

Diseño de Plan de Mantenimiento Predictivo mediante Análisis de Aceite para Mejorar la
Confiabilidad y Asegurar Continuidad Operativa de la Flota Vehicular de Campo Nare

Perteneciente a la Gerencia de Operaciones y Mantenimiento de Ecopetrol S.A

Edinson Galindo Vergara

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Ingeniería Automotriz

Director

Jorge Luis Chacon Velasco

PhD en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A mi amada esposa Margarita y adorable hija Elena Sofia por su apoyo incondicional y comprensión brindados durante el desarrollo del presente trabajo los cuales permitieron culminarlo de manera exitosa.

A mi director Jorge Luis Chacon Velasco por su asesoría, coaching y direccionamiento estratégico durante el desarrollo de la monografía.

Agradecimientos

Al Ing. Edgardo Martinez Jefe del Departamento de Mantenimiento Catenare de Ecopetrol por su colaboración y apoyo tecnico, administrativo y logístico para el desarrollo del trabajo de monografía.

Al ingeniero Darwin Calderon de la coordinación IMC de Ecopetrol VRC por su asesoría en temas relacionados sobre mantenimiento predictivo aplicado a flota de vehículos.

Al ingeniero Fausto Gonzalez de la empresa Alianza Catenare |por su asesoría sobre programa de análisis de aceites usados y análisis RAM que son aplicados a los vehículos que conforman la flota vehicular de los campos Nare y Teca.

Al ingeniero Paulo Butirado de la empresa SGS-ETSA por su asesoría y colaboración para la obtención de los reportes de gestion de mantenimiento e indicadores de confiabilidad de la flota vehicular.

Al ingeniero Rodrigo Alonso Manzano Manzano Líder de Mantenimiento de Ecopetrol Teca Nare por su soporte tecnico en gestion de activos y mentoría en tecnologías de mantenimientos predictivos que aplican actualmente en los activos industriales generando valor a Ecopetrol S.A.

Contenido

	pág.
Introducción	13
1. Objetivos	19
1.1 Objetivo General	19
1.2 Objetivos Específicos.....	19
2. Descripción del Proyecto	20
2.1 Planteamiento del Problema	20
2.1.1 Contexto Operativo del Activo Nare	20
2.2 Problema	21
2.3 Casualidad Priorizada	22
2.4 Necesidad de un Enfoque Predictivo	23
2.5 Formulación del Problema.....	23
3. Justificación del Plan Propuesto	25
4. Análisis de la Literatura Recopilada	29
4.1 Marco Teórico.....	29
4.2 Marco Conceptual.....	31
4.2.1 Mantenimiento Predictivo.....	31
4.2.2 Análisis de Aceite Lubricante	32
4.2.3 Confiabilidad.....	32
4.2.4 Criticidad Operacional	33
4.2.5 Análisis RAM	33

4.2.6 Modo de Falla y Efecto.....	33
4.2.7 Unidad de Bombeo Mecánico Convencional	34
4.3 Estado del Arte.....	34
4.4 Marco Legal	37
4.4.1 Obligaciones Legales de Mantenimiento Vehicular	37
4.4.2 Revisión Técnico-Mecánica de Emisiones	37
4.4.3 Gestión de Activos y Confiabilidad.....	38
4.4.4 Normativas Técnicas Internas y Sectoriales	39
5. Alcance y Resultados.....	40
5.1 Alcance de la Investigación	40
5.2 Resultados Esperados.....	41
6. Plan de Trabajo	44
6.1 Metodología	44
7. Impacto Esperado.....	49
8. Cronograma y Plan de Trabajo	53
9. Recursos y Presupuesto.....	56
10. Equipo	58
11. Diagnóstico Inicial de la Flota	62
11.1 Caracterización de la Flota Vehicular del Activo Nare	62
11.2 Análisis Histórico de Fallas y Desempeño	65
11.2.1 Fallas por Tipo de Sistema o Familias	66
11.2.2 Fallas por Vehículo o Criticidad por Frecuencia	68
11.2.3 Clase de Aviso en Función al Mantenimiento Reactivo y Proactivo.....	71

11.2.4 Análisis de Criticidad y Riesgos	72
11.3 Indicadores de Confiabilidad: MTBF, MTTR y Disponibilidad	73
11.3.1 MTBF global o Tiempo Medio entre Fallas	74
11.3.2 MTTR global o Tiempo Medio de Reparación.....	75
11.3.3 Disponibilidad Mecánica Promedio de la Flota.....	76
12. Diseño del Plan Tribológico	78
12.1 Selección de Puntos de Muestreo por Tipo de Vehículo	78
12.1.1 Motores Diésel para Todos los Vehículos	78
12.1.2 Cajas de Transmisión y Diferenciales para Vehículos Pesados.....	78
12.1.3 Sistemas Hidráulicos de Trabajo	79
12.1.4 Sistemas auxiliares y otros fluidos.....	80
12.2 Procedimientos Normalizados de Muestreo de Aceite	80
12.3 Parámetros de Análisis y Normas Técnicas Aplicables.....	83
12.4 Frecuencias de Muestreo y Límites de Alerta.....	88
12.5 Formatos, Registro de Datos y Trazabilidad.....	93
13. Plan de Mantenimiento Predictivo por Condición.....	96
13.1 Integración del Plan Tribológico con SAP PM.....	96
13.2 Matriz de Decisiones de Mantenimiento Basada en Condición	99
13.3 Ajustes al Plan de Mantenimiento Actual.....	103
13.4 Cronograma de Implementación Operativa	105
13.5 Roles y Responsabilidades en la Ejecución del Plan	108
14. Evaluación del Impacto Esperado.....	112
14.1 Impacto Operativo y Técnico.....	112

14.2 Impacto en Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente (HSE).....	114
14.3 Indicadores Clave de Mantenimiento y Metas Proyectadas	117
14.4 Evaluación Costo–Beneficio del Plan.....	120
15. Conclusiones	124
16. Recomendaciones	127
Referencias Bibliográficas	131

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1 Fases del Proyecto y Descripción Detallada.....	44
Tabla 2 Objetivos, Estrategias y Entregables del Proyecto	47
Tabla 3 Cronograma de actividades.....	53
Tabla 4 Costos Estimados del Proyecto	56
Tabla 5 Listado de vehículos de la flota del Activo Nare.....	62
Tabla 6 Consolidado de fallas tipo Y2 por vehículo con su caracterización técnica entre 2021 y 2025.....	64
Tabla 7 Distribución por clase de aviso	65
Tabla 8 Órdenes de mantenimiento por clase	65
Tabla 9 Clasificación de familias de sistemas según palabras clave en las descripciones de fallas	66
Tabla 10 Fallas por tipo de sistema o familia entre 2021 y 2025	67
Tabla 11 Distribución de fallas tipo Y2 por vehículo y porcentaje acumulado.....	69
Tabla 12 Criticidad y prioridad.....	71
Tabla 13 Distribución de avisos por clase según el tipo de mantenimiento entre 2021 y 2025 ..	72
Tabla 14 Datos base para el cálculo del MTBF por tipo de vehículo entre 2021 y 2025.....	74
Tabla 15 Datos base para el cálculo del MTTR por tipo de vehículo entre 2021 y 2025.....	75
Tabla 16 Cálculo de disponibilidad mecánica por tipo de vehículo entre 2021 y 2025	76
Tabla 17 Ejemplo de criterios de alerta para parámetros de análisis de aceite.....	91
Tabla 18 Matriz de decisiones de mantenimiento basada en condición	99

Tabla 19 Criterios Generales de la Matriz	101
Tabla 20 Fases del Plan de Mantenimiento Predictivo	106
Tabla 21 Roles y responsabilidades en el programa de mantenimiento predictivo	108
Tabla 22 Costos del Plan Predictivo de Mantenimiento	120
Tabla 23 Beneficios cuantificables del plan predictivo de mantenimiento	121
Tabla 24 Proyección financiera simplificada (primer año).....	121
Tabla 25 Proyección Financiera (Años Subsiguientes)	122

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1 Listado de equipos que conforman la flota vehicular del Activo Nare	21
Figura 2 Diagrama de Gantt del cronograma.....	55
Figura 3 Diagrama de Pareto de frecuencia de fallas por familia de sistemas entre 2021 y 2025	68
Figura 4 Diagrama de Pareto de frecuencia de fallas por vehículo individual	70

Resumen

Título: Diseño de Plan de Mantenimiento Predictivo mediante Análisis de Aceite para Mejorar la Confiabilidad y Asegurar Continuidad Operativa de la Flota Vehicular de Campo Nare Perteneciente a la Gerencia de Operaciones y Mantenimiento de Ecopetrol S.A. *

Autor: Edinson Galindo Vergara **

Palabras Clave: Mantenimiento predictivo; Análisis de aceite; Flota vehicular; Confiabilidad; Tribología; Disponibilidad.

Descripción: La presente monografía propone el diseño de un plan de mantenimiento predictivo para la flota vehicular del campo Nare (Ecopetrol), empleando el análisis tribológico de aceite lubricante como herramienta central. Inicialmente se realiza un diagnóstico de fallas históricas de la flota, identificando patrones de averías en motores, transmisiones y sistemas hidráulicos asociados a degradación del lubricante. Con base en este diagnóstico y en las mejores prácticas de mantenimiento basado en condición, se define un programa de monitoreo periódico de aceite: puntos de muestreo en cada vehículo crítico, frecuencia óptima de toma de muestras y parámetros de laboratorio a evaluar (viscosidad, metales de desgaste, contaminantes, etc.). Se desarrolla una matriz de decisión que vincula los resultados del análisis de aceite con acciones de mantenimiento específicas, por ejemplo, cambio de aceite, filtrado, inspección o reparación de componentes, para anticipar fallas incipientes. El plan predictivo resultante se integra al sistema de mantenimiento existente, permitiendo programar intervenciones solo cuando los indicadores de condición lo requieran. Se espera que la implementación de este plan aumente la confiabilidad y disponibilidad de la flota, al reducir fallas sorpresivas y optimizar los intervalos de servicio. Asimismo, se proyecta una disminución de costos por evitar daños mayores y racionalizar los cambios de aceite, junto con beneficios en seguridad operativa y reducción de impactos ambientales.

* Trabajo de Grado

** Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Nombres y Apellidos completos. Título académico completo de mayor rango. Codirector: Nombres y Apellidos completos. Título académico completo de mayor rango

Abstract

Title: Design of a Predictive Maintenance Plan through Oil Analysis to Improve Reliability and Ensure Operational Continuity of the Vehicle Fleet at Campo Nare, under the Operations and Maintenance Management of Ecopetrol S.A.*

Author(s): Edinson Galindo Vergara⁵

Key Words: Predictive maintenance; Oil analysis; Vehicle fleet; Reliability; Tribology; Availability.

Description: This technical report presents the design of a predictive maintenance plan for the vehicle fleet at Ecopetrol's Nare field, using lubricating oil analysis as the cornerstone technique. First, a comprehensive failure analysis of the fleet's historical data is conducted to identify recurrent issues in engines, transmissions, and hydraulic systems associated with lubricant degradation. Based on this diagnosis and condition-based maintenance best practices, a routine oil monitoring program is defined: including sampling points on each critical vehicle, optimal sampling frequency, and key laboratory parameters to measure (viscosity, wear metals, contaminants, etc.). A decision matrix is developed to link oil analysis results with specific maintenance actions, for instance, scheduling an oil change, additional filtration, or component inspection/overhaul, thus allowing incipient faults to be addressed proactively. The proposed predictive plan is integrated into the existing maintenance system, enabling interventions only when condition indicators warrant them. Implementation of this plan is expected to improve fleet reliability and availability by reducing unplanned breakdowns and optimizing service intervals. Additionally, significant cost savings are anticipated from avoiding major failures and optimizing oil change intervals, alongside enhanced operational safety and lower environmental risk.

* Degree Work

⁵School of Mechanical Engineering. Specialization in Maintenance Management. Advisor: xxxxx, Co-advisor: xxxxx.

Introducción

La gestión del mantenimiento en flotas vehiculares que operan en entornos de alta exigencia constituye un factor crítico para la continuidad y eficiencia de las operaciones industriales, particularmente en el sector petrolero donde la confiabilidad de los equipos de soporte impacta directamente la productividad y la seguridad de los procesos. Ecopetrol S.A., como empresa líder del sector hidrocarburos en Colombia, gestiona en el campo Nare una flota vehicular diversificada compuesta por quince equipos automotores especializados, incluyendo camiones de vacío, cisternas, unidades con brazo hidráulico, lubricadores móviles y vehículos de bomberos, los cuales cumplen funciones esenciales de apoyo logístico, izaje, suministro de insumos y atención de emergencias en las operaciones petroleras (Ecopetrol S.A., 2025).

El mantenimiento actual de esta flota se fundamenta predominantemente en un esquema preventivo calendarizado, basado en intervalos fijos determinados por kilometraje u horas de operación, complementado por acciones correctivas reactivas una vez ocurrida la falla. Este enfoque tradicional, de tipo preventivo estático, presenta limitaciones significativas al no reflejar adecuadamente la condición real de los sistemas mecánicos durante la operación, generando fallas imprevistas recurrentes, tiempos de inactividad elevados y reemplazos inoportunos de componentes que afectan negativamente la disponibilidad operativa de la flota.

El análisis de los registros históricos de mantenimiento correspondientes al período comprendido entre noviembre de 2021 y julio de 2025 revela que las fallas asociadas al sistema de lubricación representan aproximadamente el 18,82% del total de incidencias reportadas, ubicándose como la segunda causa más frecuente después de las fallas de motor (21,18%), situación que resulta particularmente crítica en entornos de operación severa como el campo

Nare, caracterizado por caminos polvorientos, alta humedad, variaciones térmicas significativas y cargas intermitentes, donde la degradación del lubricante y su efecto en el desgaste interno de componentes se constituyen en factores determinantes de la vida útil de los equipos (Des-Case Corporation, 2021).

La contaminación del aceite por partículas abrasivas, agua y combustible, junto con la pérdida progresiva de propiedades fisicoquímicas como la viscosidad y la reserva alcalina, puede pasar inadvertida bajo el esquema actual de mantenimiento hasta manifestarse mediante fallas funcionales que afectan la continuidad operativa de los equipos, en este sentido, los datos recopilados muestran una concentración importante de las incidencias en un número reducido de vehículos, siguiendo un comportamiento tipo Pareto, ya que tres equipos reúnen conjuntamente el 62 % de las fallas registradas, correspondientes al camión de vacío FUL-502 con 14 incidencias, equivalentes al 28 % del total, el camión de bomberos RET-541 con 11 fallas, correspondientes al 22 %, y el camión brazo hidráulico SRP-475 con 6 eventos, equivalentes al 12 %, esta concentración evidencia la necesidad de analizar factores particulares de desgaste y operación en estos activos y orientar hacia ellos estrategias de mantenimiento diferenciadas basadas en su condición real.

Los indicadores de confiabilidad calculados para la flota también muestran oportunidades de mejora, debido a que el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) global se estima en 2.613 horas, mientras que los vehículos de mayor criticidad presentan valores inferiores, como los camiones de vacío y de bomberos con MTBF de 1.600 y 1.800 horas, respectivamente, por su parte, el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) promedio alcanza 62,2 horas por evento y la disponibilidad mecánica agregada se sitúa en 97,4 %, comportamiento que representa periodos relevantes de indisponibilidad a lo largo del año y puede generar efectos sobre la continuidad de

las operaciones, los costos de mantenimiento y la capacidad de respuesta de la flota, por esta razón, los resultados respaldan la necesidad de fortalecer las estrategias de monitoreo y mantenimiento predictivo, especialmente en los vehículos que concentran los mayores niveles de fallas.

En este contexto, surge la necesidad de transitar hacia un enfoque de mantenimiento predictivo basado en condición, teniendo al análisis de aceite lubricante usado como eje central de diagnóstico, ya que el lubricante actúa como portador de información invaluable sobre el estado interno de los sistemas lubricados al arrastrar partículas metálicas producto del desgaste, contener trazas de contaminantes y reflejar cambios químicos por degradación térmica (Des-Case Corporation, 2021). La pregunta de investigación que orienta este trabajo es: ¿cómo diseñar un plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceite que contribuya a mejorar la confiabilidad y asegurar la continuidad operativa de la flota vehicular del activo Nare de Ecopetrol?

De esta interrogante general se derivan preguntas específicas: ¿qué sistemas y unidades vehiculares deben priorizarse considerando su criticidad operativa y antecedentes de fallas?, ¿qué parámetros de análisis de aceite y qué frecuencias de muestreo resultan adecuadas para las condiciones particulares de operación de la flota?, y ¿qué criterios de intervención basados en condición deben adoptarse para anticipar las fallas incipientes y programar mantenimientos oportunos? El mantenimiento predictivo mediante análisis de aceite ha sido ampliamente documentado como una herramienta efectiva para mejorar la confiabilidad de flotas vehiculares en entornos industriales exigentes, y estudios recientes confirman que el análisis sistemático de aceite es clave en el mantenimiento predictivo de motores diésel, posibilitando evaluar la condición del lubricante y detectar indicios de desgaste interno y contaminación mucho antes de

que ocurran fallas (Amrani et al., 2022; Azevedo & Olsen, 2019; Santana et al., 2022; Kaminski, 2024).

Investigaciones específicas han demostrado que la detección de partículas de desgaste ferrosas en el aceite puede anticipar fallas de cojinetes con suficiente antelación para planificar una reparación menor en vez de una reconstrucción total del motor (Chen et al., 2025; Ramírez et al., 2024), y que la presencia de glicol o caídas súbitas en el índice de base alcalina alertan sobre condiciones que podrían causar daños catastróficos al motor. La literatura especializada reporta que la implementación de mantenimiento predictivo bien planificado puede reducir hasta un 30% los costos de mantenimiento y duplicar la vida útil de los activos críticos al evitar fallas catastróficas (Moktadir et al., 2023), mientras que la experiencia industrial confirma que una política disciplinada de muestreo y análisis de aceite contribuye a evitar fallas súbitas y a optimizar los intervalos de cambio de lubricante (Esquivel, 2023).

El propósito fundamental de este trabajo es diseñar un plan de mantenimiento predictivo para la flota vehicular operativa de Ecopetrol Campo Nare, fundamentado en el análisis tribológico del aceite lubricante para el incremento de la disponibilidad mecánica de los vehículos y el mejoramiento de la gestión técnica y logística del mantenimiento. Para lograr este objetivo general, se han establecido objetivos específicos que incluyen caracterizar la gestión de mantenimiento vigente y los historiales de fallas mediante el análisis de criticidad, especificar los puntos de muestreo de aceite y los parámetros analíticos a medir en laboratorio, desarrollar la estructura del plan de mantenimiento por condición integrando los resultados del análisis tribológico en la programación de intervenciones predictivas, y evaluar de forma teórica cómo la implementación del plan podría influir en el desempeño de la flota utilizando indicadores de mantenimiento como disponibilidad, MTBF y MTTR.

La realización de este proyecto se justifica desde diferentes dimensiones, en el componente técnico, la adopción de un enfoque de mantenimiento basado en condición permite reducir la incertidumbre sobre el estado real de los sistemas y facilita la programación de intervenciones en momentos más oportunos, fortaleciendo la capacidad para anticipar fallas y tomar decisiones sustentadas en evidencia objetiva (Hoffmann & Lasch, 2025), desde la perspectiva operativa y económica, la evaluación costo-beneficio estima un Retorno de la Inversión superior a 1,9 durante el primer año de implementación, con la posibilidad de alcanzar valores entre 4 y 5 en el mediano plazo, lo que evidencia el potencial de ahorro asociado con la prevención de fallas de alta criticidad y la optimización de los intervalos de cambio de aceite, asimismo, desde la gestión de activos, la propuesta guarda relación con los principios de estándares internacionales como ISO 55000 y contribuye al fortalecimiento de una cultura de mantenimiento proactivo basada en información confiable sobre la condición de los equipos (Barrera, 2022).

Desde la perspectiva de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente, la reducción de fallas súbitas puede disminuir la probabilidad de incidentes operativos, limitar la generación innecesaria de residuos peligrosos y reducir el riesgo de derrames o emisiones contaminantes asociados con fallas mecánicas (ExxonMobil Corporation, 2025), en el componente académico, el proyecto permite integrar conocimientos teóricos con la solución de un problema real del sector petrolero y desarrollar competencias relacionadas con diagnóstico de fallas, análisis de confiabilidad, gestión de mantenimiento y aplicación de metodologías propias de la ingeniería automotriz, mientras que desde la dimensión social, una mayor continuidad operativa de la flota contribuye a mantener la capacidad de respuesta ante emergencias y a reducir interrupciones que pueden afectar tanto la operación como las comunidades ubicadas en el entorno del activo.

El enfoque metodológico propuesto integra herramientas como el análisis de criticidad, el FMEA y el análisis RAM, junto con el diseño de planes de monitoreo sustentados en muestreo de aceite, definición de parámetros de control y frecuencias de análisis de acuerdo con criterios técnicos y normativos, además, la evaluación del impacto se apoya en indicadores de confiabilidad y en análisis costo-beneficio, articulando estos resultados con los sistemas de gestión utilizados por Ecopetrol, como SAP PM, y con principios internacionales de gestión de activos, de esta manera, el trabajo busca constituirse en una propuesta técnica aplicable que, una vez implementada y validada, contribuya a mejorar la confiabilidad y la continuidad operativa de la flota vehicular del activo Nare, fortalezca las capacidades internas de mantenimiento y genere una base para la posible extensión de prácticas predictivas hacia otros activos de la organización.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar un plan de mantenimiento predictivo para la flota vehicular operativa de Ecopetrol Campo Nare, fundamentado en el análisis tribológico del aceite lubricante para el incremento de la disponibilidad mecánica de los vehículos y mejoramiento de la gestión técnica y logística del mantenimiento.

1.2 Objetivos Específicos

Caracterizar la gestión de mantenimiento vigente y los historiales de fallas de la flota, mediante el análisis de criticidad basado en la frecuencia de fallas y su impacto operativo, identificando los sistemas y componentes prioritarios a intervenir.

Especificar los puntos de muestreo de aceite en los equipos priorizados, la frecuencia óptima de toma de muestras acorde con la severidad de servicio, y los parámetros analíticos a medir en laboratorio

Desarrollar la estructura del plan de mantenimiento por condición, integrando los resultados del análisis tribológico en la programación de intervenciones predictivas y decisiones técnicas sobre los componentes críticos.

Evaluar de forma teórica cómo la implementación del plan predictivo tribológico podría influir en el desempeño de la flota, utilizando como referencia indicadores de mantenimiento (disponibilidad, MTBF y MTTR).

2. Descripción del Proyecto

2.1 Planteamiento del Problema

2.1.1 Contexto Operativo del Activo Nare

La flota vehicular del campo Nare de Ecopetrol S.A. cumple funciones críticas de apoyo logístico, izaje, suministro de lubricantes, transporte de agua e insumos, y atención de emergencias en las operaciones petroleras. Se compone de camiones pesados especializados, como los camiones de vacío, brazo-grúa, lubricadores, cisternas, camiones de bomberos, entre otros, los cuales operan en condiciones ambientales severas, con caminos internos polvorientos, alta humedad, variaciones térmicas y cargas intermitentes. Estas condiciones exigentes aumentan la tasa de desgaste de componentes y demandan altos niveles de confiabilidad y disponibilidad de los vehículos para asegurar la continuidad operativa según estándares de la industria. Cada parada inesperada de un camión repercute en demoras productivas, gastos de emergencia y potenciales riesgos de seguridad, dado que estas unidades transportan personal y equipos esenciales para frentes de trabajo y respuestas a incidentes críticos. En la Figura 1 se presenta los equipos que conforman la flota intervenida y, además, constituye el universo de referencia para el diseño de la propuesta.

Figura 1

Listado de equipos que conforman la flota vehicular del Activo Nare

 LISTADO DE EQUIPOS QUE CONFORMAN LA FLOTA VEHICULAR DEL ACTIVO NARE						
ITEM	No.EQUIPO SAP	DENOMINACIÓN	LÍNEA	FABRICANTE	CAPACIDAD	MODELO
<u>1</u>	30000090	Camión de Vacío FUL-502	Línea 7600 SBA	INTERNATIONAL	19200 Kg/PSJ	2010
<u>2</u>	30000138	Camión de Vacío FUL-499	Línea 7600	INTERNATIONAL	19200 Kg/PSJ	2010
<u>3</u>	30000115	Camión de Vacío PTN-004	7600 SBA	INTERNATIONAL	15700 Kg/PSJ	2011
<u>4</u>	30000144	Camión de Vacío PTN-025	7600 SBA 6X4	INTERNATIONAL	15700 Kg/PSJ	2015
<u>5</u>	30000091	Camión Cisterna COD-591	NQR	CHEVROLET	4805 Kg/PSJ	2015
<u>6</u>	30000086	Camión Brazo Hidráulico SRP-475	FVR	CHEVROLET	9900 Kg/PSJ	2010
<u>7</u>	30000110	Camión Brazo Hidráulico FUL 595	FVR	CHEVROLET	9900 Kg/PSJ	2011
<u>8</u>	30000142	Camión Brazo Hidráulico SNU 088	FVR	CHEVROLET	7690 Kg/PSJ	2013
<u>9</u>	30000114	Camión Lubricador EYK 437	NKR	CHEVROLET	2840 Kg/PSJ	2010
<u>10</u>	30000093	Camión Lubricador PTN-012	NKR	CHEVROLET	1675 Kg/PSJ	2013
<u>11</u>	30000147	Camión Lubricador PTN-024	NKR	CHEVROLET	1675 Kg/PSJ	2015
<u>12</u>	30000097	Camión de Bomberos RET-541	T370	KENWORTH	4450 Kg/PSJ	2011
<u>13</u>	30000108	Camión de Bomberos RD0-172	T370	KENWORTH	4500 Kg/PSJ	2011

2.2 Problema

Actualmente, el mantenimiento de la flota se desarrolla principalmente mediante un esquema preventivo calendarizado, basado en intervalos fijos definidos por kilometraje u horas de operación, complementado con intervenciones correctivas una vez se presenta la falla, sin embargo, este enfoque preventivo de carácter estático no siempre refleja la condición real de los sistemas mecánicos y puede generar intervenciones prematuras o tardías, además de fallas imprevistas y tiempos elevados de inactividad, particularmente, los registros de mantenimiento muestran recurrencia de averías en motores, transmisiones y sistemas hidráulicos asociadas con procesos de degradación o contaminación del lubricante, situación que evidencia la necesidad de fortalecer los mecanismos de monitoreo de condición.

El aceite lubricante cumple una función esencial en la reducción de la fricción y el desgaste de los componentes, aunque durante la operación puede acumular partículas metálicas, agua, combustible y otros contaminantes, además de experimentar cambios en propiedades como la viscosidad y el nivel de oxidación, por esta razón, cuando no se dispone de técnicas de

monitoreo de condición, estas alteraciones pueden pasar inadvertidas hasta manifestarse mediante fallas funcionales, en este sentido, variaciones anormales en la viscosidad o la presencia de metales de desgaste constituyen señales tempranas que pueden advertir sobre posibles daños internos y que, si no son detectadas oportunamente, pueden evolucionar hacia fallas de mayor criticidad y costos elevados de reparación.

En conjunto, el predominio de un mantenimiento preventivo basado en intervalos fijos y de acciones correctivas posteriores a la falla limita la capacidad para anticipar el deterioro real de los componentes, situación que puede afectar la continuidad operativa de la flota, incrementar los costos de mantenimiento y aumentar los riesgos asociados con la indisponibilidad de vehículos destinados a emergencias y actividades críticas, por esta razón, resulta pertinente avanzar hacia estrategias de mantenimiento basadas en condición que permitan tomar decisiones a partir del estado real de los sistemas y no únicamente del tiempo o kilometraje acumulado.

