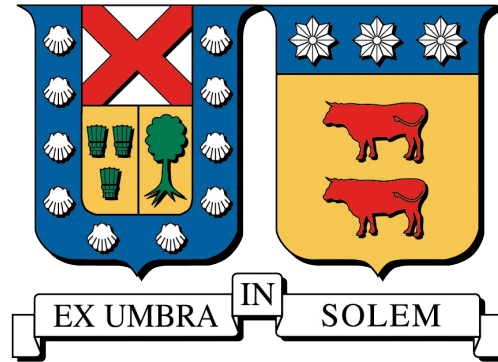


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO, CHILE



“DISEÑAR Y EVALUAR TÉCNICA ECONÓMICAMENTE, UN DE PLAN
DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN ANÁLISIS
TRIBOLÓGICOS, PARA EQUIPOS DE UNA EMPRESA DE SERVICIOS
INDUSTRIALES DEL SECTOR MINERO PORTUARIO EN LA QUINTA
REGION”

ALEXIS MAXIMILIANO MONTECINOS BRICEÑO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA : RENÉ VALDENEGRO O.
PROFESOR/A CORREFERENTE : RAFAEL MENA Y.

JULIO, 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: DISEÑAR Y EVALUAR TÉCNICA ECONÓMICAMENTE, UN DE PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO BASADO EN ANÁLISIS TRIBOLÓGICOS, PARA EQUIPOS DE UNA EMPRESA DE SERVICIOS INDUSTRIALES DEL SECTOR MINERO PORTUARIO EN LA QUINTA REGION

Nombre del candidato(a): Alexis Montecinos Briceño

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rene Antonio Valdenegro Oyaneder, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 24/09/2025

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 16/09/2025

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que han hecho posible la realización de esta tesis. En primer lugar, agradezco a mis supervisores Nataly Aros, Jorge Navarro y Carlos Bastardo, así como a mis profesores guías René Valdenegro y Rafael Mena, por creer en mí, su orientación, apoyo constante y paciencia a lo largo de este proyecto. Sus valiosos consejos y experiencia han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Extiendo mi gratitud a mis profesores y compañeros, quienes, con sus conocimientos y colaboración, me ayudaron a superar cada desafío académico. Sus ideas y discusiones enriquecieron mi perspectiva y mejoraron el enfoque de esta investigación.

Un especial agradecimiento a mi familia, quienes han sido mi pilar en los momentos difíciles. Gracias por su apoyo incondicional, por creer en mí y por brindarme la motivación necesaria para seguir adelante en cada etapa de este largo proceso. A mis amigos, por su compañerismo y palabras de aliento, les agradezco profundamente su presencia en mi vida.

Finalmente, expreso mi gratitud a mi alma mater, la Universidad Técnica Federico Santa María, y a REPORT-AGUNSA por proporcionar los recursos y el acceso a la información necesarios para llevar a cabo esta investigación.

A todos ustedes, gracias por ser parte fundamental de este importante logro en mi vida.

Resumen

El presente proyecto surge ante la necesidad de reducir las pérdidas operacionales causadas por detenciones no planificadas asociadas a fallas catastróficas en equipos críticos de la empresa Report-Agunsa, organización que presta servicios industriales en los sectores minero y portuario. Estas fallas, generadas principalmente por el desgaste prematuro y severo de componentes, han impactado negativamente la continuidad operativa, la confiabilidad de los activos y la competitividad de la compañía, especialmente en entornos altamente exigentes donde la disponibilidad de los equipos es clave para el cumplimiento de los contratos.

Con el fin de enfrentar esta problemática, el objetivo general de este estudio fue diseñar y evaluar técnica y económicamente un plan de mantenimiento predictivo basado en análisis tribológicos, que permita anticipar fallas, optimizar la planificación de intervenciones y mejorar la gestión de activos. La investigación se enfocó en diseñar un enfoque predictivo que prolongue la vida útil de los equipos, minimice los costos asociados a reparaciones correctivas y favorezca la toma de decisiones basadas en evidencia.

La metodología empleada combinó una revisión bibliográfica especializada con el análisis de datos históricos de operación y mantenimiento. Se aplicaron herramientas de ingeniería de confiabilidad como FMECA (Análisis Modal de Fallos y Efectos Crítico) y la norma ISO 14224 para establecer una matriz de criticidad, segmentando por contrato y tipo de equipo. También se evaluaron los tipos de lubricantes recomendados y utilizados en el país, detectando brechas en su uso y mantenimiento. Se diseñaron protocolos para la toma de muestras, análisis de laboratorio y diagnóstico avanzado, considerando parámetros clave como viscosidad, oxidación, contaminación y presencia de partículas metálicas.

Los resultados obtenidos demostraron que la implementación del mantenimiento predictivo basado en análisis de fluidos permite detectar tempranamente anomalías que podrían desencadenar fallas graves, reduciendo significativamente los tiempos de inactividad no planificada, mejorando la confiabilidad operacional de los activos y disminuyendo los costos asociados a intervenciones correctivas. Además, se identificó que adaptar el plan de mantenimiento a las condiciones específicas de operación —incluyendo factores ambientales, de carga y ciclos de trabajo— es clave para el éxito de esta estrategia.

En conclusión, el estudio aporta una solución práctica, escalable y sustentable para mejorar la gestión de mantenimiento en organizaciones que operan en entornos industriales críticos. La integración de técnicas tribológicas en la planificación del mantenimiento representa una herramienta efectiva para anticipar fallos, optimizar recursos, fortalecer la continuidad operativa y aumentar la competitividad de la empresa. Como proyección, se recomienda implementar el plan en fases piloto dentro de contratos estratégicos, con seguimiento de indicadores clave, y evaluar su escalabilidad a otros activos o faenas bajo un enfoque de mejora continua.

Abstract

This study aims to design and evaluate a predictive maintenance plan based on tribological analysis to optimize the management and extend the lifespan of critical equipment in industrial environments. The research combines an exhaustive literature review with historical data analysis and the application of advanced methodologies, such as FMECA, to identify equipment vulnerabilities and establish critical parameters through lubricant fluid analysis. Measurement criteria were developed to enable early detection of anomalies in viscosity, the presence of wear particles, and other indicators of component degradation. The results demonstrate that implementing this predictive approach significantly reduces unplanned downtime and the costs associated with corrective interventions, thereby enhancing asset reliability and maintenance management efficiency. Additionally, the study emphasizes the importance of adapting maintenance procedures to the specific operating conditions of each environment, considering both environmental and usage factors, which supports data-driven decision-making and the anticipation of potentially catastrophic failures. In summary, integrating tribological techniques into maintenance planning is presented as an innovative and effective strategy to minimize risks, optimize resources, and ensure operational continuity in highly demanding industrial sectors.

Glosario

- **Tribología:** Ciencia y tecnología que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación entre superficies en contacto en movimiento relativo. Es fundamental en el mantenimiento predictivo, ya que permite anticipar fallos mediante el análisis del comportamiento de los lubricantes y las superficies de contacto.
- **Plan Matriz:** Herramienta de planificación estratégica que organiza y cruza información clave (como actividades, responsables, plazos y recursos) en un formato tabular. Se utiliza comúnmente para estructurar proyectos o planes de acción, facilitando el seguimiento y control.
- **Comodato:** Contrato por el cual una parte entrega gratuitamente a otra un bien no fungible para su uso, con la obligación de devolverlo en el plazo convenido. Es común en operaciones logísticas o industriales para el préstamo de equipos o instalaciones.
- **Lucro Cesante:** Pérdida de ganancias o utilidades que una persona o empresa deja de percibir como consecuencia directa de un hecho dañoso o incumplimiento contractual. Es un concepto utilizado en la evaluación de daños económicos.
- **Blow-By:** Fenómeno en motores de combustión interna en el cual gases de combustión se filtran desde la cámara de combustión hacia el cárter a través de los anillos del pistón. Puede indicar desgaste del motor y se relaciona con pérdida de compresión, consumo de aceite y aumento de presión en el cárter.
- **Gestión de Activos:** Conjunto de prácticas y estrategias destinadas a maximizar el valor de los activos físicos de una organización a lo largo de su ciclo de vida, asegurando su disponibilidad, confiabilidad y rendimiento de manera sostenible y rentable.
- **Falla Funcional:** Incapacidad de un activo o sistema para desempeñar una función requerida dentro de los estándares de rendimiento establecidos. No siempre implica un daño físico; puede ser una disminución en la capacidad o eficiencia que afecta la operación.

