

Entre las limitaciones del modelo se destaca su dependencia de la calidad y frecuencia del muestreo, así como la necesidad de recalibrarlo para distintos tipos de equipos o condiciones de

operación. Futuras fases del proyecto podrían incorporar técnicas avanzadas, como aprendizaje automático o sensores IoT, para mejorar su precisión y escalabilidad. A pesar de estos desafíos, el modelo representa un avance clave en la transición de Concremóvil SAS hacia un mantenimiento proactivo, basado en datos y adaptado a sus necesidades específicas.

Referencias Bibliográficas

- Adesoji, A. A., Onu, P., Afolalu, S. A., Bello, K. A., Lawal, S. L., Monye, S. I., & Ogunniyi, O. J. (2024). Tribological Analysis of Advanced Lubricants in Automotive Engines. *International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals, SEB4SDG 2024*.
<https://doi.org/10.1109/SEB4SDG60871.2024.10629679>
- Agocs, A., Nagy, A. L., Tabakov, Z., Perger, J., Rohde-Brandenburger, J., Schandl, M., Besser, C., & Dörr, N. (2021). Comprehensive assessment of oil degradation patterns in petrol and diesel engines observed in a field test with passenger cars – Conventional oil analysis and fuel dilution. *Tribology International*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107079>
- Al Sheikh Omar, A., Motamen Salehi, F., Farooq, U., Morina, A., & Neville, A. (2021). Chemical and physical assessment of engine oils degradation and additive depletion by soot. *Tribology International*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107054>
- Arena, F., Collotta, M., Luca, L., Ruggieri, M., & Termine, F. G. (2021). Predictive Maintenance in the Automotive Sector: A Literature Review. *Mathematical and Computational Applications*, 27(1), 2. <https://doi.org/10.3390/mca27010002>
- Behrendt, A., de Boer, E., Kasah, T., Koerber, B., Mohr, N., & Richter, G. (2021). *Leveraging Industrial IoT and advanced technologies for digital transformation: How to align business, organization, and technology to capture value at scale*. McKinsey & Company.
www.mckinsey.com
- PwC Belgium. (2023). *Digital trends in maintenance and asset management*.
PricewaterhouseCoopers Belgium. <https://www.pwc.be/en/news-publications/2023/digital-trends-maintenance-asset-management.html>

Caterpillar Inc. (2023). *SOS Services: How to Take an Oil Sample*. Caterpillar Inc.

https://www.cat.com/en_US/by-industry/electric-power/product-support/services-and-repair-options/sos-services/take-sample.html

Connect, R. (2025). *Ventajas y beneficios de implementar un programa de gestión tribológica de activos de clase mundial*. <https://esp.reliabilityconnect.com/ventajas-y-beneficios-de-implementar-un-programa-de-gestion-tribologica-de-activos-de-clase-mundial/>

Duran, B., Cavoret, J., Philippon, D., Ville, F., Ruellan, A., & Berens, F. (2024). Influence of a transmission oil degradation on physico-chemical properties and tribological performance. *Tribology International*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109084>

Gołębiowski, W., Wolak, A., & Zając, G. (2024). Preventive maintenance in urban public transport: the role of engine oil analysis. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81728-w>

Hauke, J., & Kossowski, T. (2011). Comparison of values of pearson's and spearman's correlation coefficients on the same sets of data. *Quaestiones Geographicae*, 30(2), 87–93. <https://doi.org/10.2478/v10117-011-0021-1>

IK4-TEKNIKER. (2025). *La importancia del análisis tribológico para ahorrar costes*. <https://www.tekniker.es/es/la-importancia-del-analisis-tribologico-para-ahorrar-costes>

ASTM International. (2022). *ASTM D4057-22: Standard Practice for Manual Sampling of Petroleum and Petroleum Products*. ASTM International. <https://store.astm.org/d4057-22.html>

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.09.012>

- Kayode, J. F., Afolalu, S. A., Emetere, M. E., Monye, S. I., & Lawal, S. L. (2023). Application and impact of tribology in energy-an overview. *E3S Web of Conferences*, 391. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339101081>
- Marco, D. F. (2019). *¿Qué es y cómo funciona un camión mezclador?* Bardahl Industria. <https://www.bardahlindustria.com/que-es-y-como-funciona-un-camion-mezclador/>
- Mohapatra, A. G., Mohanty, A., Pradhan, N. R., Mohanty, S. N., Gupta, D., Alharbi, M., Alkhayyat, A., & Khanna, A. (2023). An Industry 4.0 implementation of a condition monitoring system and IoT-enabled predictive maintenance scheme for diesel generators. *Alexandria Engineering Journal*, 76, 525–541. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.06.026>
- Palmer, J. (2018). Cómo limpiar & mantener apropiadamente a las mezcladoras. *SS18 Palmer*, 69–71.
- Pan, Y., Han, Z., Wu, T., & Lei, Y. (2023). Remaining Useful Life Prediction of Lubricating Oil With Small Samples. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(7), 7373–7381. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3201289>
- Stern, S., Farioli, S., Eisenschmidt, E., Morachioli, S., Kienzler, C., Jeske, D., & Schaal, N. (2020). *The future of maintenance for distributed fixed assets: Why people are key to successfully implementing technology-led maintenance transformations*. McKinsey & Company. www.mckinsey.com
- Evocon Team. (2023). *Cost of Downtime in Manufacturing: Insights & Implications*. Evocon. <https://evocon.com/articles/cost-of-downtime-in-manufacturing-insights-implications/>
- Thomas, D., & Weiss, B. (2021). Maintenance costs and advanced maintenance techniques in manufacturing machinery: Survey and analysis. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 12(1), 1–13. <https://doi.org/10.36001/IJPHM.2021.V12I1.2883>

- Toms, L. A., Toms, A. M., & Engineers, S. of T. and L. (2008). *Machinery Oil Analysis: Methods, Automation and Benefits: A Guide for Maintenance Managers, Supervisors & Technicians*. Society of Tribologists and Lubrication Engineers. <https://www.stle.org>
- Wolak, A., & Zajac, G. (2018). Changes in the operating characteristics of engine oils: A comparison of the results obtained with the use of two automatic devices. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 113, 53–61.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.037>