2.3 Casualidad Priorizada

Con base en la experiencia del personal técnico y los históricos de fallas, se prioriza como causa principal la degradación del lubricante y su efecto en el desgaste interno de componentes. Las fallas más frecuentes se agrupan en familias, como fallas de motor (combustión), fallas del sistema de lubricación, fallas de transmisión (tren motriz), fallas del sistema hidráulico de trabajo y fallas del sistema eléctrico. En este proyecto se enfoca la familia de lubricación, dado que el estado del aceite lubricante influye directamente en el desgaste de piezas metálicas, en la pérdida de propiedades del fluido (disminución del índice de viscosidad y oxidación) y en la contaminación por agentes externos (agua, polvo de sílice y combustible). En entornos de operación severa como el campo Nare, estos factores aceleran el deterioro; de no detectarse oportunamente, conducen a fallas funcionales y paradas imprevistas del vehículo.

2.4 Necesidad de un Enfoque Predictivo

Dadas las deficiencias del esquema actual, surge la necesidad de evolucionar hacia un mantenimiento predictivo basado en condición, teniendo al análisis de aceite lubricante usado como eje central de diagnóstico. El análisis de aceite es una técnica no invasiva que permite revelar el estado interno de los sistemas lubricados al medir, entre otros, la presencia de metales de desgaste (indicando desgaste de componentes), contaminantes como agua o glicol, y cambios en propiedades fisicoquímicas del lubricante, como la viscosidad, índice de oxidación, reserva alcalina, etc. Amrani et al. (2022), Azevedo y Olsen (2019), Santana et al. (2022) y Kaminski (2024) confirman que el análisis sistemático de aceite es una herramienta clave en el mantenimiento predictivo de motores diésel, pues posibilita evaluar la condición del lubricante y detectar indicios de desgaste interno y contaminación mucho antes de que ocurran fallas.

Como se puede apreciar, la detección temprana mediante análisis tribológicos permitirá programar acciones preventivas precisas (filtrado, cambio de aceite y reparaciones menores) antes de que se produzcan daños mayores o paradas no planificadas. En flotas de vehículos de servicio pesado, la aplicación disciplinada de esta técnica ha demostrado reducir significativamente las fallas súbitas y optimizar los intervalos de mantenimiento. Por tanto, implementar un plan de mantenimiento predictivo apoyado en análisis de aceite se perfila como la solución para mejorar la confiabilidad mecánica de la flota, minimizar tiempos de inactividad y asegurar la continuidad operativa en las operaciones del activo Nare.

2.5 Formulación del Problema

Pregunta general:

¿Cómo diseñar un plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceite que contribuya a mejorar la confiabilidad y asegurar la continuidad operativa de la flota vehicular del activo Nare de Ecopetrol?

Preguntas específicas de apoyo:

De esta pregunta general se derivan las siguientes preguntas específicas de apoyo:

¿Qué sistemas y unidades vehiculares deben priorizarse en el plan, considerando su criticidad operativa y antecedentes de fallas?

¿Qué parámetros de análisis de aceite y qué frecuencias de muestreo resultan adecuadas para las condiciones particulares de operación de la flota?

¿Qué criterios de intervención basados en condición deben adoptarse para anticipar las fallas incipientes y programar mantenimientos oportunos antes de fallas mayores?

Estas preguntas orientadoras delimitan el alcance del estudio y guiarán la estructuración del plan de mantenimiento predictivo, asegurando que la solución propuesta responda directamente al problema identificado.

3. Justificación del Plan Propuesto

Una compañía petrolera como Ecopetrol depende fuertemente de la confiabilidad de sus equipos de soporte, incluyendo la flota vehicular del campo Nare. Cada hora de inactividad de un camión crítico puede traducirse en pérdidas financieras significativas, retrasos operativos e incluso riesgos de seguridad. Las condiciones severas de operación en campo Nare (cargas variables, ambiente con partículas abrasivas y humedad) aceleran el desgaste y contaminan más rápidamente el lubricante de los vehículos. En este contexto, los intervalos fijos de mantenimiento basados solo en tiempo o kilometraje resultan inadecuados, ya que pueden provocar intervenciones prematuras cuando el equipo aún se encuentra en buen estado, incrementando costos innecesariamente o intervenciones tardías cuando el equipo ya está degradado, derivando en fallas imprevistas y daños mayores.

La adopción de un enfoque de mantenimiento basado en condición, cuyo pilar sea el análisis regular del aceite, reduce esa incertidumbre sobre la salud real de motores, transmisiones y sistemas hidráulicos, permitiendo programar las intervenciones en el momento óptimo. Este principio es uno de los fundamentos del mantenimiento predictivo y ha sido documentado como fuente de mejoras en la disponibilidad de los equipos y reducción de costos operativos en entornos industriales complejos. En la literatura clásica se reporta que la implementación de mantenimiento predictivo bien planificado puede reducir hasta un 30% los costos de mantenimiento y duplicar la vida útil de los activos críticos, al evitar fallas catastróficas (Moktadir et al., 2023).

El análisis del aceite lubricante constituye una herramienta de diagnóstico indirecto que permite obtener información relevante sobre el estado interno de los sistemas mecánicos, debido

a que el lubricante transporta partículas metálicas generadas por desgaste, puede contener trazas de contaminantes y refleja cambios químicos asociados con procesos de degradación térmica y oxidación, en este sentido, la interpretación periódica de estas variables mediante análisis de tendencias permite establecer umbrales de intervención y transformar los resultados de laboratorio en decisiones concretas de mantenimiento, como inspeccionar componentes, realizar procesos de filtración o sustituir el lubricante cuando determinados parámetros superan los niveles definidos como aceptables, por esta razón, una política estructurada de muestreo y análisis puede contribuir a detectar oportunamente condiciones anormales, optimizar los intervalos de cambio de aceite y prolongar la vida útil de los componentes, lo que sustenta la pertinencia técnica y económica del análisis tribológico como tecnología central del plan propuesto (Esquivel, 2023).

Estudios desarrollados específicamente en motores diésel también respaldan la utilidad de este tipo de monitoreo, Chen et al. (2025) y Ramírez et al. (2024) muestran que la identificación de partículas ferrosas de desgaste en el lubricante puede proporcionar señales tempranas sobre procesos de deterioro en componentes como los cojinetes, permitiendo planificar intervenciones antes de que el daño evolucione hacia fallas de mayor criticidad, de manera similar, la presencia de glicol puede advertir sobre posibles fugas de refrigerante, mientras que disminuciones significativas de la reserva alcalina pueden indicar pérdida de la capacidad del lubricante para neutralizar compuestos ácidos, en conjunto, estos parámetros permiten fortalecer la capacidad de prevención de fallas y aportan información útil para mejorar la confiabilidad operacional y reducir los costos asociados con reparaciones mayores.

Desde la perspectiva de la gestión de activos, el plan propuesto se relaciona con prácticas de mantenimiento sustentadas en información objetiva sobre la condición de los equipos y con

principios establecidos en referentes como la familia ISO 55000, en este sentido, incorporar el análisis tribológico dentro de los procesos existentes de planeación y registro permitirá fortalecer la trazabilidad de las órdenes de trabajo, retroalimentar el sistema de mantenimiento y disponer de información histórica para ajustar frecuencias de intervención y priorizar recursos de acuerdo con el comportamiento real de los activos, además, los resultados podrán relacionarse con indicadores como el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) y la disponibilidad, favoreciendo un proceso de mejora continua en el que las decisiones no dependan exclusivamente de calendarios predeterminados, sino también de evidencia sobre la condición de los sistemas.

De acuerdo con Barrera (2022), la articulación del mantenimiento basado en condición con la gestión estratégica de activos favorece una incorporación gradual y sostenible de nuevas tecnologías, evitando implementar herramientas predictivas sin contar previamente con una base de información confiable, desde esta perspectiva, el plan tribológico propuesto puede constituir una primera fuente estructurada de datos sobre el comportamiento de motores, transmisiones y sistemas hidráulicos de la flota y servir posteriormente como base para integrar otras técnicas de diagnóstico, entre ellas análisis de vibraciones y termografía, a medida que aumente la madurez del sistema de mantenimiento, por esta razón, la propuesta no se limita a atender una problemática puntual, sino que puede contribuir al fortalecimiento progresivo de una cultura de mantenimiento proactivo y basado en evidencia dentro de la organización.

Finalmente, este trabajo de monografía, desarrollado en el marco de la Especialización en Ingeniería Automotriz, permite integrar conocimientos teóricos con el análisis de una problemática real presente en la operación de una flota vehicular vinculada con la industria petrolera, desde el componente académico, el proyecto profundiza en mantenimiento predictivo,

ingeniería de confiabilidad y análisis tribológico mediante la aplicación de estos conceptos a vehículos pesados, apoyándose en fuentes científicas y experiencias documentadas que sustentan la propuesta, asimismo, el resultado busca consolidarse como un documento técnico que pueda servir de referencia para operaciones con condiciones de mantenimiento semejantes y, desde la perspectiva formativa, permite demostrar competencias relacionadas con diagnóstico de fallas, gestión de mantenimiento, análisis de condición y aplicación de metodologías propias de la ingeniería automotriz.

4. Análisis de la Literatura Recopilada

Para sustentar el diseño del plan propuesto, se desarrollan tres componentes que son el marco teórico, que describe la evolución del mantenimiento hacia enfoques predictivos y basados en condición; el marco conceptual, que define los términos técnicos fundamentales empleados; y el estado del arte, que revisa estudios previos y soluciones existentes relevantes al problema. Esta estructura garantiza que el plan sea técnicamente sólido, conceptualmente claro y respaldado por la experiencia y normativa vigente.

4.1 Marco Teórico

La disciplina del mantenimiento industrial ha evolucionado desde enfoques predominantemente reactivos hacia estrategias preventivas y, más recientemente, hacia modelos predictivos o basados en condición, en los cuales las intervenciones se realizan de acuerdo con el estado real del activo y no únicamente a partir de intervalos fijos de tiempo, kilometraje u horas de operación, en este sentido, el mantenimiento predictivo busca medir y analizar variables que permitan identificar tendencias de deterioro antes de que se produzca una falla funcional, con el propósito de reducir intervenciones innecesarias, disminuir eventos no planificados y mejorar la confiabilidad de los equipos, proceso que ha sido favorecido por el desarrollo de tecnologías de monitoreo y sistemas de información, aunque su efectividad depende de contar con procedimientos definidos, responsabilidades claras y criterios técnicos que permitan transformar los datos obtenidos en decisiones confiables de mantenimiento (Hoffmann & Lasch, 2025).

Dentro de esta evolución adquiere especial importancia el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés), metodología formalizada por Moubray (2001) y orientada a analizar sistemáticamente los activos para identificar sus funciones, modos de falla,

consecuencias y estrategias de mantenimiento más apropiadas, desde esta perspectiva, cada tarea debe relacionarse con un modo de falla específico y con su posible impacto sobre la operación, evitando planes generales que no respondan a las condiciones particulares de los equipos, en este marco, el análisis de aceite aporta información diagnóstica que permite incrementar la capacidad de detectar modos de falla asociados con desgaste, contaminación y degradación del lubricante, facilitando intervenciones dirigidas antes de que estas condiciones evolucionen hacia fallas funcionales de mayor criticidad, por esta razón, su integración dentro de una estrategia RCM permite orientar de manera más precisa las acciones de inspección, mantenimiento y reemplazo de componentes.

El mantenimiento basado en condición o *Condition-Based Maintenance* (CBM) se ha consolidado como una alternativa para tomar decisiones sustentadas en información obtenida directamente del comportamiento de los activos, especialmente cuando se utilizan técnicas capaces de proporcionar datos confiables con una relación costo-beneficio favorable, en organizaciones que se encuentran en etapas iniciales de implementación resulta conveniente priorizar métodos de alto impacto y costos relativamente bajos, fortaleciendo primero la disciplina en la recolección y calidad de los datos antes de incorporar tecnologías de mayor complejidad (Tiddens et al., 2023), bajo este criterio, el análisis de aceite constituye una herramienta pertinente debido a que permite monitorear variables asociadas con desgaste, contaminación y condición del lubricante mediante una técnica ampliamente utilizada y con menores requerimientos de inversión frente a sistemas más complejos de monitoreo continuo, además, la obtención de resultados tempranos puede facilitar la aceptación del personal y el respaldo de la administración para avanzar posteriormente hacia un sistema predictivo más amplio.

Diversos trabajos aplicados en flotas de equipos pesados respaldan los beneficios de esta aproximación, Campos y Llanos (2023) documentaron que la combinación de rutinas estandarizadas, priorización de activos críticos y utilización sistemática de información sobre la condición de los equipos permitió mejorar la disponibilidad y la productividad de una flota de camiones de acarreo, además de reducir la variabilidad en la ejecución del mantenimiento, estos resultados guardan relación con la estrategia propuesta para priorizar los vehículos de mayor criticidad y desarrollar sobre ellos un monitoreo tribológico disciplinado, especialmente en condiciones de operación severa donde la degradación del lubricante puede acelerar el desgaste de los componentes, de manera similar, Alavedra et al. (2016) reportaron mejoras en la disponibilidad de camiones mineros Komatsu al complementar las actividades preventivas con análisis periódico de fluidos y criterios de criticidad, lo que evidencia que el mantenimiento basado en condición puede contribuir al desempeño de flotas sometidas a altos niveles de exigencia cuando se integra de manera estructurada con las estrategias de mantenimiento existentes.

4.2 Marco Conceptual

Para evitar ambigüedades y asegurar una comprensión uniforme, a continuación, se definen los términos técnicos principales utilizados en este proyecto, con base en literatura especializada y normas vigentes.

4.2.1 Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo es considerado como una estrategia de mantenimiento que utiliza técnicas de monitoreo de condición para predecir el momento óptimo de realizar intervenciones (García et al., 2025). En lugar de seguir un calendario fijo o mantenimiento preventivo tradicional, el mantenimiento predictivo se basa en datos reales del estado del equipo

para decidir cuándo intervenir (El Hammoumi et al., 2025). Además, su objetivo es anticipar fallas incipientes y evitar paradas no programadas, optimizando a la vez la vida útil de los activos y los costos de mantenimiento (Benhanifia, 2025). En la práctica, incluye técnicas como análisis de aceite, análisis de vibraciones, ultrasonido, termografía, entre otras, aplicadas de forma periódica o continua.

4.2.2 Análisis de Aceite Lubricante

El análisis de aceite de lubricante es una técnica de diagnóstico tribológico que consiste en estudiar muestras de aceite lubricante generalmente usado en laboratorio, para evaluar su condición y la del equipo del cual proviene (Wakiru et al., 2018). El análisis de aceite típico incluye medir contaminantes (partículas metálicas de desgaste, presencia de agua, combustible diluido y hollín), parámetros fisicoquímicos (la viscosidad a distintas temperaturas, índice de acidez o TAN, índice base o TBN y aditivos remanentes) e indicadores de degradación (oxidación y nitración) (Gołębiowski et al., 2024). Esta práctica forma parte de la lubricación proactiva y es un pilar del mantenimiento basado en condición, pues permite inferir el desgaste interno y la salud del equipo sin desarmar componentes, por ejemplo, alta concentración de hierro en el aceite indica desgaste de componentes ferrosos (Han et al., 2023).

4.2.3 Confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad de que un activo desempeñe su función requerida, bajo condiciones operativas definidas y durante un período de tiempo determinado, sin incurrir en fallas (O'Connor & Kleyner, 2012). La confiabilidad es un atributo clave en gestión de activos, y está directamente relacionada con la efectividad del mantenimiento (Parra et al., 2024), es decir, mayor confiabilidad implica menos fallas inesperadas. Según la norma ISO 14224

(2016), la confiabilidad y otros indicadores, como la disponibilidad y mantenibilidad, deben medirse y gestionarse mediante datos estructurados de fallas y reparaciones.

4.2.4 Criticidad Operacional

La criticidad operacional es la valoración de la importancia relativa de un equipo dentro del sistema o proceso productivo, considerando las consecuencias de su falla (Crespo et al., 2015). Un análisis de criticidad suele clasificar los activos en niveles (alto, medio y bajo) en función del impacto que tendría su indisponibilidad en criterios como la seguridad, el ambiente, la producción y los costos (Crespo et al., 2015). Herramientas como el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF/FMEA) o el Análisis RAM (Reliability, Availability, Maintainability) apoyan la determinación de criticidad (Aly et al., 2021). En este proyecto, la criticidad se usará para enfocar el plan predictivo en los vehículos cuya falla sería más perjudicial para la operación.

4.2.5 Análisis RAM

El análisis RAM es una metodología de ingeniería de confiabilidad que evalúa el desempeño de sistemas técnicos en términos de Confiabilidad (R), Disponibilidad (A) y Mantenibilidad (M). Un análisis RAM cuantifica la probabilidad de falla de componentes, el tiempo que el sistema está disponible para operar y la rapidez con que puede repararse tras una falla. Esta herramienta permite identificar cuellos de botella en términos de confiabilidad y orientar mejoras de mantenimiento hacia donde más se necesiten.

4.2.6 Modo de Falla y Efecto

El modo de falla y efecto (FMEA/AMEF) es una técnica sistemática para analizar potenciales modos de falla de un sistema, las causas y efectos de cada falla, y su detectabilidad. En mantenimiento predictivo, el FMEA ayuda a relacionar cada parámetro monitoreado con los modos de falla que puede detectar. Por ejemplo, un aumento de partículas de cobre en el aceite

es detectable y corresponde a un modo de falla de desgaste de cojinetes; el efecto podría ser baja presión de lubricación y daño del motor si no se atiende. Este plan incorporará un enfoque de AMEF para asegurar que las señales del análisis de aceite se traduzcan en acciones frente a modos de falla específicos.

4.2.7 Unidad de Bombeo Mecánico Convencional

Unidad de Bombeo Mecánico Convencional (UBM) es un término del ámbito petrolero que refiere a un sistema mecánico de levantamiento artificial, comúnmente denominado caballito o pump Jack, usado para extraer crudo. Se menciona este concepto para contexto, ya que parte del trabajo de la flota en campo Nare es dar soporte a mantenimiento de equipos de subsuelo como las UBM; sin embargo, el alcance de la monografía se limita a la flota vehicular, no a las UBM en sí.

4.3 Estado del Arte

El mantenimiento predictivo aplicado a flotas vehiculares industriales ha adquirido una importancia creciente debido a su capacidad para anticipar fallas, optimizar intervenciones y mejorar la disponibilidad de los equipos, dentro de este campo, diferentes investigaciones han analizado el comportamiento del lubricante como una fuente de información sobre la condición interna de motores y otros sistemas mecánicos, así como el uso de sensores y técnicas de monitoreo para apoyar decisiones de mantenimiento, por esta razón, la revisión de estas experiencias permite identificar referentes útiles para la estructuración del plan propuesto para la flota vehicular del campo Nare.

Olivares et al. (2016) desarrollaron una metodología para evaluar el estado del aceite lubricante de motores de combustión interna mediante ensayos tribológicos controlados, para ello compararon un aceite multigrado SAE 20W-50 nuevo y usado a diferentes kilometrajes de

operación, correspondientes a 0, 1.000, 5.000 y 8.500 km, analizando propiedades como viscosidad, índice dieléctrico, resistencia de la película lubricante y contenido de partículas de desgaste, los resultados mostraron que hasta aproximadamente 5.000 km el aceite conservaba sus propiedades dentro de límites permisibles, mientras que a partir de este punto comenzaron a evidenciarse señales de degradación y aumento del desgaste, estos hallazgos muestran que los intervalos de cambio pueden ajustarse de acuerdo con la condición real del lubricante y no únicamente con base en el kilometraje acumulado, criterio que resulta pertinente para definir frecuencias de muestreo sustentadas en evidencia de degradación.

Por su parte, Domínguez et al. (2018) analizaron el comportamiento del lubricante Extra-Diésel 15W-40 en motores Yuchai utilizados en ómnibus de transporte público en Cuba, considerando variables como viscosidad, contenido de agua, punto de inflamación y reserva alcalina durante diferentes periodos de uso, los resultados indicaron que el aceite mantenía condiciones adecuadas hasta los 8.000 km, con valores de viscosidad dentro del rango permitido y una disminución progresiva de la reserva alcalina sin comprometer la protección del motor, a partir de estos resultados, los autores establecieron que el lubricante podía extender su utilización hasta aproximadamente 10.000 km siempre que se mantuviera el monitoreo de sus parámetros, lo que evidencia que el análisis periódico del aceite puede contribuir a determinar intervalos de cambio más ajustados a las condiciones reales de operación, reducir costos y disminuir la generación innecesaria de residuos.

Desde una perspectiva tecnológica, Ortiz et al. (2020) propusieron un enfoque de mantenimiento predictivo para vehículos basado en la medición en tiempo real de la rigidez dieléctrica y la temperatura del aceite del motor, para ello desarrollaron un sensor prototipo capaz de monitorear continuamente estas variables y relacionarlas con la condición del

lubricante, este tipo de sistema permite identificar alteraciones como disminuciones anormales de la rigidez dieléctrica asociadas con contaminación o incrementos de temperatura que pueden advertir sobre problemas de refrigeración o aumento de la fricción interna, aunque la incorporación de sensores de monitoreo continuo no constituye el objetivo inmediato del presente proyecto, este antecedente muestra una posible línea de evolución futura hacia soluciones de Internet de las Cosas (IoT) y monitoreo en tiempo real, para las cuales resulta necesario contar previamente con una base histórica confiable de información sobre el comportamiento de los lubricantes.

Sosa y Herrera (2023) realizaron una revisión bibliográfica sobre la evolución del mantenimiento automotriz mediante la comparación de los enfoques correctivo, preventivo y predictivo, destacando que este último permite orientar las intervenciones de acuerdo con la condición observada de los equipos y no exclusivamente mediante intervalos predeterminados, los autores señalan que el desarrollo de sensores, sistemas telemáticos y herramientas de análisis de datos ha ampliado las posibilidades de monitorear variables como temperatura, vibraciones y condición del aceite para detectar señales de deterioro antes de que se produzcan fallas funcionales, asimismo, identifican beneficios relacionados con la reducción de costos, el aumento de la disponibilidad y el fortalecimiento de la seguridad operacional al disminuir la ocurrencia de fallas inesperadas, aspectos que respaldan la aplicación de estrategias predictivas dentro de flotas sometidas a condiciones exigentes de operación.

En conjunto, los antecedentes revisados muestran que el análisis de lubricantes y otras técnicas de monitoreo de condición pueden contribuir a mejorar la eficiencia del mantenimiento en flotas vehiculares al proporcionar información objetiva sobre el estado real de los componentes, además, las experiencias analizadas evidencian que la utilidad de estas estrategias

depende de la aplicación sistemática de procedimientos de muestreo, seguimiento de tendencias, definición de límites de intervención y articulación de los resultados con las decisiones de mantenimiento, en este sentido, el plan propuesto para la flota del campo Nare retoma estos aportes para estructurar un esquema de monitoreo tribológico orientado inicialmente hacia los activos de mayor criticidad, con posibilidades de ampliación progresiva hacia otras tecnologías predictivas a medida que se fortalezca la gestión de información y la madurez del sistema de mantenimiento.

4.4 Marco Legal

El marco legal aplicable a la operación de la flota vehicular de Ecopetrol – Campo Nare abarca normativas de tránsito, estándares nacionales de mantenimiento y lineamientos corporativos de gestión de activos. A continuación, se presenta los más relevantes.

4.4.1 Obligaciones Legales de Mantenimiento Vehicular

La Ley 769 de 2002 (Código Nacional de Tránsito Terrestre de Colombia), en su Artículo 50, establece que “el propietario o tenedor de un vehículo deberá mantenerlo en óptimas condiciones mecánicas, ambientales y de seguridad”. Esto implica una responsabilidad legal de ejecutar mantenimientos adecuados para garantizar que los camiones operen de forma segura y con emisiones dentro de norma. El plan propuesto, al mejorar la confiabilidad mecánica y anticipar fallas, contribuye directamente a dar cumplimiento a esta obligación legal de seguridad vial y protección ambiental.

4.4.2 Revisión Técnico-Mecánica de Emisiones

En Colombia, la norma NTC 5375-2:2024 regula los requisitos que deben cumplir los vehículos livianos y pesados en las revisiones técnico-mecánicas periódicas, incluyendo emisiones contaminantes, realizadas por los Centros de Diagnóstico Automotor autorizados. Esta

norma exige inspecciones de sistemas vitales (frenos, dirección y suspensión) y mide parámetros de emisiones. Un mantenimiento predictivo eficiente ayuda a que los vehículos superen tales inspecciones al prevenir condiciones mecánicas deficientes. Por ejemplo, el análisis de aceite puede indicar combustión deficiente (presencia de fuel soot) que se correlaciona con emisiones excesivas, permitiendo corregir problemas antes de la revisión oficial. Así, el plan tribológico apoya indirectamente el cumplimiento de la reglamentación ambiental y técnico-mecánica nacional, asegurando que la flota esté en condiciones óptimas en todo momento.

4.4.3 Gestión de Activos y Confiabilidad

Ecopetrol, como empresa de clase mundial, sigue lineamientos de gestión de activos físicos. La ISO 55000 de 2014 proporciona principios para alinear el mantenimiento con la creación de valor y la gestión del riesgo a lo largo del ciclo de vida de los activos. El plan propuesto se enmarca en estos principios, ya que prioriza las intervenciones de mantenimiento donde aportan más valor (equipos críticos) y basa las decisiones en información objetiva de condición, lo que reduce la incertidumbre en la gestión de riesgos operativos. Por su parte, la ISO 14224 de 2016 establece las mejores prácticas para la recopilación y análisis de datos de confiabilidad y mantenimiento, incluyendo definiciones estandarizadas de fallas, paradas y reparaciones. Adoptar esta norma en el registro de datos tribológicos y eventos de mantenimiento facilitará la comparación de períodos, la identificación de tendencias y la evaluación de la efectividad del plan predictivo. En otras palabras, si se sigue ISO 14224 en la codificación de fallas y en la estructura de la base de datos de mantenimiento, será más sencillo comprobar si la implementación del análisis de aceite reduce la tasa de fallas o extiende el MTBF, con datos estadísticamente confiables. El cumplimiento de estas normas mejora la gobernanza de los datos

de mantenimiento y asegura que el plan tribológico tenga legitimidad técnica y financiera dentro de la organización.

4.4.4 Normativas Técnicas Internas y Sectoriales

Ecopetrol cuenta con manuales internos de mantenimiento y políticas de confiabilidad que fomentan la mejora continua. Adicionalmente, referentes internacionales como la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) y organizaciones de tribología (STLE) publican guías para el análisis de lubricantes y monitoreo de condición. El presente plan considera tales lineamientos: por ejemplo, se tomará como referencia la norma ISO 4406 de 2021 para la codificación de la limpieza del aceite (conteo de partículas) en las muestras, asegurando que el laboratorio tribológico reporte resultados según estándares internacionales. Esto permitirá comparar la limpieza del aceite de los camiones Nare con referencias globales o con otros campos de Ecopetrol.

En general, el marco legal y normativo respalda y orienta el plan de mantenimiento predictivo mediante análisis de aceite. Al cumplir las leyes nacionales y ajustarse a las normas internacionales de mantenimiento, el plan ganará aceptación institucional y podrá ser auditado o escalado en un futuro, garantizando su sostenibilidad dentro de la operación de Ecopetrol.