- **Falla Potencial:** Condición detectable en un activo que indica la proximidad de una falla funcional. Es el punto en el tiempo en que pueden identificarse síntomas o indicadores de que una función está comenzando a degradarse, aunque el activo aún sigue operando. Detectar esta falla a tiempo permite aplicar acciones de mantenimiento predictivo o preventivo antes de que ocurra una falla funcional completa.

ÍNDICE

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iv
Glosario	v
Índice de figuras	xv
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. Antecedentes generales	4
3.1. Contexto del Sector Industrial	4
3.2. Contexto de la empresa	6
3.3. Análisis PESTEL de Report	13
3.3.1. Político	13
3.3.2. Económico	14
3.3.3. Social	14

3.3.4. Tecnológico	15
3.3.5. Ecológico	15
3.3.6. Legal	16
3.4. Análisis de las 6M de REPORT	17
3.4.1. Maquinaria	18
3.4.2. Materiales	18
3.4.3. Métodos	19
3.4.4. Medición	19
3.4.5. Medio ambiente	20
3.5. Antecedentes Particulares	22
4. Planteamiento del problema	29
4.1. Análisis FODA empresa REPORT	32
4.1.1. Fortalezas:	32
4.1.2. Oportunidades	32
4.1.3. Debilidades	33
4.1.4. Amenazas	34
4.2. Identificación de Brechas a Corregir	35
5. Marco Teórico	37
5.1. El Mantenimiento	38
5.1.1. Concepto de Mantenimiento	38

5.1.2. Confiabilidad	43
5.1.3. Disponibilidad	43
6. Estrategias de Mantenimiento	44
6.1. Acciones Reactivas	45
6.2. Acciones Proactivas	45
6.2.1. Mantenimiento Correctivo	46
6.2.2. Mantenimiento Restaurativo	46
6.2.3. Mantenimiento Mejorativo	47
6.2.4. Mantenimiento Preventivo	47
6.2.5. Mantenimiento Predictivo	48
6.2.6. Mantenimiento Proactivo	49
6.2.7. Mantenimiento Detectivo	50
6.2.8. Mantenimiento Previsivo	50
6.3. Tribología, Lubricación y Equipos	51
6.3.1. Tribología	51
6.3.2. Curva Tribológica	52
6.3.3. Fricción	55
6.3.4. Generación de Calor	59
6.3.5. Desgaste	59
6.3.6. Lubricación	63

6.3.7. Película Lubricante	63
6.3.8. Tipos de Lubricación	64
6.3.9. Selección de Lubricantes	67
6.3.10. Selección de Fluidos para Maquinas Industriales:	69
6.3.11. Selección de Fluidos para Maquinas Automotrices:	71
6.4. Mantenimiento Predictivo, Análisis y Limites Condensatorios	78
6.4.1. Mantenimiento Predictivo	78
6.4.2. Termografía	80
6.4.3. Análisis de Vibraciones	81
6.4.4. Análisis de Fluidos	82
6.4.5. Limites Condensatorios	91
6.4.6. Calculo de Limites Condensatorios	98
6.5. Técnicas y Enfoques de Gestión del Mantenimiento	100
6.5.1. RCM-Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad	100
6.5.2. Análisis de modo y efecto de falla (FMEA o AMEF)	101
6.5.3. Resultados de un proceso de RCM	103
6.5.4. Curva P-F	104
6.5.5. Analisis Funcional	106
6.5.6. Norma ISO 14224 y Jerarquizan de Equipos	107
6.5.7. Número de Prioridad de Riesgo (RPN)	108

6.6. Mejora Continua y Excelencia Operacional	110
6.6.1. Mejora Continua	110
6.6.2. Excelencia Operacional	111
7. Metodología	113
7.1. Actividades Previas	114
7.2. Etapa 0: Auditoria Interna	115
7.3. ETAPA 1: Levantamiento de Información	118
7.4. Etapa 2: Creación de Modelo	126
7.5. Etapa 3: Lanzamiento Piloto	130
8. Resultados y Discusión	134
8.1. Resultados	134
8.2. Discusión	141
9. Conclusiones y Recomendaciones	152
10. Referencias	155
Bibliografía	155
11. Anexos	157

Índice de figuras

1.	Perdidas económicas por hora de indisponibilidad en la industria pesada.	5
2.	Distribución de Equipos gestionados por REPORT	9
3.	Diagrama Ishikawa Diferencial Cargador Frontal Caterpillar 950-GC	23
4.	Estriado Semieje Diferencial Cargador Frontal Caterpillar 950-GC	24
5.	Informe Motor Cummins QSB 6.7, Ferrari FDK25K8	25
6.	Buje con Desgaste Diferencial Trasero Cargador Frontal Caterpillar 950 GC	26
7.	Informe Análisis de Fluido Diferencial Trasero Cargador Frontal Caterpillar 950 GC.	27
8.	Extracto Informe de servicios Diferenciales Cargador Frontal Caterpillar 950 GC.	28
9.	Flujo de trabajo actual para realizar Análisis de Muestra	30
10.	Evolución del Mantenimiento	41
11.	Modelo Curva Tribológica	52
12.	Modelo Curva Tribológica Positiva	53
13.	Modelo Curva Tribológica Negativa	54
14.	Curva tribología real	54
15.	Ejemplos Fuerza de Fricción	56
16.	Falla catastrófica buje muñón producto interrupción de flujo de aceite.	56
17.	Desgaste adhesivo en buje de compresor por fricción sólida en puesta en marcha.	57
18.	Desgaste adhesivo por fricción mixta en buje de eje de baja velocidad en un reductor.	57
19.	Película lubricante en buje de apoyo de turbina a vapor cuyo eje gira a 3600 [rpm].	58

20.	Representación de fricción fluida en diferentes tipos de lubricantes.	59
21.	Grados viscosidad ISO	70
22.	Conversión de viscosidades en diferentes normas.	70
23.	Clasificación de viscosidad SAE J-300-09	72
24.	Normas API para la calidad de los aceites.	73
25.	Grados de viscosidad SAE según temperatura ambiental de operación	74
26.	Aceites SAE monogrados y multigrados para engranajes automotrices	76
27.	Clasificación calidad API lubricantes de engranajes	77
28.	Código de Limpieza. Fuente: Norma ISO 4406.	89
29.	Perfil de desgaste típico de un componente industrial.	95
30.	Gráfica de ROC para hierro.	96
31.	Modelo Curva P-F	104
32.	Curva S: FluidExPort	113
33.	Evaluación de Criticidad	121
34.	Catalogo Limite Condensatorio Auxiliar Motor	130
35.	Catalogo Limite Condensatorio Auxiliar Transmisión	130
36.	Catalogo Limite Condensatorio Auxiliar Mandos Finales	130
37.	Catalogo Limite Condensatorio Auxiliar Sistemas Hidráulicos	131
38.	Catalogo Limite Condensatorio Auxiliar Diferenciales	131
39.	Elementos a Calcular Limites Condensatorios	131

40.	Presencia de Contaminantes en Diferencial Delantero Cargador Frontal 5919 . . .	137
41.	Conteo de Partículas de Desgaste en Diferencial Delantero de Cargador Frontal 5919	138
42.	Índice PQ Diferencial Delantero Cargador Frontal 5919	139
43.	Resumen Flujo Mantenimiento Predictivo	143
44.	Desgaste de Hierro en Diferencial Delantero de Cargador Frontal	143
45.	Ejemplo Ciclo CAP-DO FluidExPort	145
46.	Posibles causas y consecuencias de una falla sintomática por oxidación	157
47.	Posibles causas y consecuencias de una falla sintomática cambios de viscosidad .	158
48.	Posibles causas y consecuencias de una falla sintomática agotamiento de Aditivos	159
49.	Posibles causas y consecuencia de una falla sintomática por bajo TBN.	160
51.	Código de limpieza ISO 4406-99 de acuerdo con el tipo de componente y mecanismos lubricados	161
50.	Guía para el acercamiento a fallas sintomáticas por concentración de elementos. .	162
52.	Factores modificadores del código de limpieza ISO 4406-99 del aceite	163
53.	Valores Orientativos de Alerta y Alarma para Aceites de Motor Diésel	164
54.	Valores Orientativos de Alerta y Alarma para Aceites de Transmisión	165
55.	Valores Orientativos de Alerta y Alarma para Sistemas Hidráulicos	166
56.	Extracto Base de Datos pruebas a realizar	167
57.	Extracto Base de Datos Fluidos Equipos	168
58.	Flujo General Procedimiento Trabajo	169
59.	Sub-Flujo Procedimiento Toma de Muestra	169

60.	Flujo Funcionamiento Script	170
61.	Flujo Actualización Limites Condensatorios	170
62.	Flujo Actualización Resultados Tipo Finning	171
63.	Flujo Actualización Resultados Tipo Esmax	171
64.	Mapa de Decisión Análisis Resultados Aceite Motor	172
65.	Mapa de Decisión Análisis Resultados Aceite Sistemas de Engranajes	173
66.	Costos Actividades Administrativas Implementación	174
67.	Costos Análisis Funcional	174
68.	Costos Capacitación Toma de Muestras	175
69.	Costos Análisis FMECA Nacional	175
70.	Costos Herramientas e Insumos	175
71.	CAPEX TOTAL	176
72.	Costos Operativos: Imagen 1A	176
73.	Costos Operativos: Imagen 1B	177
74.	Costos Operativos: Imagen 1C	178
75.	Costos Operativos: Imagen 2	179
76.	Prototipo de Carta Gantt para Implementación de Mantenimiento Predictivo Basado en Análisis Tribológicos	179

1. Introducción

Este proyecto expone el diseño y evaluación técnico-económica de un plan de mantenimiento predictivo mediante análisis tribológicos, con el fin de optimizar la gestión de activos críticos y extender la vida útil de los equipos de Report-Agunsa, en particular aquellos administrados por la Unidad Central de Equipos y Mantenimiento (UCEM).

El mantenimiento predictivo emerge como una estrategia avanzada para gestionar eficientemente activos físicos. A través del monitoreo continuo y la analítica de datos, se establece el momento óptimo para intervenciones correctivas, minimizando interrupciones, riesgos laborales y maximizando beneficios económicos. El análisis tribológico es una técnica clave para reducir pérdidas económicas relacionadas con la baja disponibilidad de equipos y tiempos de inactividad ocasionados por reparaciones no programadas.

Con más de cuatro décadas, Report-Agunsa se consolida como actor clave en el mercado chileno, proporcionando soluciones técnicas y logísticas a nivel nacional. La gestión eficiente del mantenimiento y activos físicos es fundamental para el éxito operativo. Implementar un plan de mantenimiento predictivo robusto permitirá a la empresa preservar y potenciar su competitividad, alineándose con estándares de excelencia operativa.

Los equipos de Report-Agunsa operan con mantenimiento preventivo y un plan matriz. Cada contrato o faena cuenta con personal de mantenimiento en terreno y un analista responsable. La falta de procedimientos estandarizados para la toma de muestras y la interpretación de análisis tribológicos ha generado desafíos en la gestión de activos, resultando en mantenimientos correctivos frecuentes, lo que incrementa costos y recursos para mantener la continuidad operativa y disponibilidad de equipos. Sin embargo, en las etapas iniciales se identificó una carencia de información relevante. Este hallazgo condujo a una reformulación del proyecto, ajustando su alcance para abordar las deficiencias y optimizar la gestión de activos bajo un modelo predictivo.

Este proyecto busca cerrar brechas en la gestión de activos y diseñar un plan de mantenimiento predictivo que incluya acciones inmediatas y correctivas ante desviaciones en los parámetros monitoreados. Se propone un flujo de trabajo integrado al sistema de gestión actual, facilitando la ejecución de acciones y mejorando la coordinación entre equipos técnicos. Estas mejoras

optimizarán el ciclo de vida de activos críticos, incrementarán la eficiencia del mantenimiento y mejorarán la disponibilidad operativa de los equipos, promoviendo una cultura de excelencia operacional dentro de la organización.

Este proyecto tiene como objetivo identificar áreas de mejora y proponer soluciones que optimicen el rendimiento operativo y aseguren la viabilidad económica a largo plazo. También se analizan oportunidades estratégicas para fortalecer la eficiencia, sostenibilidad y competitividad de Report-Agansa en el exigente y dinámico sector industrial chileno.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- El objetivo de este estudio es diseñar y evaluar, tanto técnica como económicamente, un plan de mantenimiento predictivo basado en análisis tribológicos, que contribuya a reducir las pérdidas por detenciones no planificadas debido a fallas con consecuencias catastróficas. Estas fallas, generadas principalmente por desgaste prematuro y severo en componentes críticos, que afectan de manera importante la sustentabilidad y competitividad de la empresa Report-Agunsa que se dedica a servicios industriales en el sector minero y portuario.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar el contexto operacional y las variables críticas que impactan la operación.
- Elaborar una matriz de criticidad según la norma ISO 14224 para determinar los equipos críticos, incluyendo análisis por contrato y tipo de equipo.
- Evaluar el uso de fluidos recomendados y utilizados a nivel nacional en equipos críticos, e identificar brechas en su mantenimiento.
- Diseñar el plan de mantenimiento predictivo, considerando la toma de muestras, el análisis de aceite y el diagnóstico avanzado para detección temprana de fallas en base a normas y mejores prácticas.
- Evaluar técnica y económicamente la implementación del plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de fluidos en el modelo de gestión de activos existente

3. Antecedentes generales

3.1. Contexto del Sector Industrial

El presente proyecto de tesis se desarrolla en Recursos Portuarios y Estibas mas conocida como REPORT, parte del conglomerado AGUNSA, reconocido por servicios industriales a sectores productivos de Chile, como minería, puertos, logística e industria. La investigación se centra en la Unidad Central de Equipos y Mantenimiento (UCEM), que enfrenta el desafío de modernizar y optimizar la gestión de mantenimiento de más de 500 equipos a su cargo. Esta necesidad surge por pérdidas económicas significativas debido a la incapacidad de detectar oportunamente desviaciones en el funcionamiento de los equipos o fallas potenciales en componentes críticos.

En Chile, el sector productivo se caracteriza por ser dinámico, competitivo y altamente especializado. Esto requiere que empresas como REPORT mantengan altos estándares de eficiencia operativa para asegurar su sostenibilidad. La escasa adopción de técnicas avanzadas de mantenimiento ha sido, en muchos casos, determinante en la quiebra o deterioro de este tipo de organizaciones. A continuación, se presentan ejemplos internacionales que evidencian los riesgos de una gestión inapropiada del mantenimiento:

- **British Petroleum (BP):** La falta de inversión en tecnologías modernas y estrategias de mantenimiento contribuyó al desastre de la refinería de Texas City en 2005. Este evento, aunque no puso fin a las operaciones de BP, ocasionó pérdidas económicas masivas y un grave daño reputacional debido a la falta de prácticas preventivas y predictivas.
- **PG&E (Pacific Gas and Electric):** La deficiente gestión del mantenimiento de infraestructura eléctrica fue un factor crítico en los incendios forestales de California, lo que derivó en la declaración de bancarrota de la empresa en 2019. La ausencia de tecnologías avanzadas para el monitoreo y mantenimiento de su red agravó los problemas operativos y legales.

- **General Motors (GM):** La falta de controles rigurosos en el mantenimiento y calidad de componentes clave, como los interruptores de encendido defectuosos, resultó en accidentes fatales y daños significativos para la empresa. Esta crisis podría haberse mitigado mediante la implementación de técnicas predictivas de mantenimiento y mejores estándares de control de calidad .
- **Metro de Washington, D.C.:** La insuficiencia en las labores de mantenimiento preventivo contribuyó a fallos críticos en el sistema de transporte. Un caso destacado ocurrió en 2015, cuando un incendio en el sistema eléctrico causó la muerte de una persona, evidenciando la importancia de una gestión adecuada del mantenimiento.

REPORT opera en sectores exigentes, con clientes como BHP, CODELCO, AES GENER y CAP, donde la gestión eficiente del mantenimiento es crucial para el éxito organizacional. La implementación de estrategias de mantenimiento predictivo optimiza la detección temprana de fallas, reduce tiempos de inactividad no planificados y maximiza la vida útil de los equipos.

Un análisis reciente de Siemens, titulado "*The True Cost of an Hour's Downtime: An Industry Analysis*", indica que el costo promedio por hora de inactividad en PYMES varía entre \$10,000 y \$150,000, según la criticidad operativa. En la industria pesada, las pérdidas pueden superar los \$250,000 por hora [26], como se demuestra en la Figura 1. Estas cifras subrayan la necesidad de enfoques proactivos en la gestión del mantenimiento para mitigar impactos financieros y operativos, mejorando la competitividad en un entorno industrial cada vez más desafiante.