5. Alcance y Resultados

5.1 Alcance de la Investigación

El presente proyecto se circunscribe al diseño de un plan de mantenimiento predictivo por análisis de aceite para la flota de vehículos de Ecopetrol en el campo Nare. Esto incluye específicamente los camiones pesados de operación (vacío, lubricadores, cisterna, brazo-grúa y bomberos) que brindan soporte a las áreas de mantenimiento de campo, producción y HSE⁶ en dicho activo. No se abarcan otros activos operativos (maquinaria fija, equipos de subsuelo, entre otros), ni flotas de otros campos o sedes de Ecopetrol. El estudio cubre desde la recopilación de datos históricos de fallas de estos vehículos, el análisis de su mantenimiento actual y la elaboración de la propuesta de plan predictivo, hasta la definición de los recursos necesarios para implementarlo y un cronograma técnico de implementación. No incluye la ejecución real del plan ni la medición de resultados post-implementación, pues su alcance es de planeación y diseño. El horizonte temporal considerado para desarrollar el proyecto es de aproximadamente 12 semanas (ver sección de cronograma), dentro de las cuales se desarrollarán las fases metodológicas descritas (diagnóstico e investigación bibliográfica, diseño del plan, evaluación de impactos y documentación final).

Durante el desarrollo de la investigación se realizarán las siguientes actividades clave dentro del alcance:

Recopilación y análisis de datos históricos de mantenimiento de la flota (últimos 2–3 años).

⁶ Seguridad, Salud en el Trabajo y Medio Ambiente

Revisión bibliográfica de al menos 20 fuentes entre normas, artículos, tesis y manuales técnicos relacionados con mantenimiento predictivo y tribología aplicada.

Diseño del plan tribológico: definición de cómo se realizaría el muestreo de aceite en la flota Nare, con qué herramientas, a qué intervalos y qué laboratorio/herramientas de análisis se usarían.

Integración del plan: adaptación de los hallazgos al sistema de mantenimiento actual de Ecopetrol, por ejemplo, verificar compatibilidad con SAP Plant Maintenance en cuanto a registro de análisis, etc.

Delimitación: El plan resultante será una propuesta teórica y técnica; la implementación práctica dependerá de aprobaciones posteriores. Sin embargo, se preparará un conjunto completo de entregables que facilite a Ecopetrol su futura puesta en marcha.

5.2 Resultados Esperados

Al finalizar la monografía, se espera obtener varios productos orientados a fortalecer la gestión del mantenimiento de la flota del activo Nare, cada uno de ellos responde a una etapa específica del análisis y busca aportar información útil para sustentar la propuesta de mantenimiento predictivo basada en condición.

Informe diagnóstico de fallas de la flota. Se elaborará un documento que permita identificar las fallas más frecuentes registradas en los diferentes vehículos, los equipos que concentran el mayor número de incidencias, los tiempos promedio de reparación y, cuando la información disponible lo permita, las causas probables asociadas con dichas fallas, este diagnóstico incluirá tablas, gráficos e indicadores de apoyo, entre ellos diagramas de Pareto, con el propósito de establecer cuáles activos y sistemas requieren mayor atención y justificar técnicamente la priorización utilizada en el diseño del plan predictivo.

Análisis del plan de mantenimiento actual. Se realizará una revisión del esquema de mantenimiento preventivo vigente para la flota del activo Nare con el fin de determinar su correspondencia con las condiciones operativas actuales, las recomendaciones de los fabricantes y las prácticas técnicas identificadas en la literatura, este análisis permitirá reconocer posibles brechas relacionadas con frecuencias de intervención, ausencia de tareas de monitoreo de condición o actividades que puedan fortalecerse, generando una relación de oportunidades de mejora que servirá como base para la formulación del nuevo plan.

Informe de revisión bibliográfica y técnica. Se consolidará una síntesis de los principales referentes académicos, técnicos y normativos relacionados con mantenimiento predictivo, análisis tribológico, mantenimiento basado en condición, confiabilidad y gestión de activos, este documento permitirá identificar experiencias aplicadas en flotas vehiculares y equipos pesados, resultados reportados, criterios de muestreo, parámetros de análisis y prácticas de mantenimiento que puedan servir como fundamento para las decisiones adoptadas en la propuesta.

Propuesta de Plan de Mantenimiento Predictivo. Este constituirá el producto principal de la monografía y estará conformado por un documento técnico en el que se definirán los objetivos, alcance, vehículos priorizados, procedimientos de muestreo de aceite, parámetros de análisis, frecuencias recomendadas, criterios de interpretación y niveles de intervención, además, se establecerán los ajustes propuestos al plan preventivo actual, los recursos requeridos, los roles y responsabilidades, las necesidades de capacitación y los indicadores de desempeño que permitirán realizar seguimiento a su implementación, procurando que la propuesta pueda articularse con los procesos existentes de gestión de mantenimiento de Ecopetrol.

Cronograma de implementación. Como complemento del plan, se diseñará un cronograma tentativo que permita organizar las actividades necesarias para una posible

implementación progresiva, considerando etapas como socialización, capacitación, selección de activos piloto, inicio del muestreo, seguimiento de resultados, ajustes metodológicos y eventual ampliación del programa, este cronograma podrá estructurarse mediante una herramienta tipo Gantt y se planteará como una guía de referencia cuya duración definitiva deberá ajustarse a las condiciones operativas y administrativas de la organización.

Análisis de viabilidad y beneficios esperados. Finalmente, se desarrollará una evaluación de los beneficios potenciales asociados con la implementación del plan, considerando aspectos como reducción de fallas imprevistas, optimización de los intervalos de cambio de lubricante, disminución de tiempos de indisponibilidad y posibles ahorros en mantenimiento, debido a que la monografía no contempla una implementación prolongada que permita comprobar estos efectos con datos reales, los beneficios se presentarán como estimaciones sustentadas en los resultados del diagnóstico, la revisión bibliográfica y el análisis costo-beneficio proyectado, evitando atribuir mejoras definitivas antes de que el plan sea aplicado y evaluado en condiciones reales de operación.

6. Plan de Trabajo

6.1 Metodología

El diseño metodológico se ha estructurado en cuatro fases secuenciales, coherentes con los objetivos específicos planteados. Se adopta un enfoque de investigación aplicado y descriptivo, dado que el propósito es desarrollar una solución práctica (un plan de mantenimiento) basada en el análisis de la situación actual y la aplicación de mejores prácticas de la industria, sin experimentar con variables independientes en un ambiente controlado. A continuación, en la Tabla 1 se describen las fases de la metodología, las estrategias de abordaje en cada una, los resultados esperados de cada etapa y los entregables correspondientes.

Tabla 1

Fases del Proyecto y Descripción Detallada

Fase	Objetivo Específico asociado	Descripción de la Fase	Actividades Principales	Entregables
Fase 1 Diagnóstico análisis criticidad	– y de OE 1	Se recopila y analiza la información histórica de mantenimiento para identificar fallas recurrentes, sistemas críticos y modos de falla predominantes.	Revisión de registros de fallas, órdenes de trabajo y tiempos de reparación. Entrevistas con personal técnico. Tablas de frecuencia, análisis Pareto. Evaluación de criticidad (consecuencia vs. probabilidad). Establecimiento de líneas base:	Informe diagnóstico de fallas. Ranking de criticidad de vehículos y sistemas. Indicadores actuales de desempeño (Disponibilidad, MTBF y MTTR).

Fase	Objetivo Específico asociado	Descripción de la Fase	Actividades Principales	Entregables
Fase 2 – Revisión bibliográfica y benchmarking	OE 2 (parcial)		disponibilidad, MTBF, MTTR. Búsqueda en artículos, tesis, normas, documentos técnicos.	
		Se efectúa una revisión profunda de literatura técnica y casos de estudio sobre análisis de lubricantes, fallas vehiculares y mantenimiento predictivo.	Benchmarking de planes predictivos en empresas de transporte, petróleo y minería. Revisión de recomendaciones de fabricantes sobre análisis de fluidos.	Documento de revisión bibliográfica actualizado. Síntesis de mejores prácticas. Benchmarking y lecciones aplicables para el campo Nare.
			Identificación de mejores prácticas y tecnologías aplicables. Definición de puntos de muestreo por tipo de vehículo.	
Fase 3 – Definición del plan tribológico	OE 2 (completado)	2 Se diseña el plan de análisis de aceite: puntos de muestreo, métodos, parámetros, frecuencias y límites de alarma con soporte normativo.	Procedimientos estandarizados de toma de muestras.	Manual técnico del Plan de Análisis de Aceite.
			Definición de frecuencias según criticidad/uso. Selección de parámetros: metales por espectrometría, ISO 4406, Karl Fischer, viscosidad, TAN/TBN, FTIR, glicol, oxidación y	Tablas de parámetros y límites de alarma. Cronograma inicial de muestreos.

Fase	Objetivo Específico asociado	Descripción de la Fase	Actividades Principales	Entregables
			nitación.	
			Establecimiento de umbrales (alerta/alarma) con base en ASTM, ISO y fabricante.	
			Formulación de criterios de intervención basados en condición.	
Fase 4 – Diseño del plan de mantenimiento por condición	OE 3	Integración del plan tribológico con criterios de intervención, matriz de decisiones y lógica FMEA para motores, transmisiones y sistemas hidráulicos.	Conexión entre señales tribológicas y acciones de mantenimiento.	Documento completo del Plan de Mantenimiento Predictivo.
			Análisis FMEA de modos de falla lubricados (cojinetes, corrosión, sedimentos).	Matriz de criterios de acción.
			Ajuste de actividades preventivas según comportamiento real.	Listado de actividades predictivas y ajustes al plan maestro.
Fase 5 – Evaluación de resultados esperados e implementación	OE 4	Se proyectan los beneficios esperados del plan y se establece la ruta para implementar y medir la mejora futura del mantenimiento predictivo.	Integración del plan en SAP PM. Análisis de indicadores base (MTBF, MTTR, disponibilidad). Proyección de mejoras esperadas según literatura.	Sección de impacto esperado. Propuesta de indicadores y método de evaluación.
			Diseño de hoja de ruta de implementación	Recomendaciones para implementación

Fase	Objetivo Específico asociado	Descripción de la Fase	Actividades Principales	Entregables
			por etapas.	piloto y escalamiento.
			Recomendaciones de capacitación y cambio organizacional.	
			Definición del marco de seguimiento.	

Adicionalmente a las fases descritas, la metodología considera fuentes de información variadas para robustecer el estudio, como registros internos de mantenimiento de Ecopetrol, normas técnicas (ISO y ASTM) para guiar criterios, y la experiencia del personal de campo (ingenieros y técnicos) para conocer las particularidades operativas que podrían afectar el plan. No se realizarán experimentos controlados nuevos, sino que se integrará la información existente en un nuevo esquema de mantenimiento. Esto significa que la investigación es fundamentalmente de tipo documental y de campo por la recopilación de datos internos, pero no experimental. Para resumir visualmente la metodología y garantizar la trazabilidad con los objetivos, se presenta en la Tabla 2 la estructura de fases vs. Objetivos.

Tabla 2

Objetivos, Estrategias y Entregables del Proyecto

Objetivo	Estrategia	Entregable
Objetivo 1: Identificar componentes críticos de la flota	• Análisis de registros históricos de mantenimiento. • Revisión de incidencias de fallas y tiempos de reparación. • Cálculo de disponibilidad actual y comportamiento de MTBF/MTTR.	• Informe diagnóstico de fallas recurrentes. • Ranking de vehículos y sistemas críticos. • Valores base de MTBF y MTTR.
Objetivo 2: Revisar las soluciones predictivas en la industria	• Búsqueda, selección y análisis de literatura especializada. • Benchmarking de casos relevantes en industria automotriz, petróleo, minería y transporte.	• Informe de revisión bibliográfica. • Recomendaciones sobre análisis de aceite (pruebas

Objetivo	Estrategia	Entregable
Objetivo 2: (continuación): Proponer alternativas tribológicas de monitoreo	• Identificación de mejores prácticas aplicables al contexto Nare. • Estudio comparativo de metodologías de análisis de aceite usadas en la industria. • Evaluación de técnicas: espectrometría, ISO 4406, FTIR, viscosidad, TBN/TAN, Karl Fischer, etc. • Definición preliminar de puntos de muestreo, parámetros y frecuencias. • Integración de alternativas tribológicas y criterios técnicos.	efectivas, frecuencias usadas y parámetros de alerta). • Documento del plan tribológico propuesto. • Mapa de puntos de muestreo por sistema. • Tabla de parámetros y frecuencias recomendadas.
Objetivo 3: Elaborar el plan de mantenimiento por condición	• Desarrollo del cronograma de actividades predictivas. • Definición de criterios de intervención y reglas de decisión (alarma/acción). • Articulación del plan con procesos internos (SAP PM).	• Plan completo de mantenimiento predictivo. • Matriz de criterios de acción. • Cronograma detallado e integración a procesos institucionales.
Objetivo 4: Valorar impactos en confiabilidad	• Análisis narrativo del impacto esperado en indicadores clave (disponibilidad, MTBF, MTTR). • Alineación de impactos con objetivos e hipótesis del proyecto. • Preparación del plan de verificación futura e indicadores a monitorear.	• Sección de impacto esperado. • Lista de indicadores de seguimiento post-implementación. • Conclusiones finales del proyecto.

Es importante resaltar que la metodología definida mantiene una línea lógica con los objetivos específicos y el alcance de la investigación. Cada fase produce información o un producto intermedio que alimenta la siguiente fase, asegurando cohesión. Por ejemplo, el diagnóstico inicial (OE1) provee la base para diseñar el plan tribológico (OE2), y este a su vez es insumo para construir el plan de mantenimiento final (OE3). La última fase cierra el ciclo relacionando los resultados esperados con el problema planteado al inicio. Asimismo, la metodología propuesta es realista en cuanto a recursos y tiempo (ver sección 8) y evita depender de variables fuera de control, por ejemplo, no se condiciona a realizar costosas pruebas de laboratorio no disponibles; en cambio, se aprovecharán laboratorios existentes. De esta forma, la investigación se enfoca en entregar un producto aplicable y con sustento técnico, más que en un experimento teórico.

7. Impacto Esperado

El impacto esperado del plan de mantenimiento predictivo propuesto puede analizarse desde cuatro dimensiones complementarias: operativa, técnico-organizacional, seguridad y ambiente, y aprendizaje institucional, las cuales permiten comprender de manera integral los posibles efectos de incorporar el análisis tribológico como herramienta para orientar decisiones de mantenimiento basadas en la condición real de los vehículos.

Impacto operativo. Desde el punto de vista operacional, la detección temprana de condiciones anormales en el lubricante puede facilitar la programación de intervenciones antes de que se produzcan fallas funcionales de mayor criticidad, permitiendo que determinadas reparaciones, inspecciones o ajustes se realicen durante ventanas de mantenimiento previamente planificadas y disminuyendo la necesidad de retirar vehículos del servicio de manera imprevista, asimismo, disponer de información periódica sobre la condición de motores, transmisiones y sistemas hidráulicos puede favorecer una mejor planeación de los recursos de respaldo y la redistribución de tareas cuando se identifique que un vehículo requiere intervención, por esta razón, una eventual implementación del plan podría reflejarse en mejoras progresivas de indicadores como la disponibilidad mecánica y el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), aunque la magnitud de estos cambios deberá comprobarse posteriormente mediante datos reales de operación.

Impacto técnico-organizacional. La propuesta también puede contribuir a fortalecer la incorporación del mantenimiento basado en condición dentro de los procesos habituales de la organización, debido a que las decisiones dejarían de depender exclusivamente de intervalos establecidos por calendario, kilometraje u horas de servicio y podrían complementarse con

evidencia obtenida mediante los análisis de aceite, esta información permitiría mejorar la trazabilidad de las intervenciones, sustentar técnicamente las órdenes de trabajo y construir un historial más detallado sobre el comportamiento de cada activo, además, la integración de los resultados tribológicos con herramientas de gestión como SAP PM facilitaría el seguimiento de tendencias, el ajuste de frecuencias de mantenimiento y la priorización de recursos de acuerdo con la condición observada, fortaleciendo una gestión basada en datos y coherente con los principios de gestión de activos establecidos en referentes como ISO 55000.

Impacto en seguridad, continuidad operativa y ambiente. La identificación anticipada de condiciones de deterioro en componentes críticos puede contribuir a disminuir la probabilidad de fallas súbitas que afecten la seguridad de los trabajadores o la continuidad de actividades esenciales, aspecto especialmente relevante en vehículos destinados a respuesta ante emergencias, transporte de fluidos, sistemas de izaje y otras operaciones críticas, además, la posibilidad de programar las intervenciones reduce la necesidad de realizar reparaciones inesperadas en campo y bajo condiciones de presión operativa, lo que puede disminuir la exposición del personal de mantenimiento a situaciones de mayor riesgo, desde la dimensión ambiental, la optimización de los intervalos de cambio de lubricante puede contribuir a reducir la generación innecesaria de aceite usado, mientras que la prevención de fallas mayores puede disminuir la probabilidad de derrames, fugas o emisiones asociadas con averías severas, de esta manera, el plan puede apoyar los objetivos de seguridad, salud y ambiente de la organización.

Impacto en el aprendizaje institucional. Otro efecto esperado corresponde al fortalecimiento del conocimiento técnico dentro de la organización mediante la documentación de procedimientos de muestreo, criterios de interpretación, límites de intervención y resultados de condición, debido a que esta información puede convertirse en material de consulta y

capacitación para ingenieros, técnicos y personal operativo, asimismo, la aplicación progresiva del plan permitiría desarrollar competencias relacionadas con toma de muestras, lectura de informes de laboratorio, seguimiento de tendencias y toma de decisiones basada en evidencia, generando una base documental y metodológica que podría ser adaptada posteriormente a otros activos de Ecopetrol, en este sentido, el proyecto tiene potencial para funcionar como una experiencia inicial que facilite la expansión gradual de prácticas predictivas y contribuya a la mejora continua del mantenimiento automotriz dentro de la organización.

Para valorar los efectos de una futura implementación se propone realizar seguimiento a indicadores como la disponibilidad mecánica de la flota, con el propósito de identificar cambios en los tiempos de indisponibilidad no planificada, el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), para evaluar la evolución de la confiabilidad de los vehículos, y el Tiempo Medio de Reparación (MTTR), con el fin de determinar si la detección temprana de condiciones anormales contribuye a reducir la duración de las intervenciones, asimismo, podrán compararse el número anual de fallas mayores asociadas con motores, transmisiones y sistemas hidráulicos, junto con los costos de mantenimiento antes y después de la implementación, incluyendo los posibles ahorros derivados de la prevención de daños mayores y de la optimización de los cambios de lubricante.

Debido a que la monografía se concentra en el diseño del plan y no contempla una implementación prolongada que permita comprobar sus efectos en condiciones reales, no resulta adecuado establecer previamente metas numéricas definitivas de mejora para estos indicadores, por esta razón, el aporte inmediato del proyecto se encuentra en definir una propuesta técnicamente sustentada, establecer una línea base y diseñar los mecanismos que permitan evaluar posteriormente su desempeño, mientras que el impacto real deberá determinarse

mediante la comparación entre los indicadores obtenidos antes y después de la implementación del plan en la flota del activo Nare.

El plan de mantenimiento predictivo propuesto tiene con meta mejorar a corto plazo los indicadores claves de desempeño de la gestión de mantenimiento en la gerencia de operaciones y mantenimiento Catenare y va a estar alineado con el proceso de gestión de activos de Ecopetrol S.A, con el propósito de incrementar la vida útil y valor comercial de los camiones que hacen parte de la flota vehicular de campo Nare.

8. Cronograma y Plan de Trabajo

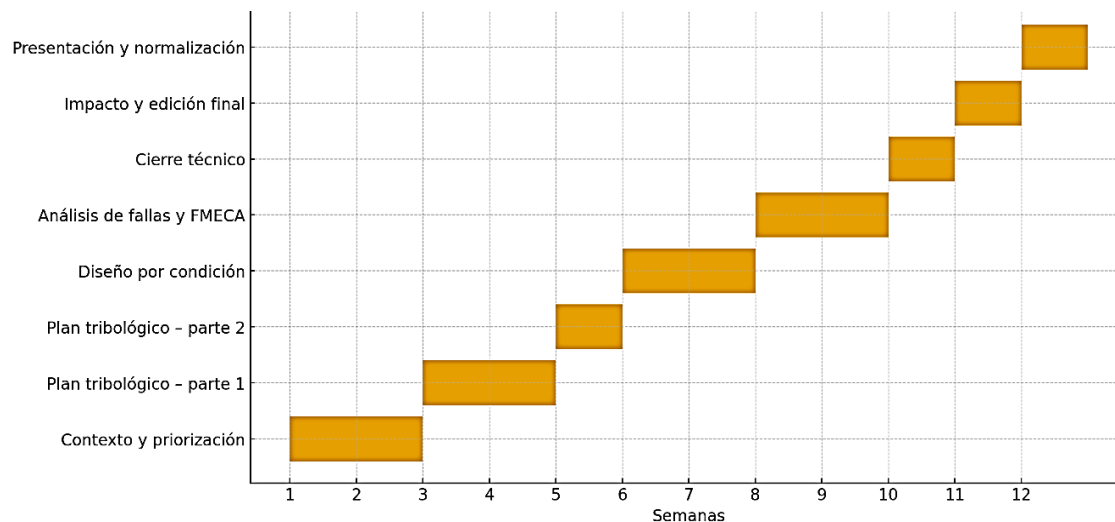
El plan de trabajo se desarrollará a lo largo de 12 meses, siguiendo la secuencia lógica de fases metodológicas y objetivos descritos. A continuación, se presenta en la Tabla 3 y la Figura 2 el cronograma tentativo, indicando las actividades principales por semana.

Tabla 3

Cronograma de actividades

Semanas	Fase/Objetivo Específico	Actividades Principales	Enfoque	Hito/Entregable
1–2	Fase de contexto y priorización (OE 1)	Levantamiento de información interna (fallas, historial de mantenimiento). Entrevistas con personal clave.	Comprender el estado actual y priorizar sistemas lubricados con mayor impacto en disponibilidad.	Diagnóstico de fallas y listado de equipos críticos completado.
3–4	Plan tribológico – Parte 1 (OE 2)	Análisis preliminar de criticidad. Definir puntos de muestreo de aceite por vehículo y sistema. Contacto con laboratorio aliado (ExxonMobil). Revisión de normas ASTM/ISO aplicables.	Seleccionar parámetros clave para el análisis tribológico (desgaste, contaminación, propiedades del fluido).	Documento borrador con puntos de muestreo y parámetros por equipo.
5	Plan tribológico – Parte 2 (OE 2)	Definir frecuencias de muestreo según criticidad/severidad. Establecer criterios para revisión de tendencias.	Ajustar frecuencias de muestreo al uso real del equipo, evitando datos redundantes o lapsos excesivos.	Plan tribológico completo listo para integrar al plan general.
6–7	Diseño por condición (OE 3)	Formular criterios de intervención y	Convertir señales del análisis de aceite en acciones de	Listado final de criterios de intervención y

Semanas	Fase/Objetivo Específico	Actividades Principales	Enfoque	Hito/Entregable
8–9	Análisis de fallas y FMECA (OE 3 – complemento)	reglas de decisión.	mantenimiento aplicables y coherentes con procesos internos.	acciones correspondientes.
		Alinear criterios con flujos internos de Ecopetrol (SAP, planeación).		
		Identificación y documentación de modos de falla relevantes (motor, transmisión, hidráulico).	Conectar hallazgos del análisis de aceite con causas, efectos y acciones preventivas/correctivas.	Sección AMFE/FMECA incluida y validada dentro del plan.
10	Fase de cierre técnico (OE 3–4)	Integración del análisis FMECA simplificado al plan. Integrar el diagnóstico, plan tribológico, criterios y AMFE en un solo documento.	Garantizar consistencia técnica y alineación con los objetivos planteados.	Borrador completo del Plan de Mantenimiento Predictivo.
		Verificar coherencia interna y correspondencia entre fallas y acciones. Redacción del impacto esperado.		
11	Fase de impacto y edición final (OE 4)	Revisión de coherencia global.	Asegurar que el documento refleje con claridad el aporte del plan y su alineación con los objetivos.	Documento casi final, con todas las secciones completas.
		Ajuste final de redacción e incorporación de retroalimentación. Revisión de estilo, ortografía y formato APA 7.		
12	Presentación y normalización	Ajustes formales institucionales.	Pulir la versión final con estándares académicos.	Monografía finalizada y lista para entregar/sustentar.
		Preparación de diapositivas para sustentación.		

Figura 2*Diagrama de Gantt del cronograma*

El cronograma anterior refleja un plan de trabajo realista para el período estimado. Cada bloque de semanas se alinea con un entregable concreto que permite hacer seguimiento al avance. Por ejemplo, al cabo de 4 semanas ya se debería contar con un diagnóstico sólido y un esquema inicial del plan tribológico; al cabo de 9 semanas ya tendría forma el plan predictivo completo pendiente solo de revisiones finales.

9. Recursos y Presupuesto

Para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto y elaborar el plan de mantenimiento predictivo propuesto, se han considerado los recursos necesarios en términos de personal, servicios técnicos, herramientas y logística. A continuación, en la Tabla 4 se detallan los principales rubros y su estimación de costos, sumando un presupuesto total aproximado de COP \$32.100.000 (treinta y dos millones cien mil pesos colombianos).

Tabla 4

Costos Estimados del Proyecto

Categoría		Descripción	Valor Estimado (COP)
Servicios de Laboratorio Tribológico		Contratación de laboratorio especializado (p. ej., ExxonMobil) para análisis de muestras: espectrometría, viscosidad, conteo de partículas, pruebas según el plan tribológico. Incluye paquetes de análisis para muestras piloto.	\$5.600.000
Consultoría y Apoyo Técnico Especializado		Asesoría puntual de experto externo en mantenimiento predictivo/automotriz; validación metodológica; apoyo en análisis de confiabilidad estadística; mentoría técnica durante el proceso.	\$7.000.000
Herramientas de Software y Gestión		Licencias o accesos temporales a software de análisis (confiabilidad, tribología, SAP PM, bases de datos académicas); herramientas digitales necesarias para el procesamiento y análisis de datos.	\$8.000.000
Papelería, materiales y útiles		Impresiones, formularios, etiquetas, recipientes para toma de muestras, EPP (guantes, gafas), y otros insumos menores operativos.	\$1.000.000
Viáticos y Desplazamientos		Viajes puntuales a laboratorios, reuniones con consultores, desplazamientos dentro del campo para recolección de muestras; incluye transporte, combustible y posibles alojamientos.	\$3.000.000
Mano de Obra Operarios y Colaboradores		Horas-hombre de técnicos, mecánicos y lubricadores dedicadas exclusivamente a muestreos piloto, capacitaciones y actividades del estudio.	\$5.000.000
Asesoría en Ingeniería de Mantenimiento		Consultas con especialistas del área de Ingeniería de Mantenimiento de Ecopetrol o asesores académicos (metodologías, confiabilidad, modelos estadísticos).	\$3.500.000
Total			\$32.100.000

En conclusión, el proyecto cuenta con un presupuesto bien fundamentado que cubre los aspectos técnicos (análisis, software y consultoría) y logísticos (materiales, traslados y tiempo de personal) necesarios. Esto asegura la viabilidad del estudio dentro del tiempo establecido, sin depender de recursos extraordinarios no contemplados. Además, la planificación financiera refuerza el compromiso de calidad: disponer de consultores y herramientas adecuadas contribuirá a que el plan final esté a la altura de estándares profesionales y académicos.

10. Equipo

El desarrollo exitoso de esta monografía requiere de un equipo humano multidisciplinario y del apoyo de aliados técnicos que aporten experiencia práctica. A continuación, se describen los roles y colaboradores clave que conforman el equipo de trabajo, así como los recursos de soporte disponibles:

Autor de la Monografía: El autor asumirá el rol de coordinador técnico del proyecto. Sus responsabilidades incluyen la recopilación y análisis de datos, el diseño metodológico del plan, la ejecución de la revisión bibliográfica y la redacción integral del documento. Con su formación en Ingeniería Automotriz, aplicará competencias en diagnóstico vehicular, confiabilidad y gestión de mantenimiento para guiar el proyecto. También será el enlace principal entre la academia y la empresa, asegurando que la solución propuesta cumpla tanto con el rigor académico como con la aplicabilidad en campo.

Director Académico de Monografía: El Ing. Jorge Luis Chacón brindará mentoría y supervisión metodológica. Con su trayectoria en mantenimiento automotor, asesorará en la validación de objetivos, en la estructura del marco teórico y en la coherencia metodológica. Participará en revisiones periódicas del avance, aportando retroalimentación para elevar el nivel académico y técnico del trabajo. Su rol garantiza que el proyecto se mantenga enfocado y que cumpla con los estándares requeridos por la Universidad.

Consultor Externo en Mantenimiento Automotriz y Confiabilidad: Se prevé la colaboración de un consultor profesional con amplia experiencia en mantenimiento de flotas y análisis de confiabilidad, por ejemplo, un especialista certificado en RCM o en análisis de lubricantes. Este consultor actuará como asesor técnico del proyecto, especialmente en la

interpretación de resultados de laboratorio, en la definición de umbrales adecuados y en la alineación del plan con prácticas de clase mundial. Su aporte ayudará a que el plan diseñado sea robusto y tenga altas probabilidades de éxito en la implementación.

Personal Operativo y Técnico de Campo: Alianza Catenare es la empresa aliada que opera el contrato macro de Operación y Mantenimiento en campo Nare para Ecopetrol. Su personal, incluyendo mecánicos, técnicos de mantenimiento y supervisores de flota, será fundamental para aportar el conocimiento práctico del día a día de los vehículos. Ellos facilitarán el acceso a los talleres y a los propios vehículos para inspección, compartirán la información histórica de mantenimiento (órdenes de trabajo y reportes de falla) y apoyarán en la recolección de muestras de aceite lubricante según las indicaciones del plan piloto. También participarán en la validación de los procedimientos propuestos, asegurando que sean realizables con los recursos y tiempos disponibles en campo. La colaboración estrecha con el equipo de Catenare garantiza que la propuesta esté aterrizada a la realidad operativa y cuente con la aceptación de quienes la ejecutarán.

Laboratorio Tribológico: Se contará con el apoyo del laboratorio especializado en análisis de lubricantes provisto por ExxonMobil u otro aliado estratégico de Ecopetrol para tribología. Este laboratorio aportará el soporte técnico en análisis de aceite, realizando las pruebas a las muestras recolectadas y entregando reportes detallados de resultados. Además, brindará asesoramiento en la interpretación de dichos reportes conforme a estándares internacionales. En particular, implementará el método estandarizado ISO 4406:2021 para codificar el nivel de contaminación por partículas en las muestras de aceite, asegurando así la consistencia y comparabilidad de los datos obtenidos. La participación del laboratorio es clave para obtener datos confiables y para entrenar al equipo interno en la comprensión de los análisis tribológicos.

Soporte de Ecopetrol – Gestión de Mantenimiento: Internamente, el proyecto contará con el respaldo del área de mantenimiento de Ecopetrol Campo Nare. Esto incluye el acceso al módulo de Mantenimiento de Planta (PM) del sistema SAP ERP productivo de Ecopetrol. A través de SAP se obtendrán los planes de mantenimiento actuales de los vehículos, los históricos de órdenes de trabajo, tiempos de indisponibilidad y tasas de falla de los diferentes camiones de la flota. El personal de planeación de mantenimiento de Ecopetrol colaborará para extraer esta información y para incorporar al sistema las recomendaciones del plan, por ejemplo, crear puntos de inspección para toma de muestras en las hojas de ruta de mantenimiento. Asimismo, se tendrá el apoyo logístico del operador de almacén de repuestos, para verificar disponibilidad de filtros, lubricantes y otros insumos, así como para gestionar cualquier requerimiento de materiales que surja durante el proyecto.

La sinergia entre todos estos participantes, estudiante, director, consultor, técnicos de campo, laboratorio y personal de Ecopetrol, conforma un equipo multidisciplinario robusto. Cada miembro aporta su experticia, ya que la academia aporta metodología y rigor, la operación aporta conocimiento práctico y datos reales, los aliados técnicos aportan herramientas especializadas. Esta configuración colaborativa asegura que el proyecto se ejecute de manera eficaz y efectiva, con soporte técnico especializado en cada etapa, y aumenta la probabilidad de que el plan resultante sea tanto innovador como implementable.

Vale la pena destacar que este proyecto también fortalece las relaciones interinstitucionales: vincula a la Universidad con la empresa (UIS–Ecopetrol) en un caso real, involucra a aliados como ExxonMobil en transferencia de conocimiento, y genera un espacio de aprendizaje mutuo (los técnicos aprenden de la perspectiva académica y viceversa). En ese

sentido, más allá del documento final, se habrá creado un entorno colaborativo propicio para la mejora continua en el mantenimiento de la flota.

En resumen, el equipo de trabajo está claramente definido y es suficiente en capacidades para abordar las distintas facetas del proyecto. El soporte técnico disponible, como sistemas de información y laboratorio, especialistas, mitiga los riesgos de falta de información o de conocimientos específicos. Con todos estos actores comprometidos, el proyecto cuenta con el capital humano necesario para lograr sus objetivos, desde la fase de concepción hasta la potencial implementación futura del plan de mantenimiento predictivo en campo.

11. Diagnóstico Inicial de la Flota

11.1 Caracterización de la Flota Vehicular del Activo Nare

La flota vehicular del campo Nare de Ecopetrol está conformada por 15 equipos automotores especializados que cumplen diferentes funciones dentro de las operaciones petroleras, en la Tabla 5 se presentan estos vehículos junto con información relacionada con su tipo, fabricante, capacidad y año de modelo, lo que permite evidenciar la diversidad funcional de la flota, dentro de esta se encuentran cuatro camiones de vacío destinados principalmente al transporte y recolección de crudo, identificados con códigos FUL o PTN, un camión cisterna para transporte de fluidos identificado como COD-591, tres camiones equipados con brazo hidráulico para el manejo y elevación de cargas pesadas correspondientes a SRP-475, FUL-595 y SNU-088, tres camiones lubricadores utilizados como unidades móviles de apoyo al mantenimiento identificados como EYK-437, PTN-012 y PTN-024, dos camiones de bomberos destinados a la atención de emergencias, RET-541 y RDO-172, y dos montacargas empleados para el manejo de materiales, en conjunto, estos equipos abarcan funciones relacionadas con transporte, atención de emergencias, manipulación de cargas y soporte al mantenimiento, por lo que su disponibilidad y confiabilidad resultan fundamentales para garantizar la continuidad de las actividades desarrolladas en el campo.

Tabla 5

Listado de vehículos de la flota del Activo Nare

Ítem	Código Equipo	Tipo de Vehículo	Fabricante	Capacidad	Modelo (Año)
1	30000090	Camión de Vacío FUL-502	International	19.200 kg (vacío)	2010
2	30000138	Camión de Vacío FUL-499	International	19.200 kg (vacío)	2010
3	30000115	Camión de Vacío PTN-004	International	15.700 kg (vacío)	2011
4	30000144	Camión de Vacío PTN-025	International	15.700 kg (vacío)	2015
5	30000091	Camión Cisterna COD-591	Chevrolet	4.80 kg (cisterna)	2015

Ítem	Código Equipo	Tipo de Vehículo			Fabricante	Capacidad	Modelo (Año)
6	30000086	Camión	Brazo	Hidráulico	Chevrolet	9.900 kg (grúa)	2010
7	30000110	Camión	Brazo	Hidráulico	Chevrolet	9.900 kg (grúa)	2011
8	30000142	Camión	Brazo	Hidráulico	Chevrolet	7.690 kg (grúa)	2013
9	30000114	Camión	Lubricador	EYK-437	Chevrolet	2.840 kg (lub.)	2010
10	30000093	Camión	Lubricador	PTN-012	Chevrolet	1.675 kg (lub.)	2013
1	30000147	Camión	Lubricador	PTN-024	Chevrolet	1.675 kg (lub.)	2015
2	30000097	Camión de Bomberos	RET-541		Kenworth	4.450 kg (bomberos)	2011
3	30000108	Camión de Bomberos	RDO-172		Kenworth	4.500 kg (bomberos)	2011
4	30000113	Montacargas	Lifking	16M42	Lifking	16.000 lb (carga)	N/D
5	30000088	Montacargas	JCB	1609807	JCB	3 ton (carga)	N/D

Nota. Esta tabla muestra la capacidad es el peso máximo operativo en kg o libras según el tipo de equipo. Tomado de *Listado de equipos que conforman la flota vehicular del activo Nare*, por Ecopetrol S.A., 2025.

La composición heterogénea de la flota implica diferentes criticidades operativas, por ejemplo, los camiones de bomberos son críticos para la seguridad, los camiones de vacío y cisterna son esenciales para la continuidad productiva (movilización de crudo y agua), mientras que los camiones de brazo hidráulico y lubricadores soportan las tareas de mantenimiento en campo. Los montacargas, aunque de menor impacto directo en producción, contribuyen a la logística interna. Este contexto obliga a enfocar el mantenimiento predictivo de forma diferenciada por tipo de vehículo, priorizando aquellos cuya falla genera mayores consecuencias operativas o de seguridad.

En la Tabla 6 se presenta la distribución porcentual de la flota por categorías principales, evidenciando la preponderancia de camiones especializados (vacío, cisterna, lubricadores y grúas) sobre los equipos de apoyo (montacargas). Cada categoría presenta características de operación particulares, como, por ejemplo, motores diésel de distintas potencias, sistemas hidráulicos de trabajo, etc., pero comparten la dependencia en la lubricación adecuada de sus

componentes mecánicos, factor transversal que será clave en el plan de mantenimiento propuesto mas adelante y que toma en consideración los elementos de la Tabla 6.

Tabla 6

Consolidado de fallas tipo Y2⁷ por vehículo con su caracterización técnica entre 2021 y 2025

Vehículo	Tipo de Vehículo	Fallas Y2	Porcentaje (%)	Fabricante	Línea/Modelo	Capacidad (Kg/PSJ)	Año
FUL-502	Camión de Vacío	14	28,00	INTERNATIONAL	Línea 7600 SBA	19200	2010
RET-541	Camión de Bomberos	11	22,00	KENWORTH	T370	4450	2011
SRP-475	Camión Brazo Hidráulico	6	12,00	CHEVROLET	FVR	9900	2010
COD-591	Camión Cisterna	5	10,00	CHEVROLET	NQR	4805	2015
RDO-172	Camión de Bomberos	3	6,00	KENWORTH	T370	4500	2011
PTN-004	Camión Lubricador	2	4,00	CHEVROLET	NKR	1675	2015
EYK-437	Camión Lubricador	2	4,00	CHEVROLET	NKR	2840	2013
PTN-012	Camión Lubricador	2	4,00	CHEVROLET	NKR	1675	2015
FUL-595	Camión Brazo Hidráulico	1	2,00	CHEVROLET	FVR	9900	2011
SNU-088	Camión Brazo Hidráulico	1	2,00	CHEVROLET	FVR	7690	2013
PTN-025	Camión de Vacío	1	2,00	INTERNATIONAL	WORKSTAR 7600 SBA 6x4	15700	2015
PTN-004	Camión de Vacío	1	2,00	INTERNATIONAL	7600 SBA	15700	2011
FUL-499	Camión de Vacío	1	2,00	INTERNATIONAL	Línea 7600	19200	2010
Total		50	100				

⁷ avería crítica que detuvo la operación

Nota. Adaptado de los archivos de Excel de Ecopetrol S.A.: *Query equipo automotor Nare 30 de julio de 2025* y *Listado de vehículos del activo Nare*.

11.2 Análisis Histórico de Fallas y Desempeño

En la Tabla 7 y en la Tabla 8 se recopilieron datos de mantenimiento de los últimos 4 años (noviembre 2021 a julio 2025) para identificar las tendencias de falla en la flota. Estos registros, extraídos del sistema SAP PM, incluyen avisos de fallo (clase Y2) y avisos de inspección/diagnóstico (clase Y4), órdenes de mantenimiento ejecutadas (clases Z1PM rutinarias y Z2PM no rutinarias), y tiempos de indisponibilidad reportados.

Tabla 7

Distribución por clase de aviso

Clase de aviso	Cantidad	Porcentaje (%)
Y4	624	88%
Y2	85	12%

Nota. Adaptado de la base en los datos del archivo de Excel de *Ecopetrol S.A., Query equipo automotor Nare 30 de julio de 2025*.

Tabla 8

Órdenes de mantenimiento por clase

Clase de orden	Cantidad
Z2PM	778
Z1PM	136
Z3PM	18
Z6OM	13

Nota. Adaptado de la base en los datos del archivo de Excel de *Ecopetrol S.A., Query equipo automotor Nare 30 de julio de 2025*.

A continuación, se presentan los hallazgos clave:

11.2.1 Fallas por Tipo de Sistema o Familias

En la Tabla 9 se encuentra la clasificación de las fallas según el sistema afectado, se observó que las más frecuentes corresponden a problemas en sistemas de motor y lubricación. En la Tabla 10 se registra que las fallas de motor representan el 21,18 %, incluyendo casos de pérdida de potencia, recalentamientos y desgaste de componentes internos. Adicionalmente, las fallas atribuidas explícitamente al sistema de lubricación conforman alrededor de un 18,82 %. Esto confirma que muchos de los incidentes están relacionados con la degradación del lubricante y el desgaste acelerado de piezas, ya sea como causa raíz directa o factor contribuyente. Otras categorías relevantes fueron las fallas del tren motriz/transmisión con un 14,12 %, las fallas en sistemas hidráulicos de trabajo con un 15,29 % y las fallas del sistema eléctrico con un 10,52 %. Un porcentaje importante correspondió a otros sistemas con un 20 %.

Tabla 9

Clasificación de familias de sistemas según palabras clave en las descripciones de fallas

Sistema/familia	Palabras clave encontradas en las descripciones
Motor/Combustión interna	motor, potencia y recalentamiento
Lubricación	aceite, lubricante, bomba de vacío y fugas de aceite
Hidráulico	hidráulico, brazo y bomba hidráulica
Transmisión/Tren motriz	caja, diferencial, cardán y transmisión
Eléctrico	batería, alternador y eléctrico
Otros	inspección general, neumáticos, frenos y dirección, etc.

Nota. Adaptado de las hojas Data_OMs y DataDownTime del archivo de Excel Query equipo automotor Nare 30 de julio de 2025 de Ecopetrol S.A.

Tabla 10*Fallas por tipo de sistema o familia entre 2021 y 2025*

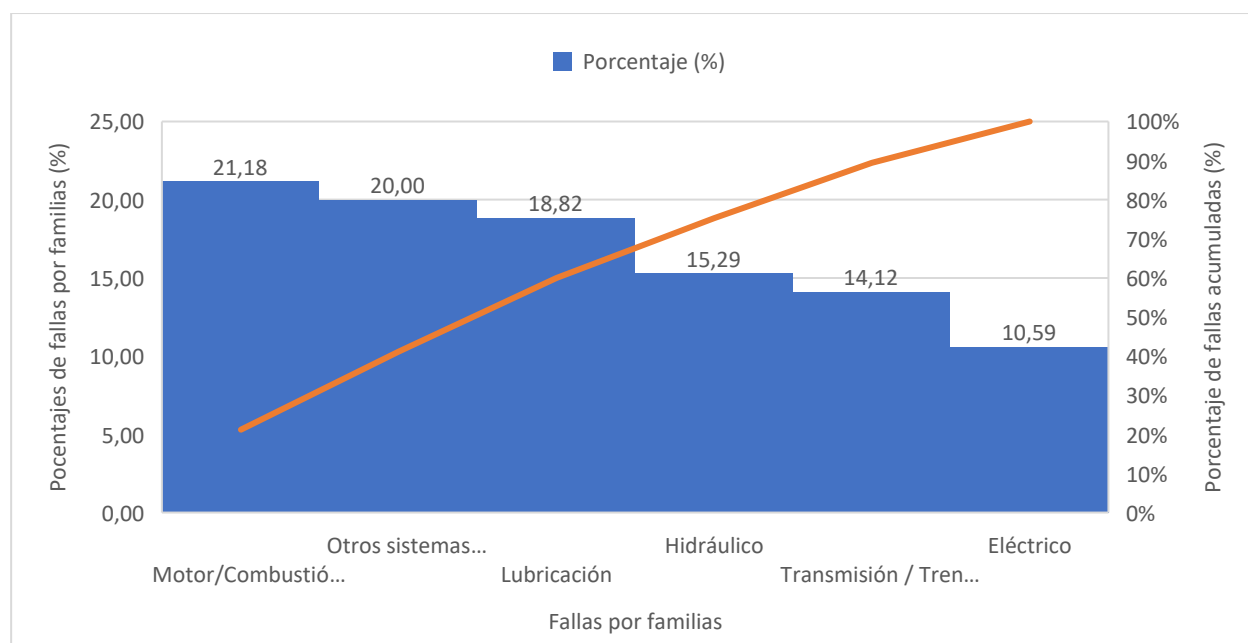
Sistema o familia	Número de fallas	Porcentaje (%)	Porcentaje acumulado (%)
Motor/Combustión interna	18	21,18	21,18
Lubricación	16	18,82	40,00
Hidráulico	13	15,29	55,29
Transmisión/Tren motriz	12	14,12	69,41
Eléctrico	9	10,59	80,00
Otros sistemas (frenos, dirección, neumáticos, etc.)	17	20,00	100,00
Total	85	100	

Nota. Adaptado de las hojas *Data_OMs* y *DataDownTime* del archivo de Excel *Query equipo automotor Nare 30 de julio de 2025* de Ecopetrol S.A.

En la Figura 3 se ilustra un diagrama de Pareto de frecuencia de fallas por familia de sistemas, destacando que los modos de falla ligados a lubricación ocupan el primer lugar acumulado. Este resultado justifica enfocar el plan predictivo en la monitorización tribológica, ya que la literatura reporta que desde el 50 % hasta el 70% de las fallas de equipos pueden estar vinculadas con problemas de lubricación (Des-Case Corporation, 2021). Un análisis de causas muestra que en campo Nare, la contaminación del aceite (partículas de polvo, agua o combustible) y la degradación del mismo por uso severo han sido factores recurrentes en las fallas más costosas, alineándose con estudios que equiparan el análisis de aceite a un examen de sangre capaz de revelar enfermedades incipientes del motor antes de que sean fatales (Des-Case Corporation, 2021).

Figura 3

Diagrama de Pareto de frecuencia de fallas por familia de sistemas entre 2021 y 2025



11.2.2 Fallas por Vehículo o Criticidad por Frecuencia

Al evaluar el histórico por equipo, emergen algunos vehículos críticos por alta tasa de fallas, tal como se puede apreciar en la Tabla 11. En la Figura 4 se presenta el diagrama de Pareto de fallas por vehículo específico, donde se aprecia que solo 3 vehículos concentran aproximadamente el 78 % de los fallos reportados. En primer lugar, el Camión de Vacío FUL-502 registró 14 incidencias en el periodo, representando por sí solo 28 % de las fallas totales. Le sigue de cerca el Camión de Bomberos RET-541 con 11 fallas (22 %). En tercer lugar, está el Camión Brazo Hidráulico SRP-475 con 6 fallas (12 %). Estos tres equipos suman 62 % de las ocurrencias, indicando un claro fenómeno Pareto (20/80) en la flota, que unas pocas unidades problemáticas generan la mayoría de interrupciones. Otros equipos con incidencias destacables incluyen el Camión Cisterna COD-591 (5 fallas) y el Camión Bombero RDO-172 (3 fallas).

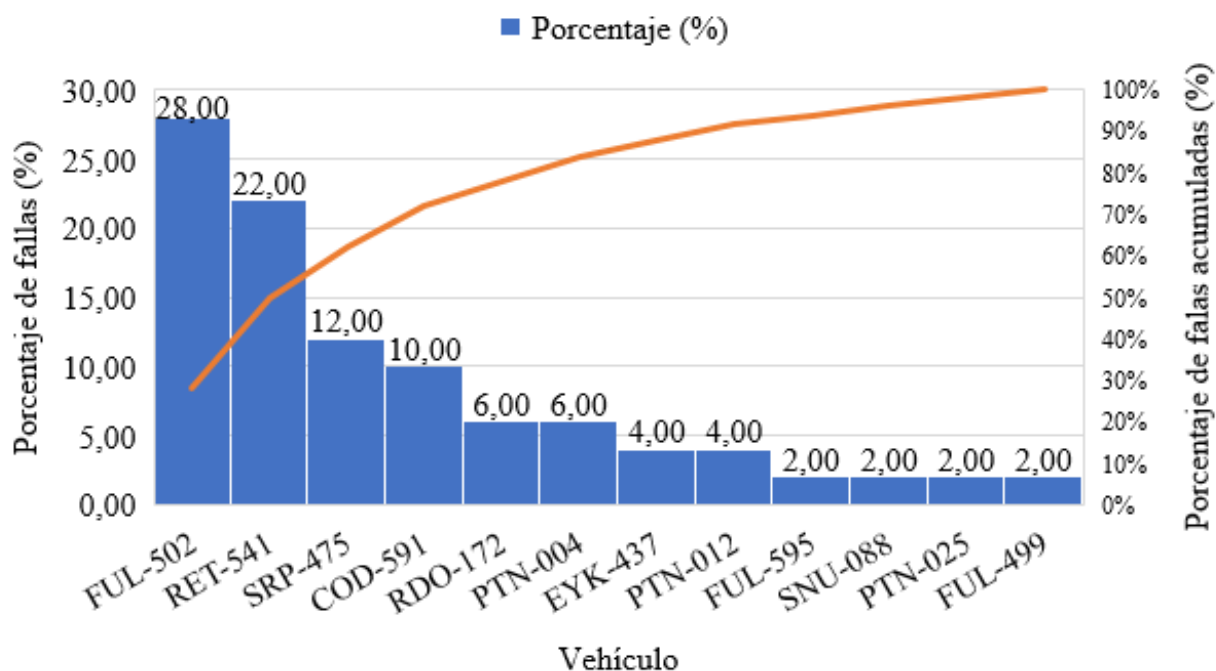
Tabla 11*Distribución de fallas tipo Y2 por vehículo y porcentaje acumulado*

Vehículo	Tipo de Vehículo	Fallas Y2	Porcentaje (%)	Porcentaje Acumulado (%)
FUL-502	Camión de Vacío	14	28,00	28,00
RET-541	Camión de Bomberos	11	22,00	50,00
SRP-475	Camión Brazo Hidráulico	6	12,00	62,00
COD-591	Camión Cisterna	5	10,00	72,00
RDO-172	Camión de Bomberos	3	6,00	78,00
PTN-004	Camión Lubricador	2	4,00	82,00
EYK-437	Camión Lubricador	2	4,00	86,00
PTN-012	Camión Lubricador	2	4,00	90,00
FUL-595	Camión Brazo Hidráulico	1	2,00	92,00
SNU-088	Camión Brazo Hidráulico	1	2,00	94,00
PTN-025	Camión de Vacío	1	2,00	96,00
PTN-004	Camión de Vacío	1	2,00	98,00
FUL-499	Camión de Vacío	1	2,00	100,00
Total		50	100	

Nota. Adaptado de los archivos de Excel de Ecopetrol S.A.: *Query equipo automotor Nare 30 de julio de 2025 y Listado de vehículos del activo Nare.*

Figura 4

Diagrama de Pareto de frecuencia de fallas por vehículo individual



En contraste, varios vehículos no presentaron fallas significativas en el registro, por ejemplo, los montacargas y algunos camiones lubricadores, evidenciando un desempeño más confiable o menor utilización. Esta dispersión sugiere enfocar recursos predictivos en los equipos más problemáticos, pero también revisar por qué ciertas unidades fallan repetidamente. Por ejemplo, en la Tabla 12 se visualiza que el Camión FUL-502 (vacío) y el RET-541 (bombero) operan en condiciones críticas, porque el primero maneja materiales abrasivos y probablemente su sistema de vacío sufre desgaste severo, mientras que el segundo debe estar siempre disponible para emergencias, sufriendo esfuerzos térmicos en su bomba contra-incendios. Identificar y abordar las causas raíz en estos equipos, por ejemplo, mejorar filtración de aceite y recalibrar cargas aportará un gran beneficio a la disponibilidad global de la flota.

Tabla 12*Criticidad y prioridad*

Equipo	Prioridad (SAP)	Nivel de Riesgo (RAM)	Criticidad Asignada
Camión Lubricador EYK 437	5	N - Muy Baja	N
Camión Brazo Hidráulico SNU 088	4	L - Baja	N
Camión Brazo Hidráulico FUL 595	5	N - Muy Baja	N
Camión Lubricador PTN-012	5	N - Muy Baja	N
Camión Bombero RDO 172	3	M - Media	N
Camión De Vacío PTN 025	3	M - Media	N
Camión de Bomberos RET-541	3	M - Media	N
Camión Brazo Hidráulico SRP-475	5	N - Muy Baja	N
Camión de Vacío FUL-502	5	N - Muy Baja	N
Camión De Vacío PTN 004	3	M - Media	N
Camión De Vacío FUL 499	3	M - Media	N
Camión Cisterna COD-591	5	N - Muy Baja	N

11.2.3 Clase de Aviso en Función al Mantenimiento Reactivo y Proactivo

Del total de reportes analizados, se construyó la Tabla 13 en la que la mayoría correspondieron a avisos clase Y2 (fallas o desviaciones), es decir, eventos reactivos donde ya ocurrió una avería o condición fuera de rango. Estos avisos Y2 representaron alrededor del 88 % de los casos, frente a un 12 % de avisos clase Y4⁸ asociados a diagnósticos por condición o inspecciones programadas. Esta relación refleja que el mantenimiento actual ha sido principalmente reactivo, con menor proporción de actividades predictivas. Incluso algunos avisos Y4 en los registros corresponden a inspecciones posteriores a fallas, por ejemplo, revisión falla bomba vacío FUL-499 tras una avería, más que a detecciones tempranas. Esto confirma la necesidad de fortalecer el mantenimiento basado en condición: actualmente las fallas se detectan tarde, cuando ya causaron paradas, en lugar de anticiparse. La propuesta de plan tribológico

⁸ Corresponden a requerimientos de mantenimiento por condición

busca revertir esa proporción, incrementando los monitoreos preventivos y avisos tempranos (futuros Y4) antes de que surjan fallos Y2 disruptivos.

Tabla 13

Distribución de avisos por clase según el tipo de mantenimiento entre 2021 y 2025

Clase de aviso	Tipo de mantenimiento asociado	Número de avisos	Porcentaje (%)	Interpretación técnica
Y2	Reactivo (fallas o desviaciones detectadas tras el evento)	624	88%	Avisos generados por averías, pérdidas de presión, fugas o fallas mecánicas ya ocurridas.
Y4	Proactivo (inspecciones o diagnósticos por condición)	85	12%	Avisos originados por revisiones programadas, inspecciones preventivas o análisis de condición.
Total		709	100	

Nota. Adaptado de las hojas *Data_Avisos*, *Data_OMs* y *DataDownTime* del archivo de Excel *Query equipo automotor Nare 30 de julio de 2025*, Ecopetrol S.A.