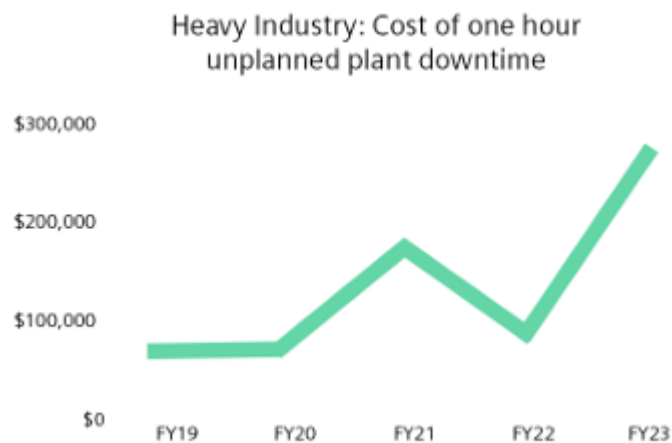


Figura 1: Pérdidas económicas por hora de indisponibilidad en la industria pesada.

Fuente: The True Cost of an Hour's Downtime: An Industry Analysis, (año 2024)

Además de las pérdidas económicas, existe un riesgo significativo para la seguridad de las operaciones y trabajadores que manipulan equipos defectuosos o mal mantenidos. Las consecuencias de operar maquinaria con desviaciones en su funcionamiento pueden abarcar desde daños materiales hasta accidentes graves o fatales, afectando tanto a los operadores como al entorno laboral. Históricamente, en el sector industrial, se han documentado incidentes por fallas en equipos debido a una gestión de mantenimiento inadecuada, resultando en lesiones severas, como pérdida parcial de extremidades, e incluso fatalidades de operadores.

Por tanto, es crucial implementar una gestión eficiente de activos y un plan de mantenimiento adaptado a las características de los equipos y sus entornos operativos. Este enfoque minimiza las pérdidas económicas por indisponibilidad de los equipos—como se analizará posteriormente, estas pérdidas pueden disminuir hasta un 51 %—y prolonga la vida útil de los componentes, evitando su reemplazo prematuro.

La implementación de un plan de mantenimiento eficaz es una estrategia clave para reducir costos y una prioridad para asegurar la seguridad operativa y la sostenibilidad en un entorno industrial altamente competitivo.

3.2. Contexto de la empresa

REPORT fue fundada en 1984 por Agencias Universales S.A. En 1996, amplió sus servicios a terceros, incorporando gestión de bodegas, plantas de envasado, ensacado, limpieza industrial y operaciones en centros de distribución y almacenamiento. Esta expansión generó un aumento significativo en la dotación, alcanzando un plantilla fija de 300 empleados y una población flotante promedio de 800 personas.

Actualmente con más de 40 años de experiencia, REPORT dispone de 1,800 empleados y 15 oficinas en Chile. La empresa se especializa en el diseño y ejecución de soluciones operacionales eficientes y sostenibles para sectores productivos e industriales, como minería, plantas industriales, logística, operaciones portuarias, gestión de terminales marítimos y tripulaciones.

En la actualidad, REPORT ofrece múltiples servicios, destacando:

1. **Servicio a la Minería y Plantas Industriales:** La empresa evalúa, diseña y ejecuta operaciones en plantas industriales y mineras, con enfoque en la mejora de la eficiencia operativa y cumplimiento de altos estándares de seguridad, innovación y gestión de costos.

Sus principales actividades incluyen:

- Aseo industrial.
 - Apoyo en la cosecha de cátodos.
 - Operación y mantenimiento de pilas de riego.
 - Hidrolavado industrial y de alta presión.
 - Logística de minerales metálicos y no metálicos.
2. **Operaciones Logísticas:** La empresa opera y administra centros de distribución, almacenaje e inventario, abarcando toda la cadena de bodegaje de productos que van desde electrónica hasta materias primas. Para ello, utiliza sistemas tecnológicos avanzados que permiten a los clientes monitorear el estado de sus cargas, cumpliendo con altos estándares de calidad, oportunidad y productividad.

Entre las actividades desarrolladas destacan:

- Gestión de stock en todos sus aspectos, incluyendo diferencias de inventario, daños y orden.
 - Optimización de los flujos de entrega.
3. **Administración y Gestión de Tripulación:** REPORT proporciona servicios de administración de flota. Gracias a su red de sucursales a nivel nacional, garantiza una ejecución eficiente de la operación de lanchas, en línea con sus políticas de calidad y eficiencia.
4. **Operaciones Marítimas y Portuarias:** La empresa presta servicios de estiba, desestiba, amarras, conexiones a las naves en terminales marítimos, consolidaciones, porteos y mantenimiento de terminales, entre otros.

Las principales actividades incluyen:

- Operación de estiba y desestiba de carga containerizada, general y de graneles.
- Amarre y desamarre de naves.
- Recepción y despacho de productos.
- Operación de equipos portuarios.
- Consolidación y desconsolidación de cargas en naves.

Para realizar eficientemente estas operaciones, la empresa gestiona mas de 500 activos de diversas categorías, incluidos equipos propios, arrendados o en comodato. Estos activos se clasifican internamente por familia de equipos y se distribuyen, como se muestra en la figura 2.

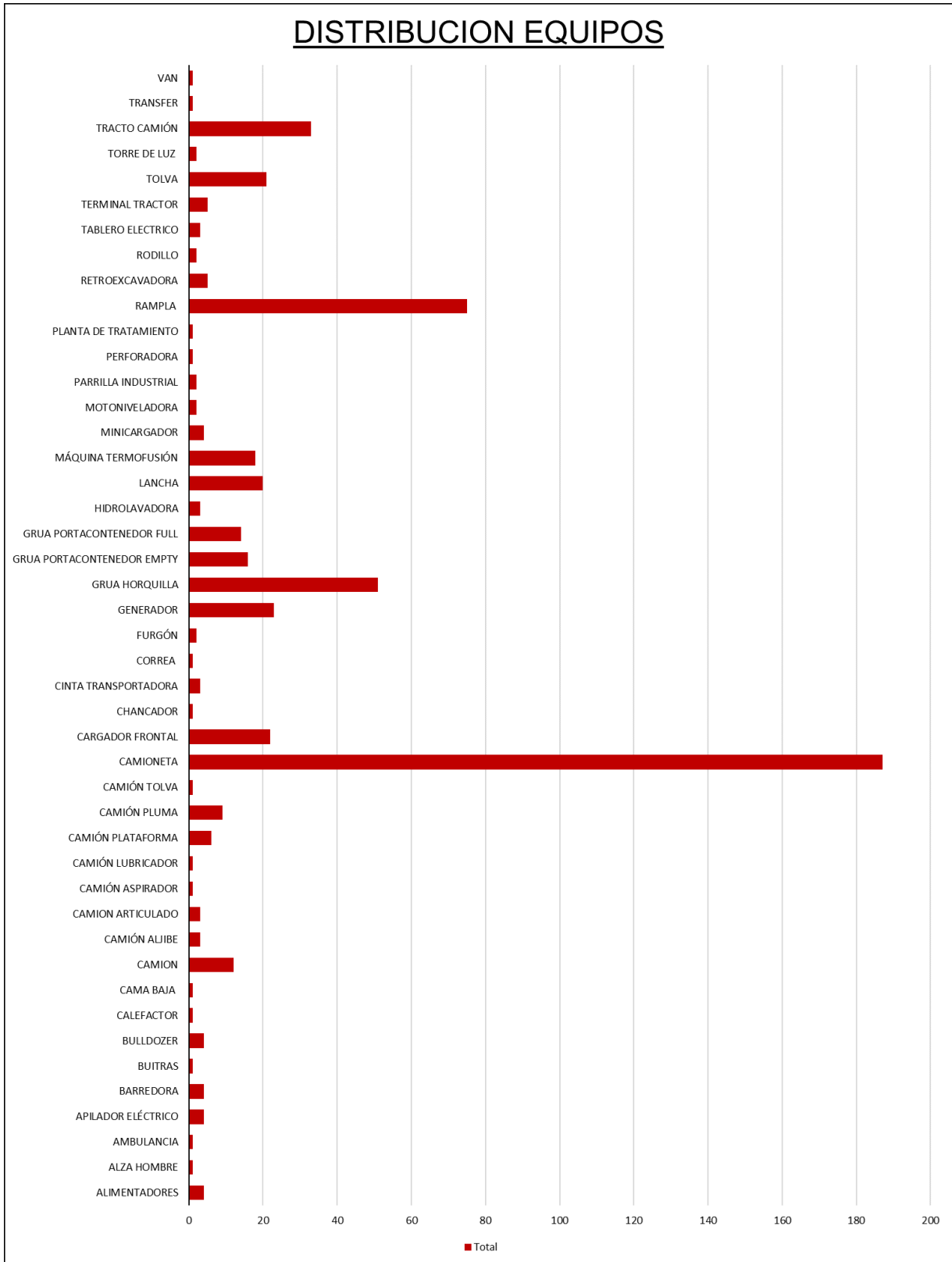


Figura 2: Distribución de Equipos gestionados por REPORT

Fuente: Elaboración Propia

Cada activo posee un plan de mantenimiento periódico, fundamentado en criterios de usometros o por calendario, conforme a la estrategia del fabricante. Las acciones establecidas en este plan se fundamentan en manuales de operación y mantenimiento, y se complementan con intervenciones adicionales que satisfacen requerimientos específicos del cliente o que abordan problemas recurrentes. Entre las actividades adicionales se incluyen la aplicación de recubrimientos anticorrosivos, la medición del espesor de neumáticos y la inspección de arneses eléctricos. Este enfoque asegura el cumplimiento con los requisitos del fabricante y tiene como objetivo mantener los equipos en un estado óptimo.