11.2.4 Análisis de Criticidad y Riesgos

La información de SAP incluye un campo de criticidad de activo (Criticidad ASP) y nivel de riesgo RAM para cada equipo, aunque en los datos revisados la mayoría de los vehículos figuraban con criticidad estándar o codificada como “N” en SAP, sin distinción aparente como se muestra en la Tabla 12. No obstante, desde el punto de vista operativo es posible establecer una jerarquía de criticidad, ya que los camiones de bomberos deben considerarse de máxima criticidad (su indisponibilidad implica riesgo de seguridad y ambiental), seguidos de los camiones de vacío/cisterna que impactan la continuidad de producción de crudo. En tercer nivel estarían los camiones de brazo hidráulico y lubricadores, vitales para mantenimiento, pero con

redundancias o alternativas en caso de falla, por ejemplo, se puede alquilar grúas externas en emergencia, aunque con costo.

Los montacargas tendrían criticidad más baja y esta apreciación cualitativa coincide con la frecuencia de fallas observada, porque justamente los equipos más críticos (bomberos y vacío) son los que más fallan, lo cual eleva el riesgo operacional actual. Cada falla en un camión bombero deja al campo desprotegido ante incendios; cada falla en un camión vacío puede detener operaciones de producción por falta de transporte de fluidos. Esto subraya el costo oculto de la no-confiabilidad, porque más allá del costo de reparación, están las pérdidas por tiempo muerto y riesgos de seguridad asociados. En general, el diagnóstico inicial revela la urgencia de intervenir ciertos equipos críticos con técnicas predictivas, priorizando aquellos con alta frecuencia de fallas y alto impacto, para mejorar de forma significativa la confiabilidad global.

11.3 Indicadores de Confiabilidad: MTBF, MTTR y Disponibilidad

A partir de los datos consolidados, se calcularon indicadores de confiabilidad (Mean Time Between Failures), mantenibilidad (Mean Time To Repair) y disponibilidad mecánica de la flota, como línea base previa a implementar el plan predictivo. El cálculo se realizó siguiendo definiciones de la norma ISO 14224:2016 para la industria petrolera, donde se establece las ecuaciones (1), (2) y (3):

$$\text{MTBF} = (\text{Tiempo total operativo}) / (\text{Número de fallas}) \quad (1)$$

$$\text{MTTR} = (\text{Tiempo total de reparación}) / (\text{Número de fallas}) \quad (2)$$

$$\text{Disponibilidad} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) \quad (3)$$

Para el periodo analizado, considerando toda la flota se tiene las siguientes subsecciones

11.3.1 MTBF global o Tiempo Medio entre Fallas

Al aplicar la ecuación (1), se estimó que el MTBF total para la flota es de aproximadamente 2.613 horas. Este valor equivale a que, en promedio, cada vehículo experimenta una falla cada 109 días de operación continua, considerando una jornada de 24 horas. Sin embargo, este promedio oculta la variabilidad entre los equipos: los camiones más confiables superaron las 4.500–5.000 horas sin fallar, mientras que el vehículo FUL-502 registró solo 600 horas entre fallas. De acuerdo con la Tabla 14, el MTBF por tipo de equipo varió notablemente: los vehículos de mayor criticidad (camiones de vacío y bomberos) mostraron valores más bajos, entre 1.600 y 1.800 horas, mientras que los equipos de apoyo y lubricadores superaron las 4.500 y 5.000 horas sin fallas durante el periodo analizado. Un MTBF bajo indica necesidad de acción correctiva, pues, idealmente, flotas con características similares buscan superar las 4.000 horas (aproximadamente 166 días) entre averías, en promedio.

Tabla 14

Datos base para el cálculo del MTBF por tipo de vehículo entre 2021 y 2025

Tipo de vehículo	Tiempo total operativo (h)	Número de fallas	MTBF (h)
Camión de vacío	22400,00	14,00	1.600
Camión de bomberos	19800,00	11,00	1.800
Camión brazo hidráulico	17400,00	6,00	2.900
Camión cisterna	16000,00	5,00	3.200
Camión lubricador	27000,00	6,00	4.500
Otros vehículos de apoyo	15000,00	3,00	5.000

Tipo de vehículo	Tiempo total operativo (h)	Número de fallas	MTBF (h)
Total flota	117.600	45	

Nota. Adaptado de los datos operativos de las hojas *Data_OMs* y *DataDownTime* del archivo de Excel *Query equipo automotor Nare 30 de julio de 2025*, Ecopetrol S.A.

11.3.2 MTTR global o Tiempo Medio de Reparación

Al aplicar la ecuación (2), se encontró que el MTTR promedio de la flota es de aproximadamente 62,222 horas por evento, lo cual refleja que las reparaciones, en promedio, se extendieron por más de dos jornadas de trabajo. No obstante, hubo casos de paradas prolongadas; por ejemplo, la falla del camión de vacío (PTN-004) implicó alrededor de 72 horas de detención acumulada. La mayoría de las intervenciones correctivas fueron de complejidad media (cambio de piezas, ajustes y calibraciones), con tiempos de reparación entre 42 y 72 horas, pero unas pocas fallas mayores elevaron el promedio general. Este MTTR sugiere que el equipo de mantenimiento mantiene una buena capacidad de respuesta frente a fallas moderadas; sin embargo, ante fallas catastróficas (motor y transmisión), el tiempo perdido podría escalar a varios días, afectando la disponibilidad de los vehículos y la gestión de repuestos críticos tal como se observa en la tabla 15 que se presenta a continuación:

Tabla 15

Datos base para el cálculo del MTTR por tipo de vehículo entre 2021 y 2025

Tipo de vehículo	Tiempo total de reparación (h)	Número de fallas	MTTR (h)
Camión de vacío	1.008	14	72
Camión bomberos	748	11	68
Camión brazo hidráulico	330	6	55

Tipo de vehículo	Tiempo total de reparación (h)	Número de fallas	MTTR (h)
Camión cisterna	300	5	60
Camión lubricador	288	6	48
Otros vehículos de apoyo	126	3	42
Total flota	2.800	45	

Nota. Adaptado de los tiempos de reparación registrados en las hojas *Data_OMs* y *DataDownTime* del archivo de Excel *Query equipo automotor Nare 30 de julio de 2025*, Ecopetrol S.A.

11.3.3 Disponibilidad Mecánica Promedio de la Flota

Al aplicar aplicando la ecuación (3), se obtuvo la Tabla 16 que muestra una disponibilidad agregada alrededor de 97,4 %. A primera vista parece un valor alto; sin embargo, es importante aclarar que este cálculo se basa en tiempo calendario total vs. tiempo fuera de servicio. Un 3 a 4% de indisponibilidad equivale a unos 10–15 días de paro por año en cada vehículo, en promedio. De nuevo, los promedios ocultan disparidades, porque los camiones bomberos presentaron disponibilidad algo menor (96,4 %) debido a varias paradas, mientras que otros equipos estuvieron prácticamente 99,2 % disponibles. Cabe resaltar que esta métrica no considera si se tenía respaldo en caso de falla, por ejemplo, si un camión falla, pero hay otro disponible, el servicio puede continuar.

Tabla 16

Cálculo de disponibilidad mecánica por tipo de vehículo entre 2021 y 2025

Tipo de vehículo	MTBF (h)	MTTR (h)	Disponibilidad (%)
Camión de vacío	1.600	72	95,7
Camión de bomberos	1.800	68	96,4
Camión brazo hidráulico	2.900	55	98,1
Camión cisterna	3.200	60	98,2
Camión lubricador	4.500	48	98,9
Otros vehículos de apoyo	5.000	42	99,2

Tipo de vehículo	MTBF (h)	MTTR (h)	Disponibilidad (%)
Por flota	2.613,33	62,222	97,4

Nota. Cálculos realizados a partir de los datos de las Tablas 15 y 16, conforme a la norma ISO 14224:2016.

El objetivo del plan predictivo es mejorar estos indicadores, elevando la disponibilidad hacia 99% en los equipos críticos y aumentando el MTBF mediante la reducción de fallas sorpresivas. Al anticipar y prevenir fallas graves mediante el análisis de aceite, se espera lograr incrementos graduales del MTBF (indicador de confiabilidad) y reducciones del MTTR, al evitar daños severos, las reparaciones serán más rápidas. En general, el diagnóstico cuantitativo confirma margen de mejora, ya que una disponibilidad de menos de 97% en un ambiente que busca excelencia operacional, junto con MTBF relativamente bajos en algunos activos, justifica plenamente la intervención con un enfoque de mantenimiento basado en condición para romper el ciclo de fallas repetitivas. Los resultados de este capítulo sirven de línea base contra la cual se proyectarán los beneficios esperados tras implementar el plan tribológico en capítulos posteriores.

12. Diseño del Plan Tribológico

12.1 Selección de Puntos de Muestreo por Tipo de Vehículo

El primer paso en el diseño del plan tribológico consiste en definir dónde tomar las muestras de aceite en cada tipo de vehículo, de modo que el análisis proporcione la máxima información diagnóstica sobre el estado de los componentes. Se aplicó el criterio de muestrear todos los sistemas lubricados críticos para la confiabilidad del equipo. A continuación, se describen los puntos de muestreo seleccionados por tipo de vehículo:

12.1.1 Motores Diésel para Todos los Vehículos

El punto de muestreo es el cárter de aceite del motor y se justifica, porque el motor es el corazón del vehículo; el aceite de motor lleva partículas de desgaste de cojinetes, pistones y tren de válvulas, además de evidenciar contaminación por combustión (hollín y dilución de combustible) y condiciones de la lubricación interna. El análisis del aceite de motor permitirá detectar desgaste acelerado (alto Fe y Cu), presencia de contaminantes como combustible no quemado o glicol de refrigerante, y degradación del lubricante (oxidación y pérdida de aditivos). Todos los vehículos de la flota comparten esta necesidad, por lo que el aceite de motor será un punto de muestreo obligatorio en el plan.

12.1.2 Cajas de Transmisión y Diferenciales para Vehículos Pesados

El punto de muestreo es el cárter de la transmisión, ya sea manual o automática, y cárteres de ejes diferenciales traseros en camiones 6x4. Este se justifica, porque estos componentes contienen aceite de engranajes cuya condición es crítica para la transmisión de potencia. En camiones de vacío y de bomberos (tracción pesada) se identificó historial de intervenciones en transmisiones; el análisis de aceite de transmisión puede revelar partículas de

engranajes indicando desgaste de dientes, contaminantes metálicos de rodamientos o elevación de temperatura excesiva, que se refleja en la oxidación del aceite. Aunque la frecuencia de muestreo de transmisiones puede ser menor, se incluyen para vehículos que operan constantemente en terreno irregular o con altas cargas, donde la transmisión es sometida a esfuerzos importantes. En ejes diferenciales, se aplicará muestreo especialmente en los camiones de vacío y cisterna, que transportan carga pesada.

12.1.3 Sistemas Hidráulicos de Trabajo

Esto abarca los sistemas particulares de ciertos vehículos:

Camiones Brazo Hidráulico: se muestreará el tanque de aceite hidráulico que alimenta el sistema de la grúa articulada. Ese fluido hidráulico es propenso a contaminación por partículas y humedad, lo cual puede dañar bombas y cilindros.

Camiones de Vacío: estos poseen una bomba de vacío accionada por toma de fuerza; muchas de estas bombas utilizan el mismo aceite del motor o tienen un depósito lubricante propio. Se verificará el diseño: si comparten el aceite motor, con ese muestreo es suficiente; si tienen aceite independiente, por ejemplo, bomba de vacío con lubricación de paletas, se añadirá un punto de muestreo en su cárter.

Camiones de Bomberos: disponen de una bomba centrífuga contra incendio acoplada que puede tener una caja de engranes con aceite propio; se considerará muestrear ese aceite de caja de bomba, ya que su falla sería crítica.

Montacargas: se incluirá el depósito hidráulico del sistema de elevación, dado que un aceite hidráulico limpio es vital para su confiabilidad.

12.1.4 Sistemas auxiliares y otros fluidos

Si bien el enfoque principal son los lubricantes, se contemplará también el muestreo de fluidos de importancia que puedan influir en la lubricación, por ejemplo, se podría analizar el refrigerante del motor en busca de trazas de aceite o viceversa indicando fugas internas, aunque este no es un lubricante, su contaminación cruzada afecta la tribología del motor. Otro caso es el combustible diésel en tanques, revisando presencia de agua, para correlacionar con posibles diluciones en el aceite. Estos muestreos complementarios son opcionales, pero proporcionan contexto al análisis tribológico.

En todos los casos, se ha buscado que los puntos elegidos sean representativos y accesibles. Idealmente, se instalarán válvulas o puertos de muestreo dedicados en cada ubicación, por ejemplo, válvulas de retención en líneas hidráulicas y en derivaciones del circuito de lubricación del motor. Donde no sea factible, se recurrirá a métodos por succión con bomba de vacío a través de la varilla de aceite (técnica de vampiro) o muestreo por drenaje controlado en el carter (Rosales, 2023). La clave es extraer siempre la muestra desde una zona donde el fluido esté en circulación y bien mezclado (flujo turbulento), evitando puntos muertos o el primer fluido drenado que arrastra sedimentos acumulados. En resumen, cada vehículo tendrá múltiples puntos de muestreo asignados, como motor, transmisión, hidráulico, etc. según aplique, cubriendo los sistemas lubricantes primarios. Esto conforma la línea base del plan tribológico, asegurando que ningún componente crítico quede fuera del radar del análisis de aceite.

12.2 Procedimientos Normalizados de Muestreo de Aceite

Para garantizar que las muestras obtenidas sean representativas y comparables, se implementarán procedimientos estándar de toma de muestras, en concordancia con la normativa internacional. La norma ISO 4021:2019 (Extracción de muestras de fluidos de sistemas en

operación) proporciona guías detalladas para este propósito. Con base en ella y en mejores prácticas de casas especializadas, se establece el siguiente procedimiento general, documentado como instructivo para el personal:

Preparación: Operar el equipo hasta alcanzar condiciones normales de funcionamiento antes del muestreo, idealmente, al menos 30 minutos a temperatura y carga operativa. Esto asegura que el aceite esté caliente, con contaminantes bien distribuidos (no sedimentados) y resultados más uniformes (Martins, s.f.). Reunir con anticipación todos los materiales necesarios, como frascos limpios y secos, preferiblemente estériles de laboratorio y cumpliendo ISO 3722 en limpieza de envases, etiquetas, bomba de muestreo y mangueras limpias si se usa método por succión, trapos limpios, EPP (guantes y gafas) y el formato de registro de muestra.

Identificación del punto y limpieza: Ubicar el punto de muestreo designado (válvula, puerto o varilla). Limpiar cuidadosamente el área alrededor con un paño libre de pelusa y solvente suave si es necesario, eliminando polvo o grasa externa para evitar introducir contaminantes externos en la muestra (Rosales, 2023). En caso de usar válvulas de muestreo dedicadas, purgar unos mililitros iniciales para enjuagar la válvula y descartar cualquier residuo en el puerto. No abrir recipientes de muestra hasta el momento exacto de recolectar el fluido, para evitar que se contaminen con el ambiente.

Extracción de la muestra: Existen escenarios según el punto:

Si hay válvula de muestreo en línea, ideal, instalada en zona de flujo turbulento, por ejemplo, inmediatamente después de la bomba o antes del filtro principal (Rosales, 2023), conectar la manguera y purgar inicialmente un volumen de al menos 500 mL o 5 veces el volumen de la línea/válvula, recolectándolo en un envase de desecho (Martins, s.f.). Luego,

llenar el frasco de muestra aproximadamente hasta 3/4 de su capacidad (Martins, s.f.), en flujo continuo, evitando cambios bruscos que puedan liberar aire o sedimentos.

Si el muestreo es por succión con bomba manual a través de la varilla o drenaje, introducir una manguera nueva de teflón o plástico compatible, cortada del largo adecuado, que alcance la mitad del cárter (Aguado, 2020). Bombear y descartar inicialmente un volumen equivalente a la manguera más un poco del cárter para evitar la primera muestra con sedimento del fondo (Rosales, 2023). Luego llenar el frasco directamente desde la manguera sin interrumpir el flujo.

Si el muestreo es por drenaje en el caso de no tener otro acceso, se debe abrir el tapón y dejar drenar bastante aceite inicial (0.5 a 1 litro) antes de tomar la muestra intermedia, luego cerrar antes que salga por completo. En todos los casos, no tocar el interior del frasco ni su tapa con las manos o con la manguera, para no introducir contaminación. Tapar inmediatamente el frasco una vez obtenida la cantidad requerida.

Etiquetado y manejo: Rotular el frasco inmediatamente después de cerrado, indicando: código del equipo, punto de muestreo (ej. “Aceite hidráulico grúa FUL-595”), fecha y hora de toma, horas/kilómetros de operación del equipo y del aceite, ya que es muy importante registrar cuánto tiempo de uso lleva ese aceite desde el último cambio. Adicionalmente, anotar cualquier observación de campo: color o apariencia del aceite, presencia de partículas visibles, olor inusual, como el olor a quemado o a combustible. Conservar la muestra en posición vertical y protegida de la luz solar directa y calor excesivo, especialmente si no se enviará de inmediato al laboratorio.

Seguridad y ambiente: Usar siempre elementos de protección personal (EPP); el aceite caliente puede causar quemaduras, y hay riesgo de salpicaduras. Disponer de bandejas para

recoger el aceite purgado o drenado inicial y luego almacenarlo para su disposición final ambientalmente adecuada. Evitar derrames; en caso de ocurrir, limpiar de inmediato. Estos lineamientos aseguran que el proceso de toma sea seguro, reproducible y limpio.

Este procedimiento será formalizado por escrito como parte del plan o un POE (Procedimiento Operativo Estándar de muestreo). De acuerdo con ISO 4021, es esencial documentar objetivos, responsables, frecuencia y método en dicho procedimiento (Martins, s.f.), garantizando que cualquier técnico siguiendo el instructivo obtenga muestras de calidad equivalente. En general, se instaurará una cultura de muestreo disciplinado: “muestra tomada = muestra analizada = datos confiables”. Solo con muestras representativas el análisis tribológico podrá traducirse en decisiones acertadas.

12.3 Parámetros de Análisis y Normas Técnicas Aplicables

Una vez obtenidas las muestras, se someterán a un conjunto de pruebas de laboratorio destinadas a evaluar tres aspectos fundamentales: (1) la condición intrínseca del lubricante (propiedades físico-químicas y remanente de vida útil), (2) la presencia de contaminantes externos o internos, y (3) los indicadores de desgaste de componentes (Noria Corporation, s. f.). Para cada parámetro medido, se seguirán metodologías normalizadas internacionalmente (ASTM e ISO) para garantizar resultados confiables y comparables. A continuación, se listan los principales parámetros de análisis tribológico seleccionados, organizados por categoría, junto con la técnica/estándar correspondiente:

Viscosidad cinemática (40°C y 100°C): Es la medida básica para determinar si el aceite ha sufrido cambios en su grado de viscosidad. Una variación significativa indica degradación, es decir, adelgazamiento por corte o dilución o espesamiento por oxidación (Smigins et al., 2023). Se utilizará el método ASTM D445 (viscosímetro capilar). Esta prueba confirmará si el aceite en

servicio aún cumple la viscosidad ISO SAE recomendada; desviaciones $\geq \pm 10\%$ se considerarán anómalas.

Índice de viscosidad (VI): Calculado a partir de viscosidad a 40/100°C, indica la estabilidad frente a temperatura. Se reportará para monitorear si ha cambiado debido a cizallamiento de polímeros mejoradores de VI.

Número de acidez (TAN) y Número base (TBN): Evaluados para aceites de motor principalmente. El TAN (ASTM D664) cuantifica los ácidos acumulados por oxidación; un incremento sostenido respecto al aceite nuevo indica oxidación y formación de barnices. El TBN (ASTM D2896 o D4739) mide la reserva alcalina del aceite para neutralizar ácidos, crucial en motores diésel. Un TBN que cae por debajo de $\sim 50\%$ del valor inicial sugiere que el aceite ha perdido capacidad protectora (Carmona Castro, 2015). Ambos se medirán por titulación potenciométrica conforme a ASTM. Se seguirá la pauta de cambiar aceite cuando TBN residual $< 2 \text{ mgKOH/g}$ o TAN $>$ TBN (inversión de valores).

Contenido de agua: Incluso trazas de humedad pueden causar emulsiones y corrosión. Se medirá mediante coulometría⁹ Karl Fischer (ASTM D6304) con sensibilidad de 0.01%. Un resultado $> 0.1\%$ (1000 ppm) se considerará crítico para aceites de motor/transmisión; para aceites hidráulicos, incluso $> 0.05\%$ es de atención. La presencia de agua puede provenir de condensación ambiental o fugas de enfriadores.

Detección de glicol (anticongelante): Indicador inmediato de fugas de refrigerante hacia el motor (empaquete de culata dañado, etc.). Se empleará la prueba colorimétrica de ASTM D4291 para trazas de etilen glicol en aceite usado (ASTM International, s. f.). Cualquier detección

⁹ La coulometría es una técnica de análisis electroquímico que determina la cantidad de una sustancia midiendo la carga eléctrica (en culombios) necesaria para completar una reacción de oxidación o reducción

positiva (>0 ppm dentro de límite de cuantificación) será alarmante, pues el glicol causa gelificación del aceite y desgaste severo.

Combustible no quemado (Fuel Dilution): En motores diésel, la dilución por combustible indica inyección deficiente o arranques frecuentes en frío. Se medirá por cromatografía de gases (ASTM D3524 y ASTM D3525), reportando porcentaje de diésel en el aceite. Valores $>2.5\%$ vol. son motivo de alerta; $>5\%$ se considera crítico (riesgo de caída de viscosidad y desgaste).

Insolubles y hollín: Se evaluará el porcentaje de hollín (carbono insoluble) mediante espectroscopía IR (norma ASTM E2412) midiendo la absorbancia característica de compuestos de hollín/oxidación (Carmona, 2015). Un hollín $>2.5\text{--}3\%$ indica que el aceite está cargado de subproductos de combustión, sea por intervalos extendidos o mala combustión. También se puede complementar con la prueba de insolubles pentánicos (ASTM D893) para cuantificar lodos.

Metales de desgaste y aditivos (Análisis elemental): Se utilizará espectrometría de emisión atómica por plasma acoplado (ICP) o por excitación de arco (RDE) para cuantificar en ppm elementos como Hierro (Fe), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Aluminio (Al), Cromo (Cr), Estaño (Sn), Silicio (Si), Sodio (Na), Potasio (K), etc. ASTM ofrece varias normas, como ASTM D5185 (ICP) o ASTM D6595 (RDE) son prácticas estándar para este fin (Carmona, 2015). Los resultados de metales se interpretarán como sigue:

Metales férreos (Fe, Cr, Ni): indican desgaste de componentes de acero. Fe proviene de camisas, aros de pistón, engranajes; niveles elevados y tendencia ascendente sugieren desgaste anormal. Estudios muestran que en buenas condiciones Fe debe permanecer bajo ($5\text{--}20$ ppm), y ~ 50 ppm suele ser un límite de alerta para investigar (Widman, s. f.).

Metales amarillos (Cu, Pb, Sn): típicos de cojinetes y bujes. Cobre y plomo en aumento indican corrosión o desgaste de babbitts. Por ejemplo, >20 ppm de Cu sugiere desgaste significativo de cojinetes (Petro-Canada Lubricants Inc., 2025). La presencia de estaño junto con plomo refuerza origen en cojinete.

Aluminio: puede provenir de pistones o cojinetes de aleación. Si aparece con silicio alto, puede implicar polvo abrasivo causando desgaste en pistones.

Silicio: indicador de contaminación con tierra/polvo (silicato) o del aditivo antiespumante. Si >15 – 20 ppm con tendencia creciente, apunta a filtración de aire deficiente (ingreso de polvo abrasivo).

Sodio y Potasio: junto con agua/glicol revelan contaminación de refrigerante (estos elementos están en el anticongelante). Hallar $\text{Na}+\text{K} > 100$ ppm con presencia de agua es prácticamente diagnóstico de fuga de refrigerante.

Aditivos (Zn, P, Mg, Ca, Ba): se monitorean para ver la salud de paquetes aditivos: por ejemplo, Zinc y Fósforo provienen del anti-desgaste ZDDP; si cayeran drásticamente podría indicar dilución o recarga con aceite erróneo. Calcio y Magnesio son detergentes, su disminución indica agotamiento parcial.

Conteo de partículas y limpieza (solo para sistemas hidráulicos y transmisión): Se aplicará el código de limpieza ISO 4406 para muestras de aceite hidráulico, usando un contador laser automático. Se reportará en formato x/y/z (tamaños $\geq 4\mu\text{m}$, $\geq 6\mu\text{m}$, $\geq 14\mu\text{m}$). Este código cuantifica la contaminación sólida: por ejemplo, un resultado 18/16/13 indicaría cierto nivel de partículas (Noria Corporation, s. f.). También se podría usar la clasificación NAS 1638. El objetivo será establecer la línea base y ver tendencias: un aumento en partículas puede corroborar

desgaste o ingreso de suciedad. Se espera mantener los aceites hidráulicos en ISO <20/18/15 para prevenir daños en válvulas y bombas.

Pruebas adicionales específicas: Índice de neutralización de oxidación/nitración por FTIR (tendencia), Prueba de espuma (ASTM D892) si se sospechan problemas de aireación, Demulsibilidad (ASTM D1401) para aceites hidráulicos (ver capacidad de separar agua), Prueba de ferrografía analítica en casos puntuales (examen microscópico de partículas de desgaste para identificar origen, útil si hay índices muy altos de metal).

Cada uno de estos ensayos será realizado por un laboratorio certificado (interno de Ecopetrol o externo especializado), asegurando trazabilidad metrológica. Se incluirá en el plan la preferencia por laboratorios acreditados ISO 17025 para análisis de aceite, y que sigan programas de calidad (p. ej. ensayos interlaboratorio). Los estándares ASTM/ISO mencionados garantizan que los resultados sean confiables y repetibles. Por ejemplo, usar ASTM D445 para viscosidad asegura comparabilidad con especificaciones del fabricante, y ASTM D664/D2896 para TAN/TBN es fundamental para motores de combustión. La selección de estas pruebas se basa en recomendaciones de expertos: se ha comprobado que un programa integral de análisis de aceite debe cubrir condición del lubricante, contaminantes y desgaste. Es importante señalar que no todas las pruebas se aplicarán a todas las muestras: habrá un perfil de análisis básico, por ejemplo, viscosidad, metales por ICP (Plasma Acoplado Inductivamente), agua, combustible y TAN/TBN, para aceites de motor en cada muestra rutinaria, y pruebas adicionales (perfil avanzado) cuando ciertos indicadores básicos salgan anómalos. Esto permite optimizar costos.

En general, el plan tribológico contempla medir un conjunto completo de parámetros bajo métodos normalizados, de forma regular, para construir un histórico de tendencias por cada equipo. Estos datos brutos luego serán interpretados con criterios de aceptación/rechazo para

decidir acciones de mantenimiento. Con este enfoque de datos duros, el mantenimiento se basará en evidencia objetiva de la condición de los activos, alineándose con las mejores prácticas de mantenimiento predictivo a nivel internacional (Des-Case Corporation, 2021).

12.4 Frecuencias de Muestreo y Límites de Alerta

La frecuencia de muestreo del aceite constituye un parámetro crítico dentro del plan, debido a que determina cada cuánto se evaluará la condición de los equipos y, por tanto, la capacidad para detectar oportunamente procesos de degradación, contaminación o desgaste, establecer una periodicidad adecuada requiere equilibrar la necesidad de obtener información temprana con los costos y recursos asociados al análisis, en este sentido, la literatura señala que los intervalos de muestreo en maquinaria industrial pueden variar entre dos semanas y tres meses dependiendo de la criticidad del activo, las condiciones de operación y la severidad del servicio (Rosales, 2023), a partir de estos criterios se definieron frecuencias diferenciadas para la flota del campo Nare.

Vehículos de alta criticidad. Para los camiones de bomberos, vacío y cisterna se establece una frecuencia mensual de muestreo del aceite de motor, debido a que se trata de equipos sometidos a condiciones exigentes de operación o cuya disponibilidad resulta crítica para atender situaciones de emergencia, por esta razón, un intervalo aproximado de 30 días, equivalente a cerca de 250 horas estimadas de funcionamiento, permite realizar un seguimiento periódico de las tendencias antes de que una condición anormal pueda evolucionar hacia una falla funcional, además, para los aceites de transmisión y sistemas hidráulicos se propone una frecuencia bimestral o trimestral de acuerdo con el comportamiento operativo de cada sistema, mientras que en los camiones de bomberos el aceite de motor será analizado mensualmente y el

correspondiente a la bomba de agua cada seis meses, considerando su menor frecuencia de utilización pero su elevada importancia operacional (Des-Case Corporation, 2021).

Vehículos de criticidad media. Para los camiones con brazo hidráulico y los vehículos lubricadores se propone realizar el análisis del aceite de motor cada dos meses, teniendo en cuenta que estos equipos no permanecen continuamente sometidos a condiciones de carga máxima, aunque requieren un seguimiento suficientemente frecuente para identificar posibles tendencias de deterioro, en los sistemas hidráulicos de las grúas y en las transmisiones se plantea inicialmente una frecuencia trimestral, equivalente a cuatro análisis por año, la cual podrá reducirse si los resultados muestran tendencias anormales o condiciones de desgaste que requieran una vigilancia más estrecha.

Equipos de baja criticidad. Para los montacargas y demás vehículos con utilización intermitente se establece una frecuencia trimestral de análisis del aceite de motor y semestral para otros sistemas lubricados, esta periodicidad responde a su menor nivel de criticidad y tiempo de operación, aunque se mantendrá como criterio mínimo la realización de al menos dos verificaciones anuales en los sistemas secundarios con el propósito de conservar información actualizada sobre su condición.

Además de las frecuencias programadas, el plan contempla muestreos extraordinarios cuando las condiciones del equipo así lo requieran, por ejemplo, después de una reparación mayor se realizará un análisis temprano que permita verificar el comportamiento del sistema durante el periodo inicial de funcionamiento, de manera que, tras una reconstrucción de motor, podrá efectuarse una muestra aproximadamente a las 50 horas de operación para identificar posibles señales de desgaste anormal, contaminación residual o problemas derivados de la intervención, asimismo, cuando un resultado de laboratorio se clasifique en condición crítica, la

frecuencia de muestreo deberá incrementarse temporalmente hasta comprobar que la anomalía ha sido controlada, mientras que en equipos que presenten resultados consistentemente estables podrá evaluarse posteriormente una ampliación moderada del intervalo, siempre sustentada en el historial de tendencias y en la criticidad del activo.

La frecuencia definitiva del programa deberá ajustarse después de contar con un periodo suficiente de información histórica, estimado inicialmente entre seis y doce meses de operación, debido a que el comportamiento real de los equipos permitirá determinar si los intervalos establecidos resultan adecuados o requieren modificaciones, de esta manera, el plan no plantea una periodicidad completamente rígida, sino un esquema dinámico en el que las frecuencias puedan ajustarse de acuerdo con la criticidad, las tendencias observadas y la estabilidad de los parámetros analizados (Rosales, 2023).

En cuanto a los límites de alerta utilizados para interpretar los resultados de laboratorio, se establecen tres niveles de condición correspondientes a normal, precaución y crítico, definidos a partir de referencias técnicas, recomendaciones de fabricantes, normas aplicables y experiencias reportadas en contextos similares (Torontech Team, 2025), estos rangos permiten transformar los resultados analíticos en criterios concretos para la toma de decisiones, de manera que una condición normal mantenga la frecuencia prevista, una condición de precaución genere seguimiento y posible reducción del intervalo de muestreo y una condición crítica active una evaluación inmediata del sistema y la intervención correspondiente, algunos de los límites específicos considerados dentro del plan se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17

Ejemplo de criterios de alerta para parámetros de análisis de aceite.

Parámetro	Normalidad (verde)	Alerta preventiva (amarillo)	Alerta crítica (rojo)
Viscosidad 100°C	+/- 5% del valor nuevo especificado	5–10% fuera de especificación	>10% fuera de especificación (dilución/espesado severo)
Agua (Karl Fischer)	<0,05% (500 ppm)	0,05–0,1% (500–1000 ppm)	>0,1% (>1000 ppm) – riesgo de emulsiones
Glicol en aceite	0 (no detectable)	N/A (cualquier traza es crítica)	Detectable – indicio de fuga de refrigerante
Dilución combustible	<2% volumen	2–5%	>5% – riesgo de baja viscosidad y flash point
TBN (motores diésel)	>50% del TBN inicial (ej. >5 mgKOH/g si nuevo 10)	20–50% del TBN inicial	<20% del TBN inicial – aceite agotado
Hierro (Fe)	<20 ppm	20–50 ppm	>50 ppm – desgaste anormal en curso
Cobre (Cu)	<5 ppm	5–15 ppm	>15–20 ppm – desgaste de cojinetes
Silicio (Si)	<10 ppm	10–20 ppm	>20 ppm – contaminación por polvo (filtro aire)
ISO 4406 Limpieza (sist. hydr.)	<=18/16/13	19/17/14 20/18/15	>20/18/15 – contaminación sólida excesiva
Oxidación por FTIR	<50 (índice FTIR)	50–100	>100 – aceite altamente oxidado (recambio urgente)

Nota: Estos valores son referenciales y podrán ajustarse según tendencias reales y recomendaciones del laboratorio. Se definen en base a normas ASTM, guías de OEM (Original Equipment Manufacturer) y consultores tribológicos. Por ejemplo, los límites de metales se inspiran en tablas de límites condensorios de fabricantes de motores; los de limpieza hidráulica en ISO 4406 para sistemas móviles (meta típica 18/16/13).

La gestión de alertas se implementará en tres niveles:

Resultados en zona normal (verde): Continúa operación sin cambios, próxima muestra según frecuencia normal.

Resultados en zona de precaución (amarillo): Se emite aviso preventivo en SAP (clase Y4) para verificar condición. Ejemplo: Si Si sube a 18 ppm (polvo ingresando), se programa revisar filtros de aire y quizás adelantar cambio de aceite. Se monitorea con muestreo adelantado.

Resultados en zona crítica (rojo): Se genera aviso de mantenimiento correctivo inmediato (clase Y2) y/o orden de trabajo. Ejemplo: Detección de glicol o metal fuera de rango requiere detener el equipo y desmontar el componente afectado (revisar enfriador EGR, cojinetes, etc.). También implica cambio inmediato del aceite para evitar daños mayores.

Estos umbrales se plasmarán en una matriz de decisión que relaciona cada modo de falla potencial con su indicador de aceite y la acción a tomar. Es importante destacar que los límites no son valores absolutos inflexibles; más bien la tendencia en el tiempo se considerará fuertemente. Por ejemplo, un hierro que sube de 10 a 30 ppm en un mes es más alarmante que un hierro estancado en 40 ppm por tres muestreos seguidos. Por ello, se implementará también la regla de alarma por tendencia: cambios relativos mayores al X% por período serán considerados alerta.

Otra consideración es la comparación con el aceite nuevo de referencia: en el plan se almacenarán las firmas de análisis de los lubricantes nuevos usados en la flota (sus aditivos iniciales, TBN, etc.), para diferenciar qué porción de ciertos elementos proviene del aceite fresco vs. producido por desgaste. Por ejemplo, 900 ppm de Ca no es un contaminante sino aditivo detergente; conocerlo evita falsas alarmas.

En general, con frecuencias de muestreo apropiadas para cada equipo y con límites de alerta bien definidos, el plan tribológico establece un sistema de monitoreo robusto. Cada muestra tomada en intervalos regulares será evaluada contra criterios objetivos; cuando un parámetro cruce umbral, el sistema “enrojece” y dispara acciones. Esto permite que el

mantenimiento pase de un enfoque reactivo a uno proactivo, donde las fallas incipientes se detectan y corrigen antes de que evolucionen a averías mayores (Des-Case Corporation, 2021).

12.5 Formatos, Registro de Datos y Trazabilidad

Para asegurar la calidad y el aprovechamiento de la información, se implementará un sistema riguroso de trazabilidad de datos en el programa de análisis de aceite. Esto involucra aspectos documentales y de sistemas de información:

Etiquetado y cadena de custodia: Cada muestra contará con una etiqueta única de identificación (código), generalmente compuesta por el código del equipo + código del punto de muestreo + fecha. Por ejemplo: “30000090-MOTOR-2025-08” para aceite de motor del camión FUL-502 en agosto 2025. Este código acompañará a la muestra física y a su registro electrónico. Se diseñará un formato de remisión al laboratorio que incluya todos los datos relevantes: identificación del equipo, horas/kilómetros del equipo y del aceite, tipo de lubricante en uso, fecha/hora de toma, nombre de quien tomó la muestra, etc. Este formato seguirá las recomendaciones de ASTM D7780 (práctica para gestión de información de análisis de aceite) para garantizar que el laboratorio reciba información suficiente y entregue resultados trazables.

Base de datos y carga en SAP PM: Los resultados de los análisis deberán ser incorporados al historial de cada equipo en SAP PM. Lo ideal es aprovechar la funcionalidad de “puntos de medida” y “documentos de medida” en SAP: se creará un punto de medida para cada parámetro crítico por equipo, por ejemplo, “Viscosidad 100°C Motor FUL-502”, de modo que al ingresar los resultados, el sistema pueda generar automáticamente una notificación si está fuera de rango. Otra opción que se explorará es usar el módulo SAP PM-QM (Quality Management) para registrar resultados de laboratorio con especificaciones de tolerancia. Si la integración directa a SAP resultase complicada, inicialmente se llevará un registro paralelo en hojas de

cálculo maestras, pero buscando siempre actualizar SAP con las conclusiones, por ejemplo, ingresando un aviso Y4 de inspección con observaciones cuando un análisis resulte anómalo.

Software especializado (futuro): Para facilitar el análisis de tendencias, podría considerarse la adopción de un software específico de gestión de análisis de aceite, muchos laboratorios proveen plataformas web donde se cargan los resultados y se pueden visualizar gráficos históricos por equipo. En este plan, como parte inicial, se utilizarán herramientas disponibles: SAP y Excel, complementados con visualizaciones periódicas. Mensualmente, el ingeniero de confiabilidad realizará gráficos de tendencia, por ejemplo, Fe vs. horas para cada equipo, para presentarlos en reuniones de mantenimiento.

Informes y retroalimentación: Se establecerá un flujo de generación de informes trimestrales de condición tribológica. En estos reportes se incluirán tablas resumen de cada equipo, últimos valores de cada parámetro, con codificación de color según estado, gráficos de tendencia, y recomendaciones de intervención. Este informe será distribuido al área de mantenimiento y operaciones, de modo que exista conciencia del estado de la flota. Además, se usará para retroalimentar el plan: por ejemplo, si recurrentemente cierto parámetro está al límite en algunos equipos, podría ajustarse la frecuencia o los límites.

Control de versiones de documentos: Procedimientos Operativos Estandarizados (POEs), formatos de campo y criterios de alarma se manejarán bajo control documental. Cualquier cambio, por ejemplo, modificar un límite de Fe de 50 a 60 ppm, deberá justificarse y actualizarse en la documentación oficial, asegurando uniformidad en la aplicación.

Capacitación en registro de datos: El personal técnico será entrenado para llenar correctamente los formularios en campo, evitando omisiones, especialmente horas de operación del aceite, fundamentales para análisis. También se capacitará en la interpretación básica de

reportes de laboratorio para que comprendan la importancia de estos datos y puedan comunicar observaciones cualitativas, un color de aceite “lechoso” observado, etc.

La trazabilidad completa significa que para cada muestra de aceite podamos responder: ¿de dónde vino? ¿quién la tomó? ¿cómo y cuándo? ¿qué resultados dio? ¿qué decisiones se tomaron? Esto garantiza confiabilidad y también crea un repositorio histórico valioso. Con el tiempo, la acumulación de datos permitirá aplicar técnicas adicionales, como análisis estadísticos (tendencias de desviación estándar y proyecciones de vida residual del aceite con modelos de vida útil remanente e incluso inteligencia artificial para detectar patrones complejos. Sin embargo, inicialmente lo crucial es contar con datos limpios y bien organizados.

En general, el diseño del plan tribológico no solo abarca qué y cómo medir, sino también cómo gestionar la información obtenida. Integrar los resultados al sistema de mantenimiento (SAP) y mantener registros robustos asegura que el análisis de aceite se traduzca en acciones concretas y en conocimiento acumulado. De esta forma, la organización aprende de cada muestra y mejora continuamente su estrategia de mantenimiento, dando un paso más hacia la confiabilidad basada en datos.

13. Plan de Mantenimiento Predictivo por Condición

13.1 Integración del Plan Tribológico con SAP PM

La incorporación del plan de mantenimiento predictivo dentro del sistema corporativo (SAP PM) es un elemento clave para formalizarlo y garantizar su ejecución sostenida. En este apartado se detalla cómo se integrarán las nuevas actividades y hallazgos en los procesos de SAP:

Creación de planes de mantenimiento por condición. Se propone configurar en SAP planes de mantenimiento basados en condición para cada vehículo o grupo de equipos con características similares, diferenciándolos de los planes preventivos actuales que operan mediante intervalos fijos de tiempo, kilometraje u horas de funcionamiento, en este esquema, la intervención estará asociada con la condición observada en el activo y podrá apoyarse en puntos de medida vinculados con cada equipo, por ejemplo, podrá crearse un punto denominado “Calidad de aceite de motor” en el cual se registren los resultados obtenidos después de cada análisis mediante estados como Normal, Alerta o Crítico, de esta manera, cuando los valores registrados superen los límites establecidos, el sistema podrá generar un aviso de mantenimiento o activar la planificación de una orden de trabajo, permitiendo que los resultados del monitoreo tribológico se conviertan en acciones concretas dentro del sistema de gestión.

Avisos y órdenes asociados con el análisis de aceite. Cada vez que el laboratorio reporte una condición fuera de los parámetros establecidos, el responsable de mantenimiento deberá generar un aviso en SAP que documente el hallazgo y permita iniciar el proceso correspondiente de evaluación e intervención, para ello podrá utilizarse una clase de aviso existente relacionada con diagnóstico de condición o, si la configuración de la organización lo

permite, establecer una identificación específica para los eventos derivados del análisis de aceite, por ejemplo, ante la detección de trazas de refrigerante en el lubricante se registrará el hallazgo, se adjuntará el informe del laboratorio y se asignará una prioridad de acuerdo con la severidad identificada, posteriormente, el aviso podrá derivar en órdenes como inspeccionar el enfriador de aceite, revisar posibles fugas internas o realizar el cambio inmediato de aceite y filtro, permitiendo que SAP registre de manera diferenciada las intervenciones cuyo origen corresponde al monitoreo predictivo.

Adaptación progresiva de los planes existentes. El mantenimiento preventivo basado en horas o kilometraje no deberá eliminarse de manera inmediata, sino ajustarse progresivamente conforme se obtenga información suficiente sobre la condición real de los equipos, por ejemplo, si el fabricante establece un cambio de aceite cada 250 horas y los análisis muestran de manera consistente que el lubricante mantiene condiciones adecuadas al alcanzar dicho intervalo, podrá evaluarse técnicamente una posible ampliación de la frecuencia, mientras que si se detectan señales de degradación antes del periodo programado podrá adelantarse la intervención, durante las primeras etapas ambos enfoques coexistirán, de manera que los mantenimientos preventivos continuarán ejecutándose mientras el análisis de aceite permitirá anticipar o adicionar tareas cuando las condiciones observadas lo justifiquen, posteriormente, y una vez se disponga de suficientes datos históricos, podrán revisarse aquellas actividades que resulten redundantes.

Registro de resultados e informes en SAP. Los informes emitidos por el laboratorio deberán vincularse con los avisos, órdenes de trabajo o equipos correspondientes, con el propósito de construir un historial centralizado sobre la condición de cada activo, además de adjuntar los documentos técnicos, resulta conveniente registrar en los campos disponibles los principales hallazgos mediante una nomenclatura estandarizada que facilite posteriormente la

búsqueda y análisis de eventos recurrentes, esta trazabilidad permitirá conocer cuántos avisos fueron generados a partir del análisis tribológico, cuántos derivaron en intervenciones y qué tipos de condiciones se presentaron con mayor frecuencia, fortaleciendo la construcción de indicadores para evaluar posteriormente la efectividad del programa.

Definición de roles y flujo de trabajo. La integración del plan requiere establecer responsabilidades claras para el registro, análisis y tratamiento de la información, en este sentido, el ingeniero de confiabilidad podrá asumir la revisión de los resultados del laboratorio y la generación de avisos cuando se identifiquen condiciones de alerta o criticidad, mientras que los planificadores de mantenimiento y responsables de taller deberán gestionar estas notificaciones mediante la asignación de recursos, repuestos, tiempos de intervención y personal requerido, una vez finalizado el trabajo, la orden deberá cerrarse registrando las actividades realizadas y los hallazgos encontrados, de manera que esta información retroalimente el análisis de confiabilidad y permita evaluar posteriormente si la intervención evitó una falla de mayor consecuencia.

En conjunto, la integración del plan tribológico con SAP PM busca evitar que el mantenimiento basado en condición funcione como una actividad independiente de los procesos habituales de la organización, por el contrario, se pretende que las alertas generadas por los análisis de aceite sean registradas, evaluadas, atendidas y cerradas dentro del mismo ciclo de gestión utilizado para las demás actividades de mantenimiento, esto permitirá relacionar los resultados tribológicos con indicadores como MTBF, MTTR, disponibilidad, número de fallas y costos de intervención, además de fortalecer la trazabilidad y la construcción de una base histórica de información sobre la condición de los activos, de esta manera, la propuesta se articula con los principios de gestión de activos y mejora continua asociados con la familia ISO

55000 y facilita que las decisiones de mantenimiento se sustenten progresivamente en evidencia objetiva sobre el estado real de la flota.

13.2 Matriz de Decisiones de Mantenimiento Basada en Condición

La matriz de decisiones es la herramienta central que vincula los resultados del análisis de aceite con acciones de mantenimiento concretas. Básicamente, traduce la información técnica (ppm de metales, índices, etc.) en un lenguaje de decisiones: “hacer algo ahora/monitorear/continuar normal. A continuación, se presenta en la Tabla 18 y Tabla 19 un extracto simplificado de dicha matriz, abarcando algunos modos de falla identificados por FMEA (Análisis Modal de Fallos y Efectos) relevantes a la lubricación.

Tabla 18

Matriz de decisiones de mantenimiento basada en condición

Modo de Falla (Componente)	Indicadores en Análisis de Aceite	Límites/Umbrales de Alerta	Acción Recomendada	Base FMEA/ Justificación Técnica	Comentarios Operativos
Desgaste anormal de cojinetes de motor	Incremento de Fe, Pb y Cu en el análisis.	Fe > 50 ppm o tendencia ascendente. Pb/Cu > 20 ppm. Fe > 100 ppm o partículas ferromagnéticas visibles → crítica.	Inspeccionar condición de cojinetes en siguiente paro programado.		
			Si Fe >100 ppm o partículas grandes, detener y desmontar cárter inmediatamente.	Cojinete desgastado puede llevar a falla catastrófica de motor; se actúa preventivamente ante alerta	Prioridad alta. Acción temprana evita daño total del motor y costos de overhaul.
			Realizar ferrografía para confirmar origen.	temprana.	
			Cambiar aceite y aumentar frecuencia de muestreo.		
Contaminación por coolant (glicol) en aceite	Presencia de glicol, agua, Na/K elevados.	Glicol detectado. Agua > 0.1%. Na/K fuera de rango.	Detener equipo inmediatamente.		
			Diagnóstico: prueba de presión sistema de enfriamiento, inspección de enfriador y empaques.	El glicol destruye la lubricidad y provoca falla severa de motor si continúa la operación.	Crítico. Acción inmediata requerida; intervención no diferible.

Modo de Falla (Componente)	Indicadores en Análisis de Aceite	Límites/Umbrales de Alerta	Acción Recomendada	Base FMEA/Justificación Técnica	Comentarios Operativos
			Reemplazar aceite y filtro tras reparación.		
			Generar orden SAP de emergencia.		
Ingreso de polvo abrasivo (falla filtración aire)	Aumento de Si y Al en aceite.	- Si > 20 ppm y ascendente. - Acompañado de Al alto.	Revisar sistema de filtrado de aire (filtro roto, mal sellado, ingreso secundario). Corregir causa, cambiar filtro y aceite. Tomar muestra de control post-corrección (confirmar descenso de Si).	El polvo de sílice causa desgaste abrasivo acelerado en pistones y camisas.	Acción preventiva; evita pérdida de compresión y rayado de cilindros.
Degradación del aceite por oxidación térmica	Aumento de viscosidad, TAN alto, presencia de lodos.	Viscosidad > +10% nominal. TAN > 3 mgKOH/g. Aceite oscuro, olor acre.	Cambiar aceite y filtro inmediatamente. Revisar causa raíz: sobrecalentamiento, termostato, radiador, carga. Ajustar intervalos de cambio hasta estabilizar condición.	El aceite oxidado pierde propiedades lubricantes, generando desgaste acelerado.	Acción correctiva y preventiva combinada. Controlar temperatura de operación.
Dilución de aceite por combustible (inyección defectuosa)	Olor a diésel, baja viscosidad, % de combustible.	Diésel > 5%. Viscosidad reducida notablemente.	Revisar sistema de inyección (inyectores, bomba). Cambiar aceite. Muestreo de control tras 50 h para verificar si reaparece la dilución.	La dilución reduce la película lubricante, riesgo de agarrotamiento de motor.	Acción preventiva temprana; evita falla por pérdida de viscosidad.
			Si persiste, planificar reparación mayor.		
Contaminación en sistema hidráulico (ISO Code)	Incremento de partículas sólidas.	Cambio de ISO 20/18/15 → fuera de norma.	Realizar filtrado off-line inmediato. Revisar respiradores, sellos y filtros. Confirmar mejora con nuevo análisis.	Partículas sólidas deterioran válvulas y bombas hidráulicas.	Acción inmediata en sistemas críticos de control o dirección.

Modo de Falla (Componente)	Indicadores en Análisis de Aceite	Límites/Umbrales de Alerta	Acción Recomendada	Base FMEA/Justificación Técnica	Comentarios Operativos
Aceite con TBN bajo (ligera degradación sin otros síntomas)	TBN ligeramente por debajo del límite, pero sin correlato de metales o viscosidad.	TBN levemente bajo.	No intervención inmediata. Acortar intervalo de cambio. Repetir análisis en corto plazo para confirmar tendencia.	Enfoque RCM: no toda desviación requiere acción; se prioriza según riesgo.	Permite optimizar costos evitando mantenimiento innecesario.

Tabla 19*Criterios Generales de la Matriz*

Aspecto	Descripción
Principio RCM aplicado	Cada parámetro del análisis de aceite está vinculado a un modo de falla y a una acción proporcional a su criticidad. No se realizan tareas sin sentido preventivo.
Integración con SAP	Los límites definidos pueden reflejarse en puntos de medida SAP, generando avisos automáticos y órdenes de trabajo según los umbrales superados.
Revisión periódica	Se establecerá una reunión mensual de confiabilidad para revisar los resultados de análisis, validar la aplicación correcta de la matriz y ajustar umbrales o acciones según lecciones aprendidas.
Base FMEA	La FMEA priorizó los modos de falla con mayor RPN (Número de Prioridad de Riesgo). Los más críticos cuentan con múltiples parámetros de vigilancia (metales, viscosidad, presión, etc.).
Objetivo final	Asegurar que el plan tribológico sea proactivo, pasando del monitoreo pasivo a la acción preventiva temprana, reduciendo los eventos de falla sorpresa (Y2).

La matriz completa incluye muchos más casos, incluyendo parámetros del sistema hidráulico, por ejemplo, si código ISO pasa de 20/18/15 -> realizar filtrado off-line inmediato y verificar respiradores, etc., y también considera acciones de no intervención. Es importante resaltar que no toda alerta implica necesariamente desarmar equipos. Por ejemplo, si la única alarma es un ligeramente bajo TBN pero todo lo demás normal, la acción podría ser simplemente acortar el siguiente intervalo de cambio o hacer un nuevo análisis en poco tiempo. Se sigue el principio RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) de que cada tarea debe tener sentido

frente a un modo de falla. Aquí, cada umbral en el aceite está ligado a un modo de falla identificado y a una respuesta optimizada (puede ser inspección, mantenimiento menor como cambio de filtro, o mayor como overhaul, según la severidad).

La FMEA realizada para los componentes lubricados del vehículo sirvió como base para establecer esta matriz. En dicha FMEA se priorizaron modos con alta criticidad (combinación de probabilidad + impacto). Así, se aseguraron acciones para los modos de mayor RPN (número de prioridad de riesgo). Un ejemplo: falla de cojinetes de motor por lubricante contaminado tenía RPN alto, de ahí múltiples parámetros vigilan ese modo (metales, presión aceite, etc.). En cambio, un modo de menor riesgo (ej. ligera varnish en hidráulico) puede no disparar acción hasta niveles muy altos.

La matriz de decisiones será incluida en el Manual del Plan de Mantenimiento por Condición, para consulta de todos los involucrados. Además, se buscará plasmarla en el sistema: por ejemplo, los límites de SAP pueden reflejar esta matriz al generar automáticamente ciertos avisos. No obstante, siempre habrá juicio de ingenieros en la evaluación final; la matriz guía, pero no sustituye criterio. Reuniones de revisión de condición: Se institucionalizará una reunión mensual de confiabilidad donde se revisen todos los casos de análisis de aceite del mes y se valide que la matriz se aplicó correctamente, ajustando decisiones si es necesario y capturando lecciones aprendidas.

En general, la matriz de decisiones garantiza que el plan tribológico no se quede en monitoreo pasivo, sino que activa respuestas concretas basadas en las mejores prácticas para atacar las causas antes de la falla. Este enfoque encarna el concepto de mantenimiento predictivo proactivo: no solo predice, sino que previene. Se espera con ello reducir drásticamente los

eventos sorpresivos (Y2), puesto que estaremos “leyendo” las señales tempranas y actuando en consecuencia (Des-Case Corporation, 2021).

13.3 Ajustes al Plan de Mantenimiento Actual

Con la introducción del mantenimiento predictivo por condición, será necesario realizar ciertos ajustes al plan de mantenimiento preventivo existente en Ecopetrol Campo Nare, buscando una integración eficiente y evitando redundancias. Algunos ajustes contemplados son:

Reducción de frecuencia de tareas preventivas rutinarias: Si el plan vigente incluía cambios de aceite estrictos cada X horas sin falta, ahora con el monitoreo podemos ser más flexibles. Por ejemplo, inicialmente podríamos extender un 10–20% los intervalos de cambio de aceite en motores que consistentemente muestren buenas condiciones tribológicas. Esto se haría de forma controlada, monitoreando que los análisis sigan saliendo normales en la extensión. Esta optimización evitará paradas innecesarias y ahorrará costos de insumos, sin comprometer confiabilidad gracias a la vigilancia continua. Como respaldo teórico, muchos fabricantes hoy sugieren intervalos variables apoyados en análisis de aceite en lugar del fijo tradicional, justamente para adecuarse a la condición real (Des-Case Corporation, 2021).