No obstante, las actividades y frecuencias recomendadas por los fabricantes se establecen para condiciones y cargas de trabajo estándar, que no siempre reflejan las circunstancias operativas reales. Este reto se manifiesta con mayor claridad en la empresa en cuestión, que opera a nivel nacional. Es importante destacar que dos equipos con características similares o incluso idénticas pueden desempeñar tareas completamente diferentes bajo condiciones ambientales y operativas muy distintas, muchas veces alejadas de las condiciones para las cuales fueron diseñados originalmente.

Los requerimientos de mantenimiento presentan una alta variabilidad; las actividades recomendadas por el fabricante pueden ser insuficientes para ciertos equipos, mientras que para otros pueden resultar redundantes, provocando gastos innecesarios.

Un ejemplo representativo de esta situación es el caso de los cargadores frontales de la marca Caterpillar, modelo 938K, ubicados en Aes Gener Mejillones, Antofagasta, y en el Terminal CAP, San Vicente. Estos equipos presentan un avance promedio mensual de 120 y 9 horas, respectivamente, bajo las siguientes condiciones operativas:

- **Aes Gener Mejillones, Antofagasta:** Los cargadores frontales operan en una zona desértica, con altas temperaturas durante el día, alcanzando un promedio de 35 grados Celsius, lo que impone una carga adicional sobre los sistemas de enfriamiento del motor. Por las noches, las temperaturas pueden descender por debajo de los 0 grados, lo que genera riesgos en el arranque en frío, afectando la viscosidad de los fluidos esenciales para su funcionamiento. Además, la baja humedad del ambiente facilita la suspensión de polvo, lo que propicia la acumulación de este en los filtros y componentes del cargador, provocando

obstrucciones y desgaste prematuro de las piezas, afectando así la eficiencia operativa del motor. La exposición constante a sales y minerales en el aire, debido a la proximidad del mar, acelera la corrosión de componentes metálicos, comprometiendo la integridad estructural del equipo y reduciendo su vida útil. Las operaciones se llevan a cabo en terrenos irregulares, lo que genera vibraciones constantes, causando desalineaciones, fatiga de materiales, y un desgaste acelerado en componentes como soportes, juntas y neumáticos. La manipulación de cenizas y otros residuos derivados del carbón añade un desafío adicional, ya que las partículas abrasivas pueden dañar los sistemas hidráulicos, aumentar el desgaste de la pala y contaminar los sistemas de lubricación.

- **Terminal Cap, San Vicente:** Los cargadores frontales que operan en la faena de Terminal CAP en San Vicente se encuentran en un entorno dinámico y logísticamente intensivo, donde se manejan principalmente chips de madera y rumbas. El puerto opera las 24 horas, lo que implica un flujo constante de camiones, grúas y otros equipos en un área de trabajo donde la seguridad y la eficiencia son prioritarias. Las condiciones climáticas en San Vicente, caracterizadas por temperaturas moderadas entre 5 °C y 25 °C y una alta humedad debido a la cercanía al mar, pueden afectar tanto a los equipos como a los materiales manipulados. Este entorno expone a los cargadores frontales a desafíos como la corrosión de componentes.

En el caso del cargador frontal en Aes Gener Mejillones, las variaciones extremas de temperatura impactan directamente la viscosidad de los fluidos en el motor, la transmisión y los sistemas hidráulicos, lo cual puede resultar en un desgaste acelerado si no se controlan de manera adecuada. Las altas temperaturas diurnas aumentan el riesgo de oxidación y degradación térmica de los aceites, mientras que las bajas temperaturas nocturnas incrementan la densidad de los fluidos, lo que dificulta la lubricación en el arranque y compromete el rendimiento del equipo. Asimismo, el polvo en suspensión, característico de zonas desérticas, puede infiltrarse en los sistemas de lubricación, contaminando el aceite y provocando un desgaste prematuro en componentes críticos como bombas y cilindros hidráulicos. Por último, la salinidad contribuye a la corrosión interna de los sistemas que transportan fluidos.

En comparación, el cargador frontal en Terminal CAP, San Vicente, opera en un entorno de temperatura moderada, pero enfrenta el desafío de alta humedad. Esta condición puede provocar condensación en los sistemas de fluidos, especialmente en el aceite del motor y el sistema hidráulico,

aumentando el riesgo de corrosión interna y deteriorando la calidad del lubricante. Además, debido a la menor frecuencia de uso en comparación con Mejillones, el aceite del equipo en San Vicente es propenso a *soldadura en frío*, ya que la inactividad prolongada permite la adhesión del aceite a las superficies internas, lo que conlleva a la pérdida de sus propiedades lubricantes.

Por lo tanto, implementar un plan de mantenimiento uniforme para ambos equipos resulta inapropiado. Esto conlleva una pérdida significativa de recursos para la empresa, al destinar inversiones a actividades que pueden resultar innecesarias o insuficientes. Además, aumenta el riesgo de fallas catastróficas, las cuales podrían inhabilitar los equipos por períodos prolongados. Las fallas no solo generan costos directos asociados a reparaciones, sino que también provocan pérdidas económicas a causa de la disminución en la disponibilidad de los equipos, lo que afecta negativamente la productividad. Un mantenimiento desapegado de las condiciones operativas específicas, como la oxidación y el desgaste acelerado en Mejillones, así como los riesgos de *soldadura en frío* y corrosión interna en San Vicente, aumenta la probabilidad de averías críticas. Esto pone en peligro tanto la eficiencia como la seguridad de las operaciones.

La empresa presenta deficiencias significativas en la formalización de procedimientos para la realización de análisis de fluidos, lo que ha conducido a fallas inesperadas. Esta situación resulta de una gestión inapropiada y el seguimiento deficiente de los resultados. Los análisis, frecuentemente, se llevan a cabo únicamente tras la identificación de fallos en los equipos o después de que un equipo similar haya fallado, lo que evidencia un enfoque netamente reactivo. La falta de comprensión adecuada de los resultados generados por los análisis de fluidos agrava el problema, ya que crea incertidumbre respecto a las acciones correctivas necesarias. Este enfoque reactivo limita la capacidad de la empresa para beneficiarse del mantenimiento predictivo, ya que las muestras y los análisis deberían llevarse a cabo de manera preventiva, anticipando posibles fallas y evitando costosas paradas no planificadas, en vez de ser una acción correctiva tras una falla ocurrida.

3.3. Análisis PESTEL de Report

Para obtener una visión integral del entorno operativo de Report y su interacción con factores externos, se realiza un análisis PESTEL exhaustivo. Este análisis aborda los factores Políticos, Económicos, Sociales, Tecnológicos, Ecológicos y Legales que influyen en la gestión del mantenimiento de equipos por parte de Report:

3.3.1. Político

- **Regulaciones Gubernamentales y Normas de Seguridad:** Report opera en un entorno altamente regulado, especialmente en sectores industriales como la minería y los puertos. Las políticas de seguridad y salud ocupacional son estrictas, lo que obliga a la empresa a cumplir con normativas que exigen estándares elevados en el mantenimiento de equipos. No cumplir con estos requisitos puede derivar en sanciones legales y operativas. Además, los cambios en las políticas ambientales, que promueven la reducción de emisiones y la gestión responsable de residuos, pueden requerir que Report ajuste sus procesos de mantenimiento para minimizar su huella ambiental.
- **Incentivos para Innovación y Sostenibilidad:** Las políticas gubernamentales que fomentan la adopción de tecnologías innovadoras y sostenibles, como el mantenimiento predictivo, pueden ofrecer oportunidades para Report. Estos incentivos pueden incluir subsidios o beneficios fiscales que faciliten la implementación de tecnologías avanzadas que optimicen el rendimiento de los equipos y reduzcan el impacto ambiental. Este punto debe ser prioridad para la empresa, aun mas cuando dentro de su misión se establece ofrecer soluciones efectivas y sustentables.