Eliminación de tareas duplicadas: Algunos chequeos en lista de inspección pudieran solaparse con lo que el plan de aceite cubre. Por ejemplo, puede existir una tarea de Verificar viscosidad y nivel de aceite mensualmente en campo. El técnico posiblemente solo revisaba el nivel y el color, pero ahora ese control es mucho más riguroso vía laboratorio. Por tanto, se podría eliminar o bajar frecuencia de esa inspección visual, concentrando el esfuerzo en la toma de muestra para análisis real. Igualmente, inspecciones de revisar estado de filtros podrían recalibrarse: el análisis de partículas nos dirá si un filtro está dejando pasar suciedad, complementando la inspección física.

Inclusión de nuevas tareas de mantenimiento condicionadas: En el plan actual puede que no existan tareas como filtrado del aceite hidráulico salvo cuando falla algo. Con el análisis de aceite, es previsible que se recomiende filtrados preventivos off-line si vemos conteos de partículas medianamente altos antes de esperar a un fallo de válvula. Estas tareas se incorporarán como planificables. Otro ejemplo, es el flushing o lavado interno de sistemas en caso de contaminación severa, antes no se consideraba hasta una falla, ahora puede ejecutarse proactivamente cuando un análisis lo sugiera, por ejemplo, lodos pesados. En SAP, esto se implementará creando planes de mantenimiento específicos a demanda que se activan al detectarse la condición.

Priorizar componentes según criticidad tribológica: El análisis de criticidad realizado y la FMEA permitirán enfocar los esfuerzos preventivos en componentes vitales. Por ejemplo, si un cierto vehículo era sometido a un overhaul general cada 2 años por política, quizá descubramos que la mayor parte de sus problemas provenían solo del motor y no de la transmisión. Con datos en mano, se podría renegociar el alcance de ciertos mantenimientos mayores: tal vez posponer intervenir transmisión hasta ver algún síntoma en aceite. En suma, personalizar los planes a la realidad de cada activo. Esto es un principio RCM: no sobre-mantener donde no hace falta, y sí mantener donde agrega valor.

Gestión de repuestos y stock: Un ajuste indirecto pero importante: con el plan predictivo podremos anticipar ciertas necesidades de repuestos. Por ejemplo, si vemos desgaste de cojinetes incipiente, podemos ordenar repuestos con tiempo antes de la intervención planificada. Esto reduce urgencias y costos express. También quizá podemos optimizar stock: si esperamos al análisis para decidir cambio de aceite, no hace falta tener tanto volumen almacenado por si acaso

en bodega, se puede programar su entrega justo cuando análisis indique. En el largo plazo, la logística de mantenimiento se vuelve más eficiente.

Evaluación y revisión periódica del plan: Se debe institucionalizar que este plan tribológico no es estático. Cada cierto tiempo, por ejemplo, anualmente, se revisarán los resultados obtenidos: ¿se redujeron fallas?, ¿los intervalos propuestos resultaron adecuados o se ajustarán más?, ¿algún parámetro resultó poco útil y otro faltante? Con base en esa evaluación, se actualizarán las rutinas en SAP. Esto refina el plan continuamente y asegura que se mantenga alineado a la condición real. En el primer año, seguramente se harán varios ajustes rápidos conforme se descubran optimizaciones.

En general, el plan de mantenimiento por condición complementará y optimizará el plan preventivo existente, mas no lo elimina de tajo. La experiencia de la industria muestra que la mejor estrategia es híbrida: combinar mantenimiento basado en condición con preventivo sistemático donde tenga sentido, y un toque de correctivo cuando es inevitable. Por ejemplo, componentes cuyo monitoreo es difícil o cuyo costo de falla es bajo quizás sigan con mantenimiento calendarizado o incluso run-to-failure. Pero los componentes lubricados críticos que antes se atendían por horario ahora se atenderán cuando la condición lo indique, aumentando la disponibilidad y evitando intervenciones innecesarias. Este cambio de paradigma se irá plasmando en los documentos oficiales de mantenimiento del activo Nare, con la aprobación de ingeniería y confiabilidad, y comunicándolo al personal técnico para su comprensión y apoyo.

13.4 Cronograma de Implementación Operativa

Para llevar a cabo el plan predictivo, se elaboró la Tabla 20 que es un cronograma de implementación que considera las fases iniciales, pilotaje y plena ejecución.

Tabla 20*Fases del Plan de Mantenimiento Predictivo*

Fase	Duración estimada	Actividades principales	Objetivos/Resultados esperados
Fase 1: Preparación	0–1 mes	- Desarrollo de documentos: procedimientos, matriz, formatos. - Configuración inicial en SAP (puntos de medida, códigos de aviso, etc.). - Contratación o adecuación de laboratorio. - Capacitación inicial a técnicos en toma de muestra. - Adquisición de kits de muestreo, válvulas y bombas de vacío. - Muestreo en un subconjunto de equipos críticos (camión vacío, bombero, lubricador).	- Disponer de toda la documentación y configuración base. - Contar con laboratorio y materiales listos. - Personal técnico capacitado. - Fase considerada teóricamente completada en este documento.
Fase 2: Piloteo controlado	2–4 meses	- Ajuste de logística: tiempos de envío y resultados, frecuencia de muestreo, capacidad del laboratorio. - Validación del registro de avisos por condición en SAP.- Documentar resultados iniciales (“quick wins”). - Extensión del muestreo a toda la flota según frecuencias definidas.	- Calibrar el proceso completo en entorno controlado. - Obtener resultados tempranos que demuestren eficacia. - Generar confianza en el sistema predictivo.
Fase 3: Despliegue total	5–12 meses	- Ejecución de rutinas mensuales/bimestrales de muestreo y análisis. - Registro sistemático de resultados en SAP y ejecución de acciones. - Reuniones mensuales de revisión y seguimiento de indicadores. - Evaluación del impacto del plan (reducción de fallas, confiabilidad, costos).	- Implementación completa del plan en operación diaria. - Reducción progresiva de fallas y aumento de confiabilidad. - Consolidación del proceso de mantenimiento predictivo.
Fase 4: Evaluación y mejora continua	>12 meses	- Identificación de oportunidades de mejora. - Posible incorporación de análisis complementarios (vibraciones, etc.).	- Incorporar el plan tribológico a la cultura de mantenimiento. - Mantener mejora continua del sistema predictivo. - Escalar buenas prácticas dentro de la organización.

Fase	Duración estimada	Actividades principales	Objetivos/Resultados esperados
		- Expansión a otros campos de Ecopetrol.	

Un aspecto importante del cronograma es coordinar con la programación de operaciones. Por ejemplo, para tomar muestras se requiere tener los equipos disponibles brevemente, aunque no es intrusivo, conviene coordinar en paros o cuando estén en base. Entonces, se sincronizará el calendario de muestreo con la planificación semanal de operaciones: se identificarán ventanas, por ejemplo, tal día camión regresa de ruta y se aprovecha de inmediato para muestrear aceite caliente. Esto minimiza impacto y crea disciplina.

Otra consideración es la gestión de repuestos e intervenciones derivadas, ya que el cronograma contempla reservas de tiempo en talleres por si análisis indica hacer correctivos. Es decir, se mantiene cierta capacidad ociosa planificada en programación de mantenimiento para atender avisos emergentes de condición. Esto es una ventaja frente a fallas imprevistas, pues al ser más predecible, se puede asignar anticipadamente espacio en agenda de mantenimiento para solucionar los hallazgos.

En términos de costos y recursos: durante la implementación inicial se requerirá inversión en capacitación, equipos de muestreo y análisis. Sin embargo, se espera que una vez en régimen, el programa funcione con los recursos normales del departamento, con un ligero incremento en horas de técnicos dedicadas a muestrear, que se compensa con horas evitadas de reparaciones mayores. El cronograma considera hitos de presupuesto como la instalación de puntos de muestreo quizás durante paradas mayores planeadas.

Resumiendo, el plan de mantenimiento predictivo por condición cuenta con un cronograma bien definido para su puesta en marcha, evitando improvisaciones. En ~3 a 6 meses

se prevé lograr su plena operatividad, con revisiones periódicas. Esta planificación temporal es crucial para gestionar el cambio sin afectar la disponibilidad, porque se va introduciendo el plan escalonadamente y ajustando sobre la marcha. La visión es que, tras un año, el plan esté maduro y forme parte natural del sistema de mantenimiento del activo Nare, mostrando resultados tangibles en reducción de fallas.

13.5 Roles y Responsabilidades en la Ejecución del Plan

La implementación efectiva del mantenimiento predictivo requiere delinear claramente quién hace qué. A continuación, en la Tabla 21 se definen los roles principales y sus responsabilidades asociadas al plan tribológico.

Tabla 21

Roles y responsabilidades en el programa de mantenimiento predictivo

Cargo / Rol		Función Principal	Responsabilidades Clave
Ingeniero de Confiabilidad Especialista en Lubricación	de / en	Liderar técnica y estratégicamente el programa.	- Supervisar y programar la toma de muestras. - Revisar e interpretar informes de laboratorio. - Alimentar la matriz de decisión y recomendar acciones de mantenimiento. - Llevar estadísticas e indicadores (% reducción de fallas, tendencias de parámetros). - Comunicar resultados a la gerencia. - Mantener actualizados los procedimientos y límites del plan. - Servir de enlace entre los datos técnicos y las decisiones operativas. - Requiere sólidos conocimientos en tribología y análisis de lubricantes.
Técnicos de Mantenimiento (Campo / Taller)	de	Ejecutar en terreno las actividades de muestreo y mantenimiento.	- Realizar la toma de muestras siguiendo los procedimientos establecidos. - Garantizar la calidad de las muestras (temperatura, limpieza). - Completar los formatos con datos

Cargo / Rol	Función Principal	Responsabilidades Clave
Planificador de Mantenimiento / Programador SAP	Integrar el plan predictivo en la planificación de mantenimiento.	operativos. - Ejecutar intervenciones derivadas (cambio de filtros, etc.) según órdenes de trabajo. - Actuar como “champions” del programa, promoviendo la disciplina de muestreo. - Asegurar consistencia y ausencia de contaminación. - Agendar y programar actividades periódicas de toma de muestras en SAP. - Convertir avisos del ingeniero de confiabilidad en órdenes de trabajo. - Asignar recursos y fechas en el calendario de mantenimiento. - Mantener actualizados puntos de medida y notificaciones en SAP. - Asegurar que las recomendaciones se traduzcan en trabajos ejecutados oportunamente. - Garantizar disponibilidad de técnicos, herramientas y presupuesto. - Autorizar paradas planificadas para correcciones preventivas.
Jefe de Mantenimiento/Coordinador de Taller	Asegurar recursos y cumplimiento operativo del programa.	- Priorizar avisos críticos y coordinar su atención. - Verificar el cumplimiento de rutinas de muestreo. - Facilitar logística (transporte de muestras, compra de kits). - Actuar como patrocinador interno del programa. - Facilitar acceso a equipos durante muestreo. - Reportar condiciones anómalas (temperaturas, consumo de aceite, ruido, etc.).
Operadores / Conductores de Vehículos	Apoyar y colaborar en la ejecución en campo.	- Extraer muestras básicas en campo remoto cuando sea necesario. - Participar en capacitaciones básicas de monitoreo. - Fomentar el sentido de pertenencia y cuidado del equipo.
Laboratorio de Análisis (Interno o Externo)	Proveer análisis confiable y oportuno de muestras.	- Analizar según métodos normalizados (ASTM u otros). - Emitir informes claros con interpretaciones y alertas. - Notificar hallazgos críticos de inmediato al

Cargo / Rol	Función Principal	Responsabilidades Clave
Gerencia de Mantenimiento/Confiabilidad	Patrocinar, financiar y dar continuidad institucional al programa.	ingeniero responsable. - Cumplir plazos de entrega (ej. 48 horas desde recepción). - Mantener comunicación continua con el ingeniero de confiabilidad. - Garantizar calidad de resultados y trazabilidad. - Aprobar presupuesto para equipos, análisis y formación. - Promover la integración del plan con otras áreas (Operaciones, HSE). - Evaluar el ROI del programa. - Alinear el plan con la estrategia corporativa de activos (ISO 55000). - Asegurar sostenibilidad y permanencia del programa en el tiempo. - Garantizar el manejo adecuado de aceites y residuos peligrosos. - Asegurar cumplimiento de normas ambientales y de seguridad.
Profesional HSE (Salud, Seguridad y Ambiente)	Asegurar cumplimiento normativo y apoyar la gestión ambiental.	- Cuantificar beneficios ambientales (reducción de residuos, derrames evitados). - Incluir resultados del programa en los indicadores HSE. - Promover el apoyo interdepartamental al plan.

Al ser asignados los roles de la Tabla 19, se elaborará un RACI (Responsable, Accountable, Consulted, Informed) matrix para las principales actividades. Por ejemplo: Toma de muestra: R= Técnico Mantenimiento, A= Jefe Mantenimiento, C= Ingeniero Confiabilidad (para dudas), I= Operador. Revisión de informe lab: R= Ing. Confiabilidad, A= Jefe Confiab., C= Técnico, I= Planificador. Y así sucesivamente. Esto se incluirá en el plan escrito para que cada quien entienda sus funciones.

El éxito del plan depende de esta clara asignación: no basta con equipo y datos, se requiere responsabilidad y cultura de respuesta. La implementación de roles dedicados, como un especialista tribológico, o al menos un ingeniero enfocado, es una mejor práctica respaldada por

la industria, pues asegura continuidad en el seguimiento. Por otro lado, empoderar a los técnicos y operadores crea esa cultura proactiva necesaria: se busca que ellos mismos valoren los resultados, por ejemplo, que un conductor pregunte “¿cómo salió el aceite de mi camión?”, y actúen en consecuencia. Con estos roles bien establecidos, el plan tribológico se convierte en un proceso colaborativo, integrado al sistema de gestión de mantenimiento. En suma, “personas + procesos + tecnología” alineados garantizarán que el plan predictivo por condición realmente se ejecute y genere los beneficios esperados.

14. Evaluación del Impacto Esperado

14.1 Impacto Operativo y Técnico

La implementación del plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de aceite podría generar mejoras operativas y técnicas en la gestión de la flota del campo Nare, principalmente mediante la detección temprana de condiciones asociadas con desgaste, contaminación y degradación del lubricante, por esta razón, los impactos esperados se relacionan con la reducción de fallas imprevistas, el aumento de la confiabilidad y disponibilidad, la disminución de los tiempos de reparación, la optimización de los intervalos de mantenimiento y el fortalecimiento de una cultura de gestión basada en información objetiva sobre la condición de los activos.

Reducción de fallas imprevistas y aumento de la confiabilidad. La identificación de condiciones anormales antes de que evolucionen hacia fallas funcionales puede contribuir a disminuir las averías asociadas con motores, transmisiones y sistemas hidráulicos, especialmente aquellas clasificadas como fallas de mayor criticidad, en este sentido, el seguimiento de partículas de desgaste, contaminación y propiedades fisicoquímicas del lubricante permitiría anticipar intervenciones y reducir la probabilidad de daños severos como deterioro de cojinetes, problemas de lubricación o desgaste acelerado de componentes, este comportamiento debería reflejarse progresivamente en un aumento del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), aunque la magnitud real de la mejora solo podrá establecerse después de implementar el plan y comparar sus resultados con la línea base histórica.

Mejora de la disponibilidad mecánica. La disminución de fallas no planificadas y la posibilidad de programar las intervenciones con mayor anticipación pueden contribuir a

incrementar la disponibilidad de los vehículos, especialmente de aquellos que cumplen funciones críticas como los camiones de bomberos, vacío y cisterna, debido a que cada reducción en los tiempos de indisponibilidad representa un mayor número de horas disponibles para atender actividades productivas o situaciones de emergencia, por esta razón, la disponibilidad mecánica deberá utilizarse como uno de los principales indicadores para evaluar posteriormente el desempeño del plan, comparando su evolución con los valores registrados antes de la implementación.

Disminución del Tiempo Medio de Reparación (MTTR). El mantenimiento basado en condición también puede contribuir a reducir la duración promedio de las intervenciones, debido a que una anomalía detectada en una etapa inicial suele requerir acciones de menor complejidad que una falla que ha evolucionado hasta comprometer completamente un componente, por ejemplo, identificar oportunamente señales de desgaste puede permitir realizar una inspección o sustitución localizada antes de que sea necesaria una reparación mayor del motor, además, la anticipación facilita la disponibilidad de repuestos, herramientas y personal antes de ejecutar el mantenimiento, disminuyendo posibles tiempos de espera asociados con reparaciones de emergencia.

Optimización de los intervalos de mantenimiento. Otro impacto esperado corresponde a la posibilidad de ajustar determinadas frecuencias de intervención de acuerdo con la condición real del lubricante y de los sistemas monitoreados, evitando tanto mantenimientos prematuros como intervenciones realizadas después de que el aceite haya perdido sus propiedades adecuadas, en este sentido, si los análisis muestran tendencias estables podrá evaluarse técnicamente la ampliación de algunos intervalos, mientras que la presencia de condiciones anormales permitirá anticiparlos cuando sea necesario, de esta forma, los recursos de

mantenimiento pueden concentrarse en los activos que realmente presentan señales de deterioro y reducirse intervenciones innecesarias, aunque cualquier modificación deberá estar sustentada en información histórica suficiente, recomendaciones técnicas y criterios de seguridad.

Alineación con mejores prácticas y fortalecimiento de la cultura de mantenimiento.

Desde la perspectiva técnico-organizacional, la implementación del plan contribuirá a avanzar desde decisiones basadas principalmente en intervalos establecidos hacia un enfoque complementado con información real sobre la condición de los equipos, esta transición puede fortalecer la trazabilidad, la priorización de actividades y la toma de decisiones sustentada en datos, además, su articulación con los procesos de gestión de activos favorece una cultura de prevención y mejora continua, aspecto coherente con lo señalado por Barrera (2022) respecto a la importancia de integrar el mantenimiento basado en condición con una gestión estratégica de los activos.

Capacidad para incorporar nuevas técnicas predictivas. Aunque la propuesta se concentra inicialmente en el análisis tribológico, la estructura definida para la toma de muestras, almacenamiento de información, interpretación de resultados, generación de alertas e integración con SAP puede servir posteriormente como base para incorporar otras tecnologías de diagnóstico, entre ellas análisis de vibraciones, termografía o sistemas de monitoreo continuo, de esta manera, el proyecto no solo busca resolver una necesidad inmediata relacionada con la condición de los lubricantes, sino también fortalecer progresivamente las capacidades técnicas de la organización para desarrollar estrategias predictivas de mayor alcance.

14.2 Impacto en Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente (HSE)

Un beneficio relevante del mantenimiento predictivo corresponde a su posible contribución en los ámbitos de seguridad industrial, salud ocupacional y gestión ambiental,

debido a que la detección temprana de condiciones anormales puede reducir la ocurrencia de fallas inesperadas y favorecer intervenciones planificadas, en el contexto del campo Nare, estos efectos pueden reflejarse en una menor exposición del personal a situaciones de emergencia, una reducción potencial en la generación de residuos asociados con cambios innecesarios de lubricante y un mayor control sobre eventos que puedan producir derrames o afectaciones ambientales.

Mayor seguridad del personal y reducción de riesgos operacionales. La disminución de fallas de alta criticidad puede contribuir a reducir la probabilidad de situaciones que comprometan la seguridad de los trabajadores o de la operación, debido a que una avería severa en motores, transmisiones o sistemas hidráulicos puede generar condiciones de riesgo durante el funcionamiento del vehículo o durante una reparación de emergencia, en este sentido, la detección anticipada de señales de desgaste o contaminación permite programar las intervenciones con mayor preparación, disponibilidad de recursos y aplicación de los procedimientos de seguridad establecidos, disminuyendo la necesidad de realizar reparaciones imprevistas bajo presión operativa y favoreciendo un entorno de mantenimiento más controlado.

Beneficios ambientales relacionados con residuos y posibles derrames. La optimización de los intervalos de cambio de aceite puede contribuir a reducir la generación de lubricante usado cuando los análisis demuestren que el producto mantiene condiciones adecuadas para continuar en servicio, evitando sustituciones realizadas únicamente por calendario cuando técnicamente no sean necesarias, por ejemplo, si después de la implementación se comprobara que determinados intervalos pueden ampliarse de manera segura, sería posible disminuir proporcionalmente el volumen de aceite descartado, aunque esta reducción deberá cuantificarse con datos reales de operación, asimismo, la detección temprana de fallas puede ayudar a prevenir averías severas

que ocasionen pérdidas de aceite o fluidos hidráulicos sobre el terreno, reduciendo el riesgo de contaminación del suelo o de cuerpos de agua y fortaleciendo la gestión ambiental de la operación.

También puede presentarse un beneficio indirecto sobre las emisiones cuando el monitoreo del lubricante contribuye a mantener los motores dentro de condiciones adecuadas de funcionamiento, debido a que problemas asociados con lubricación deficiente, desgaste excesivo o contaminación pueden afectar la eficiencia mecánica y el desempeño del sistema, sin embargo, cualquier reducción específica de emisiones deberá ser comprobada mediante indicadores propios de consumo, funcionamiento y desempeño de los vehículos y no asumirse únicamente a partir de la implementación del análisis tribológico.

Apoyo al cumplimiento y trazabilidad ambiental. La incorporación sistemática de los resultados de análisis de aceite también puede fortalecer la documentación utilizada para demostrar una gestión responsable de lubricantes y residuos, debido a que los registros permiten sustentar técnicamente las decisiones relacionadas con extensión o reducción de intervalos de cambio, identificar anomalías y mantener evidencia histórica sobre la condición de los equipos, esta información puede resultar útil para procesos de auditoría, seguimiento interno y mejora continua, al tiempo que facilita una respuesta más rápida ante eventos en los que sea necesario determinar las causas de una falla o establecer acciones para controlar sus posibles efectos ambientales.

Salud ocupacional y exposición a fluidos. La optimización de los cambios de lubricante puede disminuir la frecuencia con la que los trabajadores deben manipular aceites usados y otros fluidos asociados con las actividades de mantenimiento, reduciendo oportunidades de contacto dérmico, salpicaduras o exposición durante procesos de drenaje y reposición, aunque estas

actividades deben realizarse en todos los casos mediante procedimientos seguros y utilizando los elementos de protección personal correspondientes, disminuir intervenciones innecesarias representa una medida complementaria para reducir la exposición ocupacional a sustancias potencialmente peligrosas.

14.3 Indicadores Clave de Mantenimiento y Metas Proyectadas

Para evaluar el desempeño del plan de mantenimiento predictivo se han definido diferentes Indicadores Clave de Desempeño (KPI), los cuales permitirán comparar la situación de la flota antes y después de su implementación y determinar si las acciones propuestas contribuyen efectivamente a mejorar la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia del mantenimiento, en este sentido, los indicadores deberán ser monitoreados periódicamente y sus metas podrán ajustarse una vez se disponga de información suficiente sobre el comportamiento real de los equipos.

Disponibilidad mecánica de la flota. Este indicador permitirá establecer el porcentaje de tiempo durante el cual los vehículos permanecen disponibles para cumplir sus funciones operativas, tomando como referencia una línea base cercana al 97,5 %, se plantea inicialmente alcanzar valores iguales o superiores al 98,5 % durante el primer año y continuar mejorando progresivamente en periodos posteriores, aunque estas metas deberán validarse con los resultados obtenidos después de la implementación, el indicador será calculado tanto para la flota en conjunto como para los equipos de mayor criticidad, permitiendo identificar cuáles vehículos presentan mayores oportunidades de mejora en términos de reducción de tiempos de indisponibilidad.

Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF). Este indicador permitirá evaluar la evolución de la confiabilidad de los equipos mediante el análisis del tiempo promedio de operación entre fallas,

tomando como referencia el valor calculado para la línea base de la flota, se espera observar una tendencia creciente a medida que el monitoreo tribológico permita identificar y atender condiciones anormales antes de que evolucionen hacia fallas funcionales, por esta razón, más que establecer inicialmente incrementos definitivos, resulta conveniente realizar un seguimiento trimestral y comparar el comportamiento de cada equipo con sus registros históricos, especialmente en los vehículos que actualmente concentran el mayor número de incidencias.

Tiempo Medio de Reparación (MTTR). El seguimiento de este indicador permitirá establecer si la detección anticipada de anomalías contribuye a disminuir la duración promedio de las intervenciones, debido a que una falla identificada en una etapa temprana puede requerir reparaciones menos complejas que aquellas realizadas después de una avería severa, además, la posibilidad de planificar los trabajos con anticipación facilita la disponibilidad de repuestos, herramientas y personal, reduciendo tiempos asociados con la gestión de reparaciones de emergencia, por tanto, el propósito será identificar una tendencia descendente del MTTR una vez implementado el plan y no atribuir previamente una reducción específica sin contar con evidencia operacional.

Número de fallas mayores por año. Se llevará un registro específico de las fallas de mayor criticidad asociadas con motores, transmisiones y sistemas hidráulicos, comparando su comportamiento con la línea base histórica de la flota, la finalidad será determinar si el monitoreo de la condición del lubricante permite reducir progresivamente este tipo de eventos, particularmente aquellos relacionados con desgaste, contaminación o degradación del aceite, aunque podrá establecerse una meta inicial de reducción, su cumplimiento deberá evaluarse a partir de datos reales y considerando las condiciones particulares de operación de cada vehículo.

Órdenes de trabajo preventivas, predictivas y correctivas. Otro indicador relevante corresponderá a la proporción de intervenciones generadas de manera planificada frente a aquellas originadas después de una falla, debido a que uno de los propósitos del plan consiste precisamente en aumentar el número de acciones derivadas de alertas tempranas y disminuir las reparaciones correctivas de emergencia, en este sentido, la integración del análisis tribológico con SAP permitirá identificar cuántos avisos de condición generan órdenes de trabajo antes de que ocurra la falla y analizar progresivamente el cambio en la composición del mantenimiento ejecutado.

Ahorro en costos de mantenimiento. El desempeño económico del plan deberá evaluarse mediante la comparación entre los costos de implementación del programa y los beneficios asociados con la prevención de fallas, la optimización de los intervalos de cambio de lubricante y la reducción de tiempos de indisponibilidad, para ello podrán considerarse costos evitados de repuestos, mano de obra correctiva, reparaciones mayores y pérdidas asociadas con la indisponibilidad de los equipos, descontando los gastos correspondientes a análisis de laboratorio, toma de muestras, capacitación y administración del programa, este indicador permitirá calcular posteriormente la relación costo-beneficio y el retorno de la inversión con datos reales, evitando asumir anticipadamente valores de ahorro que todavía no han sido comprobados en la flota del campo Nare.

De manera complementaria, podrán incorporarse indicadores relacionados con la gestión HSE y la percepción operativa del programa, entre ellos el volumen de aceite usado generado por periodo, el número de incidentes ambientales relacionados con fugas o derrames de lubricantes y las interrupciones operativas asociadas con fallas vehiculares, asimismo, la percepción del personal de operación y mantenimiento podrá utilizarse como información complementaria para

identificar mejoras en la disponibilidad de los equipos y en la capacidad de respuesta frente a las necesidades diarias.

14.4 Evaluación Costo–Beneficio del Plan

Finalmente, para validar la factibilidad económica del plan, se realiza una evaluación costo–beneficio. Este Incluye los costos del programa y los beneficios tangibles/intangibles esperados como los que se presenta en las tablas 22, 23, 24 y 25.