3.3.2. Económico

- **Costos de Mantenimiento Preventivo vs. Predictivo:** Actualmente, Report sigue un enfoque preventivo-correctivo en la gestión de sus equipos, lo que a largo plazo resulta más costoso debido a la frecuencia de fallas inesperadas y los tiempos de inactividad. La transición a un mantenimiento predictivo puede requerir una inversión inicial en tecnología, insumos y capacitaciones, pero promete una reducción significativa en los costos operativos a futuro.
- **Impacto en los Resultados Financieros:** La eficiencia del mantenimiento influye directamente en los resultados financieros de REPORT, dado que los costos de reparación y los tiempos de inactividad no programados afectan la rentabilidad. La implementación de un modelo de mantenimiento más eficiente podría mejorar los márgenes operativos.
- **Presión Competitiva:** La presión competitiva en el sector obliga a Report a considerar la adopción de prácticas de mantenimiento más eficientes, que permitan maximizar la disponibilidad de los equipos y reducir costos por paradas no planificadas. Las empresas que adopten tecnologías predictivas se beneficiarán de una ventaja competitiva en términos de eficiencia operativa, técnica y económica.

3.3.3. Social

- **Cultura de Seguridad y Responsabilidad Social:** La creciente conciencia sobre la importancia de la seguridad laboral y la responsabilidad social empresarial implica que REPORT debe asegurarse de que sus prácticas de mantenimiento protejan a los trabajadores y el medio ambiente. Como por ejemplo: las fallas catastróficas debido a que un mantenimiento deficiente no solo tiene un impacto económico, sino también social, al poner en riesgo la vida de los empleados, generando un impacto negativo en su entorno social y afectando la reputación de la empresa.
- **Capacitación y Desarrollo del Personal Técnico:** La falta de procedimientos claros y definidos para realizar análisis de fluidos indica una necesidad de formación adicional para los empleados de REPORT. Invertir en la capacitación técnica del personal para interpretar correctamente los análisis de fluidos y tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento

correctivo podría incrementar la eficiencia y mejorar la seguridad.

3.3.4. Tecnológico

- **Avances en Tecnología de Mantenimiento Predictivo:** La evolución tecnológica ha hecho posible el mantenimiento predictivo a través de sensores avanzados, análisis de fluidos y sistemas automatizados de gestión de mantenimiento. REPORT puede aprovechar estos avances para monitorear continuamente las condiciones de sus equipos, permitiendo prever fallos antes de que ocurran, así reducir el tiempo de inactividad y mejorar la eficiencia operativa.
- **Digitalización y Gestión de Datos:** La falta de un sistema integrado para la gestión de datos relacionados con el análisis de fluidos en REPORT es una debilidad significativa. La implementación de un sistema de gestión de mantenimiento informatizado (CMMS) ayudaría a centralizar la información, mejorar la trazabilidad de las condiciones de los equipos y permitir una toma de decisiones más rápida y eficiente, basada en datos históricos y en tiempo "real".

3.3.5. Ecológico

- **Impacto Ambiental y Regulaciones sobre Residuos:** REPORT debe cumplir con normativas ambientales estrictas, especialmente en cuanto a la gestión de residuos peligrosos como aceites usados y fluidos industriales. Un mal manejo de estos residuos puede tener consecuencias legales y medioambientales negativas. El mantenimiento predictivo podría contribuir a reducir el desperdicio de fluidos mediante uso de diálisis por ejemplo, minimizando el impacto ambiental de las operaciones de mantenimiento.
- **Sostenibilidad y Prácticas Responsables:** A medida que aumenta la presión global por prácticas sostenibles, las empresas como REPORT deben adoptar estrategias que reduzcan su huella de carbono y gestionen mejor los recursos. Un enfoque predictivo en el mantenimiento no solo optimiza el uso de los equipos, sino que también disminuye el consumo innecesario de materiales, alineando a la empresa con las crecientes expectativas ecológicas del mercado.

3.3.6. Legal

- **Cumplimiento de Normas de Mantenimiento y Seguridad:** REPORT debe garantizar que sus operaciones de mantenimiento cumplan con las normativas locales e internacionales relacionadas con la seguridad de los equipos y la protección de los trabajadores. El incumplimiento de estas regulaciones puede conllevar sanciones significativas, daños a la reputación y la pérdida de contratos importantes.
- **Contratos y Responsabilidad Legal:** La empresa debe cumplir con los estándares de calidad y tiempos de entrega establecidos en sus contratos de mantenimiento con clientes y proveedores. La falta de un sistema estandarizado de mantenimiento predictivo podría resultar en incumplimientos contractuales, especialmente cuando fallas inesperadas, interrumpen las operaciones o afectan la seguridad.

A pesar de los desafíos asociados a: costos, regulaciones y expectativas sociales, la adopción de tecnologías de mantenimiento predictivo se presenta como una oportunidad fundamental para mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y cumplir con las crecientes exigencias regulatorias y ambientales. Un enfoque proactivo y tecnológicamente avanzado en el mantenimiento no solo permitirá que REPORT mantenga su competitividad, sino que también fortalecerá sus operaciones de forma sostenible y responsable.

3.4. Análisis de las 6M de REPORT

El análisis interno que identifique y optimice los factores clave que afectan el rendimiento operativo y estratégico de REPORT se fundamenta en el análisis de las 6M (Mano de obra, Maquinaria, Materiales, Métodos, Medición y Medio ambiente). Este análisis proporciona una perspectiva integral de los recursos y procesos internos que impactan la efectividad del mantenimiento en la empresa.

- **Capacitación y Competencia del Personal:** Los colaboradores en REPORT enfrentan una falta de estandarización en la capacitación, relacionada con el mantenimiento predictivo y el análisis de fluidos. Los trabajadores, aunque "experimentados", carecen de un conocimiento profundo sobre cómo interpretar los datos de los análisis de fluidos, lo que limita su capacidad para tomar decisiones correctivas de manera proactiva. Por lo que, para optimizar este aspecto, es necesario desarrollar programas de formación continua que incluyan el manejo de técnicas de mantenimiento predictivo y análisis de datos, así incrementar las competencias y la confianza del personal.
- **Falta de Especialización:** El equipo humano encargado de la gestión de los equipos tiende a depender de prácticas de mantenimiento preventivas-correctivas, lo que refleja una necesidad de especialización en áreas como la tribología y el mantenimiento predictivo. Mejorar las competencias técnicas del personal no solo aumentará la eficiencia, sino que también permitirá una mayor precisión en la toma de decisiones respecto a las acciones correctivas.

3.4.1. Maquinaria

- **Estado de los Equipos:** Los equipos de REPORT presentan un historial de fallas inesperadas debido a la falta de monitoreo constante y predictivo de su condición operativa. A pesar de que las máquinas en general son robustas y comúnmente adecuadas para las condiciones operativas, la falta de un programa de mantenimiento predictivo aumenta los riesgos de paradas no planificadas y averías costosas. Implementar técnicas de muestreo periódicas o monitoreo en tiempo real mejoraría considerablemente la capacidad de anticipar problemas y optimizar la vida útil de equipos y componentes de los mismos.
- **Mantenimiento Preventivo Insuficiente:** La maquinaria en REPORT se beneficia actualmente de un enfoque de mantenimiento preventivo inmaduro, apoyándose aun en mantenciones reactivas, que no garantiza la maximización de su disponibilidad. El desafío radica en migrar hacia un modelo de mantenimiento predictivo, donde el análisis de fluidos y otras métricas clave sean utilizados para anticipar fallos y minimizar el tiempo de inactividad.

3.4.2. Materiales

- **Gestión de Fluidos y Consumibles:** En la gestión de materiales, REPORT tiene un desafío importante relacionado con la calidad y el manejo de los fluidos utilizados en sus equipos, como: lubricantes, aceites y refrigerantes. Los análisis de fluidos se realizan en su mayoría de manera reactiva, lo que implica que el estado de estos materiales no se supervisa de manera constante. Esto puede generar problemas como: la oxidación, degradación y contaminación de los fluidos, lo que a su vez afecta el rendimiento de los equipos. La implementación de pruebas de fluidos de forma regular podría mejorar la gestión de los materiales y optimizar su rendimiento.
- **Control de Calidad en Insumos:** La falta de procedimientos claros sobre la calidad de los insumos empleados, como: lubricantes y filtros, incrementa el riesgo de un rendimiento deficiente de los equipos. Establecer un sistema riguroso de selección y evaluación de proveedores de materiales es esencial para garantizar la calidad y durabilidad de los mismos, lo que contribuirá a la eficiencia operativa.

3.4.3. Métodos

- **Enfoque Reactivo de Mantenimiento:** El método principal de mantenimiento en la empresa, ante fallas críticas que dejan equipos fuera de servicio, sigue siendo reactivo. Esto significa que las intervenciones se realizan después de que ocurren fallas, siendo una respuesta altamente ineficiente, que conlleva a altos costos de reparación y tiempo de inactividad. Para mejorar, REPORT debe transitar hacia un método más proactivo y basado en datos actualizados, permitiendo tomar decisiones informadas antes de que ocurra una avería. Esto incluiría el establecimiento de un cronograma regular para análisis de fluidos y el uso de modelos predictivos basados en el monitoreo de condiciones.
- **Falta de Procedimientos Estandarizados:** No existe un estándar claro sobre cuándo y cómo realizar los análisis de fluidos. La falta de un método estructurado genera una ineficiencia en el diagnóstico y tratamiento de problemas. Crear procedimientos con una metodología y enfoques claros para el análisis de muestras, la interpretación de resultados y la toma de decisiones correctivas es crucial para optimizar el rendimiento del equipo y minimizar los riesgos de fallas imprevistas.

3.4.4. Medición

- **Ausencia de Indicadores Claves de Desempeño (KPI):** Actualmente, REPORT no cuenta con una base de datos sólida ni con un sistema eficaz de medición que permita rastrear el comportamiento de los equipos a lo largo del tiempo, lo que impide tener un control adecuado sobre el estado de los fluidos y otros parámetros críticos. Implementar indicadores clave de desempeño (KPI) como: el tiempo medio entre fallos (MTBF) y el tiempo medio para reparar (MTTR) en componentes críticos producto de desviaciones de comportamiento de fluidos, así como el estado de los análisis de fluidos en tiempo real, permitiría una mayor trazabilidad y mejoraría la toma de decisiones basada en datos.

- **Técnicas de Monitoreo Insuficiente:** REPORT carece de un sistema de monitoreo que permita analizar el estado de los fluidos y el desempeño de los equipos. El uso de técnicas de monitoreo periódico o tecnología de sensores IoT para monitorear las condiciones operativas de los equipos, permitiría detectar anomalías en el comportamiento de los fluidos (viscosidad, contaminación, temperatura, entre otras) y, con ello, realizar acciones preventivas y predictivas en lugar de correctivas.

3.4.5. Medio ambiente

- **Condiciones Operativas Diversas:** REPORT opera en diferentes entornos industriales, que van desde zonas costeras húmedas hasta regiones desérticas con altas temperaturas e incluso islas australes. Estas variaciones ambientales tienen un impacto directo en la gestión de los fluidos, ya que las temperaturas extremas pueden afectar la viscosidad y la eficiencia de los lubricantes y refrigerantes. Por ejemplo: en áreas desérticas, el calor intenso puede provocar la oxidación de los aceites, mientras que en zonas costeras la humedad puede generar corrosión interna en los sistemas de fluidos e incluso en el mismo fluido. La implementación de un mantenimiento predictivo adaptado a las condiciones operacionales particulares de cada zona es crucial para mejorar el rendimiento de los equipos.
- **Responsabilidad Ambiental:** La empresa también debe gestionar de manera eficiente los desechos generados por el mantenimiento de sus equipos, como: aceites usados y otros residuos industriales. La adopción de tecnologías más limpias, el establecimiento de prácticas de reciclaje de fluidos o técnicas para gestionar de mejor forma la vida útil de los fluidos podrían contribuir a reducir la huella ambiental de la empresa y cumplir con las regulaciones medioambientales que son cada vez más estrictas.

El análisis PESTEL y el modelo de las 6M proporcionan una visión integral de los factores que inciden en las operaciones de REPORT, tanto desde una dimensión externa como interna. Desde la óptica externa, el análisis PESTEL resalta la influencia de: los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, medioambientales y legales en la empresa. Específicamente, subraya la imperiosa necesidad de ajustarse a regulaciones más rigurosas, la presión por la integración de tecnologías avanzadas y el efecto de las condiciones medioambientales en el mantenimiento y funcionamiento de los equipos.

El análisis de las 6M identifica áreas críticas de mejora: en la mano de obra, métodos de trabajo, maquinaria y recursos, resaltando la falta de estandarización y un enfoque reactivo en la toma de decisiones. Asimismo, se detectan oportunidades sustanciales, como la implementación de tecnologías de monitoreo avanzado y la optimización del mantenimiento predictivo. Estas estrategias permitirán a REPORT reducir costos operativos, aumentar la eficiencia de los equipos y adoptar un enfoque más sostenible.

Abordar estas áreas críticas permitirá a REPORT mejorar su rendimiento operativo y aumentar su competitividad en un entorno exigente. La implementación de soluciones de mantenimiento predictivo, complementada con una gestión eficiente de los recursos y del personal, optimizará la productividad y reducirá los tiempos de inactividad no planificados, incrementando así la disponibilidad y fiabilidad de los activos estratégicos. Este enfoque permitirá a la empresa consolidarse como líder en su sector, adaptándose eficazmente a las demandas del mercado y a las normativas ambientales.

3.5. Antecedentes Particulares

Durante su operación, REPORT ha experimentado numerosos casos de inoperatividad de equipos, debido a fallas críticas. A pesar de la experiencia y competencia del personal de mantenimiento, estas fallas persisten de manera imprevista. Esto indica que, aunque el capital humano es altamente calificado, la empresa presenta deficiencias en su enfoque preventivo y predictivo, lo cual podría estar incrementando los tiempos de inactividad y los costos de reparación.

A pesar de contar con conocimientos sobre la recurrencia de estos eventos, la empresa carece de registros precisos y de indicadores que permitan una gestión eficiente de estas situaciones. El análisis realizado identificó una serie de casos de indisponibilidad no planificada en equipos críticos durante la temporada 2023-2024. Esta situación conlleva una inversión significativa de recursos por parte de la empresa para mitigar estos escenarios adversos.

Las fallas en los componentes de sistemas que utilizan aceites, ya sea como lubricantes o elementos funcionales, han mostrado un patrón recurrente. El análisis revela que en muchos casos se presenta desgaste simultáneo del fluido y del componente afectado. Esta situación sugiere que las averías podrían haberse prevenido a través de un monitoreo continuo del estado de los aceites y una gestión predictiva adecuada. Por lo que, la implementación de un sistema riguroso de análisis de fluidos podría haber facilitado la identificación de señales tempranas de desgaste, permitiendo anticipar y mitigar fallos.

La ausencia de una gestión adecuada ha generado pérdidas económicas considerables, no solamente por los costos asociados a la adquisición de repuestos o componentes nuevos, sino también por el lucro cesante derivado de la indisponibilidad de los equipos. En numerosas ocasiones, se ha requerido de implementación de equipos sustitutos o sobrecargar otros activos operativos, lo cual propicia un deterioro acelerado de dichas unidades, incrementando los costos operativos, constituyendo un círculo vicioso de desgaste prematuro.

A modo de ejemplo y para fundamentar la necesidad crítica de este proyecto, se ha recopilado algunos de los eventos más recientes que la empresa ha experimentado. Estos incidentes ilustran la gravedad de las fallas y los desafíos operativos que enfrenta la organización en la actualidad. Entre los eventos más significativos se encuentran:

- **Cargadores Frontales, Cabo Froward:** Siete equipos de la marca Caterpillar, modelos 950-GC, experimentaron problemas de sobrecalentamiento en el conjunto diferencial durante las operaciones. En todos los casos, los diferenciales alcanzaron temperaturas críticas, lo que resultó en un desgaste severo de varios componentes internos. Este problema se originó debido a una lubricación inadecuada del sistema, lo que provocó un deterioro acelerado de elementos clave como: los ejes estriados, bujes y engranajes.