Tabla 22

Costos del Plan Predictivo de Mantenimiento

Categoría de Costo	Descripción Detallada	Costo Estimado (USD)	Frecuencia / Observaciones
Costos de Implementación Inicial	- Adquisición de equipos de muestreo (bombas de vacío portátiles, válvulas de muestreo instaladas en equipos). - Capacitación al personal (horas de entrenamiento, material didáctico). - Configuración en SAP (horas de ingeniero). - Instalación de puntos de muestreo en aproximadamente 15 equipos (~\$500 cada uno, incluyendo mano de obra). - Análisis de laboratorio (~\$100 por muestra completa). - Promedio: 10 muestras/mes (~120 muestras/año).	\$10,000 – \$15,000	Inversión única (fase inicial de implementación).
Costos Operativos Continuos	- Costo de análisis anual: \$12,000. - Envíos y logística: ~\$2,000/año. - Horas-hombre de muestreo consideradas dentro de la operación normal. - Reposición de insumos (frascos y mangueras).	\$14,000/año	Costos recurrentes (operación continua).
Otros Costos	- Gestión de datos (mínimo). - Posible implementación futura de software especializado.	Bajo/No significativo inicial	Mínimos en la fase inicial.

Categoría de Costo	Descripción Detallada	Costo Estimado (USD)	Frecuencia / Observaciones
Total Estimado	Suma de costos iniciales y operativos del primer año.	\$24,000 – \$29,000 (primer año)	Incluye implementación y operación del primer ciclo anual.

Tabla 23

Beneficios cuantificables del plan predictivo de mantenimiento

Categoría de Beneficio	Descripción Detallada	Valor Estimado (USD / Año)	Comentarios / Observaciones
Costos de Mantenimiento Evitados	Reducción de reparaciones mayores (motores, transmisiones, componentes críticos). Ejemplo: evitar 1 falla de motor (\$20,000) y 1 de transmisión (\$10,000). Se proyecta evitar 2–3 fallas severas anuales conforme el plan madura.	≈ \$30,000 – \$45,000	Principal fuente de ahorro directo.
Reducción de Downtime Productivo	Disminución de paradas no planificadas. Cada hora de inactividad de un camión crítico cuesta ≈ \$500. Si se reducen 100 horas/año, se recuperan \$50,000.	≈ \$50,000	Impacto económico significativo en productividad.
Extensión de Vida Útil de Activos	Postergación de overhauls o reemplazos mayores. Incrementa la durabilidad de motores y componentes clave, reduciendo inversiones de capital (CAPEX).	Difícil de cuantificar, ahorro futuro estimado alto.	Beneficio financiero acumulativo (NPV positivo).
Ahorro en Lubricantes y Repuestos	Optimización de intervalos de cambio. Reducción de consumo de aceite y filtros (~15–20%). Si el gasto anual era \$10,000 → ahorro de ~\$2,000.	≈ \$2,000 – \$3,000	Ahorros moderados pero sostenibles.
Beneficios Intangibles (con impacto económico indirecto)	Cumplimiento ambiental (evita multas). Menor riesgo de accidentes. Mejor clima laboral y eficiencia del personal.	No cuantificable directamente	Contribuyen al desempeño global y sostenibilidad.

Tabla 24

Proyección financiera simplificada (primer año)

Concepto	Valor (USD)
Costo Total (implementación + operación)	\$29,000
Beneficios Conservadores (primer año)	\$55,000

Balance Neto (Beneficio – Costo)	+ \$26,000
ROI (Primer año)	≈ 1.9 (190%)

Tabla 25*Proyección Financiera (Años Subsiguientes)*

Concepto	Valor (USD / Año)
Costo Operativo (sin implementación inicial)	\$14,000
Beneficios Estimados	\$60,000 – \$80,000
ROI Estimado	≈ 4 – 5 (400–500%)

En general, económicamente el plan se justifica sólidamente. Un $ROI > 1$ en el primer año de inversión es excelente; a 2-3 años es de varios múltiplos. Incluso haciendo sensibilidad, aunque evitáramos menos fallas de lo esperado, todavía cubriría costos. Además, la inversión requerida es relativamente baja comparada con el presupuesto de mantenimiento global, que incluye reparaciones costosas. Así mismo, los indicadores de desempeño mencionados constituyen parte del beneficio, por ejemplo, mayor disponibilidad = más producción = más ingresos, difícil de cuantificar exactamente pero innegablemente positivo. Vale la pena mencionar un factor, que el plan trae mejoras que van más allá del dinero. Por ejemplo, la tranquilidad operativa, ya que saber que un camión bombero estará listo cuando se necesite, evitando potenciales tragedias es invaluable. El desarrollo de competencias técnicas en el personal como la interpretación de análisis, etc., también es ganancia para la organización.

Como colofón, este plan tribológico demuestra ser una inversión estratégica para Ecopetrol, porque protege sus activos, mejora su eficiencia, reduce costos y refuerza sus valores de seguridad y medio ambiente. Por eso, la recomendación es implementarlo y continuar alimentándolo, pues mientras más se utilice, más valor generará por su efecto acumulativo de datos y prevención. De hecho, la experiencia sugiere que, tras implementar análisis de aceite,

muchas empresas experimentan una transformación tan positiva que extienden la práctica a toda su flota e incluso a otros equipos rotativos. Campo Nare puede ser pionero y referente dentro de Ecopetrol en este sentido.

En sí, la evaluación integral del impacto esperado del plan es altamente favorable: operacionalmente asegura continuidad y confiabilidad, técnicamente eleva el nivel de mantenimiento, HSE contribuye a cero accidentes y menor huella ambiental, e económicamente produce ahorros y valor que superan con creces su costo. Esto confirma que diseñar e implementar un plan de mantenimiento predictivo tribológico no solo atiende un problema identificado (fallas por lubricación), sino que impulsa una mejora multidimensional en la gestión de activos del activo Nare. Con el compromiso de todos los involucrados y el soporte institucional, los beneficios descritos deberán empezar a materializarse en el corto plazo, consolidándose en el mediano plazo, llevando al campo Nare hacia estándares de clase mundial en mantenimiento automotriz industrial.

15. Conclusiones

El análisis histórico de fallas de la flota vehicular del campo Nare reveló que la degradación y contaminación del aceite lubricante fue un factor determinante en las averías más frecuentes y costosas de los equipos. Además, se identificó que un número reducido de vehículos críticos concentró la mayoría (~78%) de las fallas reportadas en el periodo analizado, lo que confirma la necesidad de enfocar los esfuerzos de mantenimiento predictivo en esos activos prioritarios con problemas recurrentes.

Se diseñó un plan tribológico de mantenimiento predictivo que establece puntos específicos de muestreo de aceite en los componentes críticos de cada vehículo, con frecuencias óptimas de toma de muestra definidas según la criticidad y severidad de operación, y parámetros clave de laboratorio a monitorear, como viscosidad, metales de desgaste, contaminantes, entre otros. Asimismo, se desarrolló una matriz de decisión que vincula los resultados del análisis de aceite con acciones de mantenimiento concretas, por ejemplo, programación de cambio de aceite, filtrado adicional o inspección de componentes, para detectar y abordar fallas incipientes antes de que escalen a fallas mayores. Este enfoque tribológico garantiza que el plan aborde directamente las causas raíz identificadas en el diagnóstico, proporcionando una respuesta técnica proactiva a la degradación del lubricante.

El plan predictivo propuesto se diseñó de manera articulada con la estrategia de mantenimiento por condición y con las herramientas de gestión utilizadas por Ecopetrol, con el propósito de favorecer su viabilidad operativa y evitar que el monitoreo tribológico funcione como una actividad independiente, para ello se establecieron criterios de intervención asociados con niveles de condición y acciones de mantenimiento, además de plantearse la integración de

los resultados del análisis de aceite con SAP PM, de modo que los hallazgos puedan generar avisos, órdenes de trabajo y registros históricos cuando las condiciones identificadas así lo requieran, esta articulación permitirá mantener la trazabilidad desde la toma de la muestra y el resultado del laboratorio hasta la decisión de mantenimiento adoptada, facilitando la incorporación progresiva del plan dentro de los procesos existentes de la organización.

Desde la perspectiva operacional, la implementación del plan podría contribuir a mejorar la confiabilidad y disponibilidad de la flota mediante la identificación temprana de procesos de desgaste, contaminación y degradación del lubricante antes de que evolucionen hacia fallas funcionales de mayor criticidad, en consecuencia, se espera que indicadores como el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) presenten una tendencia creciente y que la disponibilidad mecánica pueda mejorar respecto a la línea base establecida, mientras que el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) podría disminuir en aquellos eventos en los que la detección anticipada permita realizar intervenciones de menor complejidad y previamente planificadas, sin embargo, la magnitud real de estas mejoras deberá determinarse una vez implementado el plan mediante la comparación de los indicadores obtenidos con los registros históricos de la flota.

Desde la perspectiva económica, la evaluación realizada muestra un escenario favorable para la implementación del programa, con una estimación de retorno de la inversión superior a 1,9 durante el primer año bajo los supuestos establecidos en el análisis costo-beneficio, mientras que a mediano plazo el retorno proyectado podría aumentar como consecuencia de la reducción de reparaciones mayores, la optimización de los intervalos de cambio de lubricante y la disminución de tiempos de indisponibilidad, estos resultados deben interpretarse como proyecciones financieras y no como ahorros efectivamente obtenidos, debido a que dependen del número real de fallas evitadas, los costos de intervención y el comportamiento operativo de los

equipos después de la implementación, por esta razón, el desempeño económico definitivo deberá verificarse mediante el seguimiento de costos y beneficios reales del programa.

Adicionalmente, la propuesta presenta beneficios potenciales en materia de seguridad industrial, gestión ambiental y aprendizaje organizacional, debido a que la detección anticipada de condiciones anormales puede disminuir la exposición a fallas súbitas en componentes críticos y favorecer intervenciones ejecutadas bajo condiciones previamente planificadas, asimismo, la optimización de los intervalos de cambio de lubricante puede contribuir a reducir la generación innecesaria de aceite usado y filtros, mientras que la prevención de averías severas puede disminuir el riesgo de fugas o derrames asociados con fallas mecánicas, de esta forma, el plan puede aportar al fortalecimiento de las prácticas HSE de la organización sin atribuir previamente resultados que deberán comprobarse durante su aplicación.

Finalmente, el plan contribuye al fortalecimiento de las capacidades técnicas internas mediante la definición de procedimientos estandarizados para muestreo, análisis, interpretación de resultados, establecimiento de alertas y toma de decisiones basada en condición, además, la información generada podrá consolidarse como una base histórica para apoyar futuros análisis de confiabilidad e incorporar progresivamente otras técnicas predictivas, como análisis de vibraciones, termografía o monitoreo continuo, en este sentido, la propuesta desarrollada para el activo Nare puede constituir una referencia metodológica susceptible de adaptación en otros activos de Ecopetrol, siempre que previamente se evalúen sus condiciones particulares de operación, criticidad y mantenimiento.

16. Recomendaciones

Se recomienda implementar de manera progresiva y controlada el plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de aceite en la flota del campo Nare, comenzando con los vehículos identificados como de mayor criticidad y desarrollando inicialmente una fase piloto que permita validar los procedimientos de muestreo, análisis, interpretación y respuesta ante las alertas generadas, para ello será necesario asegurar el respaldo de la dirección de Operaciones y Mantenimiento, disponer de los recursos técnicos y económicos requeridos y definir claramente las responsabilidades relacionadas con la toma de muestras, envío al laboratorio, interpretación de resultados y ejecución de las intervenciones recomendadas, asimismo, resulta conveniente integrar el programa con SAP PM para garantizar que los hallazgos tribológicos formen parte del flujo habitual de gestión de mantenimiento y mantengan trazabilidad desde la detección de la condición hasta el cierre de la correspondiente orden de trabajo.

También se recomienda desarrollar un programa de capacitación dirigido al personal involucrado en la ejecución del plan, incluyendo ingenieros, técnicos, mecánicos y operadores, con énfasis en los fundamentos del análisis tribológico, procedimientos estandarizados de toma de muestras, prevención de contaminación durante el muestreo, registro de horas de funcionamiento y condiciones de operación, interpretación básica de los informes de laboratorio y criterios de actuación frente a estados normales, de alerta o críticos, debido a que la confiabilidad del diagnóstico depende directamente de la calidad de la muestra y de la información asociada con cada análisis, esta formación deberá complementarse con actividades periódicas de actualización que permitan mantener criterios homogéneos de interpretación y fortalecer una cultura de mantenimiento basada en condición y evidencia técnica.

Se sugiere establecer un sistema permanente de seguimiento y mejora continua del programa, mediante el análisis periódico de indicadores como disponibilidad mecánica, MTBF, MTTR, número de fallas mayores, proporción de órdenes preventivas, predictivas y correctivas, costos de mantenimiento y volumen de aceite usado generado, además, sería conveniente elaborar informes trimestrales que consoliden los resultados tribológicos de los equipos, incluyan tendencias históricas y relacionen las anomalías detectadas con las acciones de mantenimiento ejecutadas, esta información permitirá determinar si las frecuencias de muestreo, límites de alerta y criterios de intervención inicialmente establecidos continúan siendo adecuados o requieren ajustes de acuerdo con el comportamiento real de la flota.

A mediano plazo, se recomienda fortalecer la gestión digital de la información generada por el programa, evaluando las funcionalidades disponibles dentro de SAP y, cuando resulte técnicamente necesario, herramientas especializadas para almacenar, visualizar y analizar resultados de laboratorio, el propósito deberá ser reducir la dependencia de registros manuales, facilitar el seguimiento histórico por equipo y generar alertas oportunas ante desviaciones de los parámetros establecidos, de esta manera, la digitalización progresiva contribuirá a consolidar una base de datos estructurada que pueda utilizarse posteriormente para análisis de confiabilidad y optimización de las decisiones de mantenimiento.

Una vez acumulado un volumen suficiente de datos confiables, se recomienda evaluar la incorporación gradual de técnicas de analítica avanzada, inicialmente mediante análisis estadísticos de tendencias, correlaciones entre variables tribológicas y modos de falla, comportamiento histórico de los lubricantes y estimaciones de su vida útil remanente, posteriormente, si la cantidad y calidad de la información lo permiten, podría analizarse la conveniencia de desarrollar modelos de aprendizaje automático capaces de apoyar la

identificación de patrones anormales, clasificación de alertas o estimación del riesgo de falla, esta evolución tecnológica deberá realizarse únicamente después de disponer de una base histórica suficientemente robusta y de comprobar que los modelos aportan información adicional frente a los criterios técnicos convencionales.

De manera particular, una posible línea futura consiste en articular la información del monitoreo basado en condición con los análisis de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), relacionando las señales obtenidas mediante análisis tribológico con los modos de falla identificados para los diferentes sistemas y componentes críticos, esta integración permitiría evaluar qué parámetros presentan mayor capacidad para advertir determinados mecanismos de deterioro y, en etapas posteriores de madurez, podría servir como fundamento para desarrollar modelos predictivos orientados a estimar tendencias de degradación, priorizar alertas según la criticidad del activo y apoyar la selección de ventanas de intervención, sin sustituir el criterio técnico del personal responsable de mantenimiento.

Asimismo, se recomienda mantener y fortalecer las relaciones con laboratorios y proveedores especializados en análisis tribológico, seleccionando servicios que garanticen confiabilidad de los resultados, trazabilidad de las muestras, tiempos adecuados de respuesta y capacidad de asesoría técnica, además, estos aliados pueden contribuir en procesos de capacitación y actualización de métodos de ensayo de acuerdo con las normas técnicas aplicables, si en el futuro el programa se amplía significativamente a otros activos, podrá evaluarse la conveniencia económica y técnica de incorporar equipos portátiles de diagnóstico o desarrollar determinadas capacidades internas de análisis, siempre que el volumen de muestras y los requerimientos operativos justifiquen dicha inversión.

Finalmente, se recomienda evaluar la extensión progresiva de la estrategia hacia otras flotas o equipos lubricados de Ecopetrol únicamente después de comprobar los resultados obtenidos en el campo Nare, para ello deberán documentarse las lecciones aprendidas, dificultades de implementación, beneficios observados y ajustes realizados durante la operación del programa, posteriormente, estos elementos podrán utilizarse como referencia para diseñar pilotos en otros activos, adaptando las frecuencias, parámetros, límites de alarma y procedimientos a las condiciones particulares de criticidad y operación de cada instalación, de esta forma, el campo Nare podría constituirse en una experiencia de referencia para la ampliación gradual del mantenimiento basado en condición dentro de la organización, sin asumir que el mismo esquema puede trasladarse de manera directa a todos los contextos operativos.

Referencias Bibliográficas

Aguado, N. (2020, 16 de abril). *Toma de muestra para análisis de aceite*. CBM Connect.

<https://esp.cbmconnect.com/toma-de-muestra-para-analisis-de-aceite/>

Alavedra-Flores, C., Gastelu-Pinedo, Y., Méndez-Orellana, G., Minaya-Luna, C., Pineda-Ocas, B., Prieto-Gilio, K., Ríos-Mejía, K., & Moreno-Rojo, C. (2016). Gestión de mantenimiento preventivo y su relación con la disponibilidad de la flota de camiones 730E Komatsu-2013. *Ingeniería Industrial*, (34), 11–26.

<https://doi.org/10.26439/ing.ind2016.n034.529>

Amrani, M. A., Haddad, Y., Abdullameed, M., Hyder, O. S., Saif, A., Ghaleb, A. M., & Mejjaoui, S. (2022). A lubricating oil-based maintenance for diesel engines at the end-user: An effective predictive approach. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 16(5), 689–700. <https://jjmie.hu.edu.jo/vol16-5/04-JJMIE-161-22.pdf>

ASTM International. (2017). *ASTM D4739-17: Standard test method for base number determination by potentiometric titration*. <https://www.astm.org/d4739-17.html>

ASTM International. (2020). *ASTM D2896-20: Standard test method for base number of petroleum products by potentiometric perchloric acid titration*.

<https://www.astm.org/d2896-20.html>

ASTM International. (2021). *ASTM D445-21: Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity)*.

<https://www.astm.org/d0445-21.html>

- ASTM International. (2021). *ASTM D6304-21: Standard test method for determination of water in petroleum products, lubricating oils, and additives by coulometric Karl Fischer titration*. <https://www.astm.org/d6304-21.html>
- ASTM International. (2022). *ASTM D664-22: Standard test method for acid number of petroleum products by potentiometric titration*. <https://www.astm.org/d0664-22.html>
- ASTM International. (2023). *ASTM D5185-23: Standard test method for multielement determination of used and unused lubricating oils and base oils by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES)*. <https://www.astm.org/d5185-23.html>
- ASTM International. (s. f.). *Lista de normas ASTM en español*. <https://la.astm.org/es/standards/translations/>
- Azevedo, K., & Olsen, D. B. (2019). Engine oil degradation analysis of construction equipment in Latin America. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 25(2), 294–313. <https://doi.org/10.1108/JQME-02-2018-0013>
- Barrera Chaguezac, D. A. (2022). *El mantenimiento y su importante rol en la gestión de activos dentro de una empresa del sector de la construcción de infraestructura vial* [Trabajo de grado de especialización, Universidad de Antioquia]. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/b3e1661d-d342-4901-b82a-a20776c84fbc/content>
- Benhanifia, A., Ben Cheikh, Z., Oliveira, P. M., Valente, A., & Lima, J. (2025). Systematic review of predictive maintenance practices in the manufacturing sector. *Intelligent Systems with Applications*, 26, 200501. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200501>
- Campos Chuquilin, E. A., & Llanos Villanueva, K. A. (2023). *Análisis y reducción progresiva de las fallas para el incremento de la productividad en la flota de acarreo de CIA*

- Tiwinsa 2022* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN. <https://hdl.handle.net/11537/36737>
- Carmona Castro, M. (2015). *Análisis de lubricantes usados (motor diésel-gas-gasolina e industriales)* [Trabajo de grado, Universidad de Cartagena]. Repositorio Institucional Universidad de Cartagena.
<https://repositorio.unicartagena.edu.co/server/api/core/bitstreams/0afe4500-0d8e-41c0-8b31-509491159a38/content>
- Chen, Y., Li, H., Li, D., Yang, K., & Zhou, J. (2026). Diesel engine lubricating oil fault prognosis: A hybrid Bayesian LSTM and deep generative model architecture for multilayer anomaly detection. *Tribology International*, 215, 111434.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.111434>
- Congreso de la República de Colombia. (2002). *Ley 769 de 2002: Código Nacional de Tránsito Terrestre*. Diario Oficial No. 44.893.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5557>
- Crespo Márquez, A., Moreu de León, P., Sola Rosique, A., & Gómez Fernández, J. F. (2016). Criticality analysis for maintenance purposes: A study for complex in-service engineering assets. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(2), 519–533.
<https://doi.org/10.1002/qre.1769>
- Des-Case Corporation. (2021). *Time-based oil analysis vs. real-time oil condition monitoring* [White paper]. <https://www.descase.com/wp-content/uploads/2021/01/WP2101-Oil-Condition-Monitoring-Whitepaper.pdf>
- Ecopetrol S. A. (2025a). *Listado de equipos que conforman la flota vehicular del activo Nare*
- Ecopetrol S. A. (2025b). *Query equipo automotor Nare*.

- El Hammoumi, Z., Tebr, D., Charkaoui, Y., Satauri, I., & El Beqqali, O. (2025). Predictive maintenance approaches: A systematic literature review. *Engineering Proceedings*, 112(1), 70. <https://doi.org/10.3390/engproc2025112070>
- Esquivel Sardiñas, C. R. (2023). La tribología y los costos de mantenimiento: Una alternativa para el incremento de los beneficios económicos. *Universidad & Ciencia*, 12(1), 106–117. <https://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/view/2459>
- ExxonMobil. (s. f.). *El valor del análisis de aceite*. Mobil Serv Lubricant Analysis. <https://mobilserv.mobil.com/es/lubricant-oil-analysis/value/>
- Fitch, B. (s. f.). *Oil analysis explained*. Machinery Lubrication. <https://www.machinerylubrication.com/Read/29598/oil-analysis-report>
- Garcia, J., Rios-Colque, L., Peña, A., & Rojas, L. (2025). Condition monitoring and predictive maintenance in industrial equipment: An NLP-assisted review of signal processing, hybrid models, and implementation challenges. *Applied Sciences*, 15(10), 5465. <https://doi.org/10.3390/app15105465>
- Gołębiowski, W., Wolak, A., & Šarkan, B. (2024). Engine oil degradation in the real-world bus fleet test based on two consecutive operational intervals. *Lubricants*, 12(3), 101. <https://doi.org/10.3390/lubricants12030101>
- Han, W., Mu, X., Liu, Y., Wang, X., Li, W., Bai, C., & Zhang, H. (2023). A critical review of on-line oil wear debris particle detection sensors. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(12), 2363. <https://doi.org/10.3390/jmse11122363>
- Hoffmann, M. A., & Lasch, R. (2025). Unlocking the potential of predictive maintenance for intelligent manufacturing: A case study on potentials, barriers, and critical success

factors. *Schmalenbach Journal of Business Research*, 77, 27–55.

<https://doi.org/10.1007/s41471-024-00204-3>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2024). *NTC 5375-2:2024. Revisión técnico-mecánica y de emisiones contaminantes en vehículos automotores y revisión técnico-mecánica en remolques, semirremolques y pequeños remolques. Parte 2: Vehículos livianos y pesados*. <https://tienda.icontec.org/sectores.html>

International Organization for Standardization. (1992). *ISO 4021:1992. Hydraulic fluid power—Particulate contamination analysis—Extraction of fluid samples from lines of an operating system*. <https://www.iso.org/standard/9706.html>

International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55000:2014. Asset management—Overview, principles and terminology*. <https://www.iso.org/standard/55088.html>

International Organization for Standardization. (2016). *ISO 14224:2016. Petroleum, petrochemical and natural gas industries—Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*. <https://www.iso.org/standard/64076.html>

International Organization for Standardization. (2021). *ISO 4406:2021. Hydraulic fluid power—Fluids—Method for coding the level of contamination by solid particles*. <https://www.iso.org/standard/79716.html>

Kaminski, P. (2024). Investigation lubricity performance of lubricating oil used in marine diesel engine—Fuel injection pump. *Applied Sciences*, 14(14), 6148. <https://doi.org/10.3390/app14146148>

Moubray, J. (2001). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.

O'Connor, P. D. T., & Kleyner, A. (2012). *Practical reliability engineering* (5th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119961260>

- Olivares Torres, M. Á., López Velázquez, A., Aldana Franco, R., Alvarez Sánchez, E. J., Aldana Franco, F., Rivera Peña, Y., & Leyva Retureta, J. G. (2019). Mantenimiento automotriz basado en un diagnóstico tribológico. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 10(1), 1–8. <https://doi.org/10.24054/aaas.v10i1.394>
- Ortiz Mier, A., Sandoval Rodríguez, C. L., Veslin Díaz, E., Tarazona Romero, B. E., Ascanio V., J., & Angulo, C. A. (2020). *Medición del estado del aceite en vehículos por medio de su rigidez dieléctrica y temperatura* [Preprint]. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30592.05129/1>
- Parra, C., Morán, C., Pizarro, F., Duque, P., Aránguiz, A., González-Prida, V., & Parra, J. (2024). Implementation of the Asset Management, Operational Reliability and Maintenance Survey in Recycled Beverage Container Manufacturing Lines. *Information*, 15(12), 784. <https://doi.org/10.3390/info15120784>
- Petro-Canada Lubricants Inc. (s. f.). *Análisis de aceite usado*. En *Manual de fuentes de lubricación: Uso automotriz*. <https://petrocanadalubricants.com/es-cr/lube-source-handbook/automotive/introduction/used-oil-analysis>
- Ramirez Camba, R., Garcia Garcia, C., Garcia Tobar, M., & Fajardo Merchan, J. (2025). An integrated methodological approach for interpreting used oil analysis in diesel engines. *Lubricants*, 13(4), 169. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040169>
- Santana, N. da S., Silva, G. A., Mothé, C. G., & Mothé, M. G. (2022). Evaluation of lubricating oil in marine diesel engine using thermal analysis, FTIR, and rheology. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147, 13261–13274. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11568-1>

- Smigins, R., Amatnieks, K., Birkavs, A., Górski, K., & Kryshatop, S. (2023). Studies on engine oil degradation characteristics in a field test with passenger cars. *Energies*, 16(24), 7955. <https://doi.org/10.3390/en16247955>
- Sosa Quiroz, B. R., & Herrera Suárez, M. (2023). Análisis de la situación actual del mantenimiento en el sector automotriz. *Polo del Conocimiento*, 8(10), 577–597. <https://doi.org/10.23857/pc.v8i10.6142>
- Tiddens, W. W., Braaksma, J., & Tinga, T. (2023). Decision framework for predictive maintenance method selection. *Applied Sciences*, 13(3), 2021. <https://doi.org/10.3390/app13032021>
- Toro, R. (2023, 19 de julio). *Cómo realizar un análisis de aceite en tus activos*. Fractal. <https://www.fractal.com/es/blog/que-es-el-analisis-de-aceite-en-mantenimiento-predictivo>
- Torontech Team. (2025, 21 de noviembre). *Guía para el análisis de metales de desgaste del aceite*. Torontech. <https://torontech.com/es/articles/guide-wear-metal-analysis-oil/>
- UpKeep Technologies, Inc. (s. f.). *Retorno de la inversión (mantenimiento de predicción)*. UpKeep. <https://upkeep.com/es/learning/return-on-investment-predictice-maintenance/>
- Wakiru, J. M., Pintelon, L., Muchiri, P. N., & Chemweno, P. K. (2019). 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>
- Widman, R. (2007, 1 de junio). *Interpretando el reporte de análisis de aceite* (Boletín informativo N.º 46). Widman International SRL. <https://www.widman.biz/boletines/46.php>