Para analizar las causas del sobrecalentamiento en los conjuntos diferenciales de los equipos Caterpillar 950-GC, se utilizó un diagrama de Ishikawa (también conocido como diagrama de espina de pescado) representado en la Figura 3. Esta metodología permitió visualizar de manera estructurada las causas raíz que contribuyen al problema, facilitando la identificación de variables críticas. Entre las causas identificadas se encuentran: la falta de capacitación del personal, un diseño inadecuado de los sistemas de lubricación y la ausencia de un seguimiento continuo de los indicadores de temperatura.

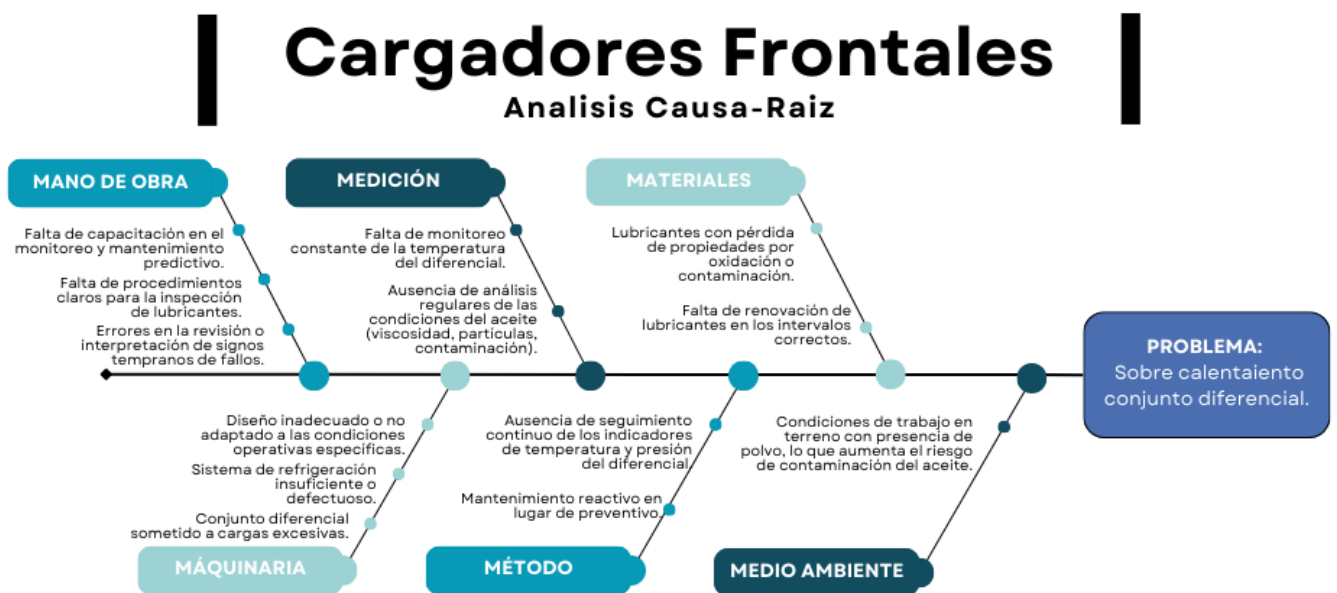


Figura 3: Diagrama Ishikawa Diferencial Cargador Frontal Caterpillar 950-GC

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, tras un exhaustivo análisis de cada una de las causas identificadas, se determinó que la falta de lubricación adecuada fue el principal causante del sobrecalentamiento en los conjuntos diferenciales de los cargadores frontales Caterpillar 950-GC representado en la Figura 4. Se constató que el aceite utilizado en el sistema había perdido sus propiedades esenciales debido a la degradación térmica y a la contaminación, lo que comprometió su capacidad para lubricar y proteger adecuadamente los componentes internos.

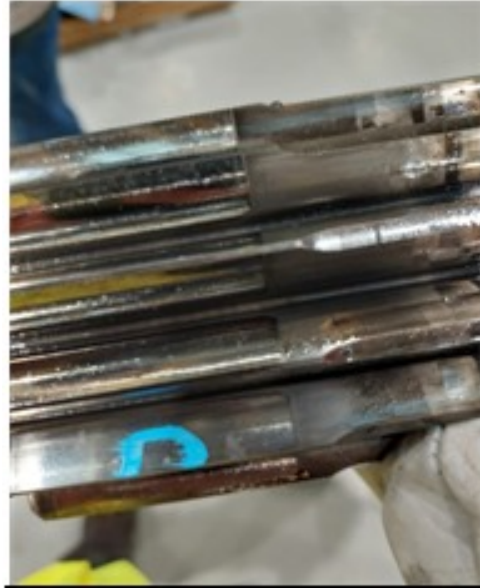


Figura 4: Estriado Semieje Diferencial Cargador Frontal Caterpillar 950-GC

Fuente: Analista de Mantenimiento Jorge Navarro

- **Portacontenedores, Empty San Antonio:** Los equipos marca Ferrari, modelo FDK25K8, han enfrentado serios problemas debido a la contaminación interna en sus motores Cummins QSB 6.7, lo que ha obligado a la empresa a realizar dos cambios de motor de manera prematura. Este gasto representa aproximadamente el 15 % del valor del equipo, solo en el costo del componente. El deterioro se ha atribuido al ingreso de sílice en el aceite, que actúa como un agente abrasivo, provocando un desgaste significativo en los componentes internos, muchos de los cuales se han vuelto irreparables. Como resultado, se ha tenido que optar por la sustitución completa del motor.

La operación de estos equipos en condiciones no estándar, como en superficies de tierra, ha generado una considerable entrada de sílice y aluminio ambiental al motor, lo que ha intensificado el desgaste de los componentes y comprometido su rendimiento.

Según el informe de evaluación de Cummins Chile visualizado en la Figura 5, sobre uno de los motores que debió ser reemplazado. El desgaste de los cilindros se atribuye a varios factores, incluyendo: la incrustación de anillos, cristalización, erosión y corrosión, todos consecuencia de la ingesta de sílice. Esta contaminación provocó un desgaste en las unidades de fuerza del motor, afectando significativamente a otros componentes debido a la contaminación del aceite, que arrastró material particulado.

Además, se identificó que los cilindros presentan anillos defectuosos, específicamente con filos en las puntas de los anillos, lo cual está relacionado con una pérdida de potencia del motor y un aumento en el fenómeno de blow-by.

1.1.- CAMISAS DE CILINDROS (camisas secas)

Se encontraron fuera de especificaciones.

Se deben reemplazar por lo siguiente:

Perdida de bruñido en todas las camisas de cilindros, rastros de rallas en cilindros N5 y N3, anillos con de pistón con filó en sus bordes producto de la ingesta de polvo.



Figura 5: Informe Motor Cummins QSB 6.7, Ferrari FDK25K8

Fuente: Cummins Chile, Informe a Cliente Report

- **Cargador Frontal, Chañaral:** La falla del diferencial delantero y trasero en un cargador frontal Caterpillar 950 GC resultó en la necesidad de reemplazar ambos componentes, ya que su reparación era inviable. El costo de los nuevos componentes representa aproximadamente el 20 % del valor total del equipo. Este problema se atribuye a una lubricación inadecuada, provocada por la degradación del fluido lubricante. Tal degradación se originó por el uso excesivo de la transmisión, generando un estrés y esfuerzo desmedido en componentes críticos del sistema. Como consecuencia, se produjo un desgaste acelerado de estos elementos, comprometiendo tanto la integridad como el rendimiento del cargador frontal .

La situación se evidencia en el informe de servicio elaborado por Caterpillar, el cual documenta el diagnóstico y despiece de los componentes. Este informe detalla el estado crítico en el que se encontraban los diferenciales, como se ejemplifica en la Figura 6.



Figura 6: Buje con Desgaste Diferencial Trasero Cargador Frontal Caterpillar 950 GC

Fuente: Informe de Servicio Caterpillar a Cliente Report

Aunque en este caso se recibieron advertencias claras del laboratorio acerca de la necesidad urgente de tomar acciones debido a una contaminación excesiva, demostrada en los análisis de fluidos del laboratorio SOS Caterpillar - Finning. En la Figura 7, se detalla que los parámetros de análisis elemental afectados son específicamente la concentración de Cobre y Hierro, asimismo las condiciones de limpieza (Nivel de Limpieza e Índice PQ) se encuentran en todas las muestras fuera de rango permisible.



Figura 7: Informe Análisis de Fluido Diferencial Trasero Cargador Frontal Caterpillar 950 GC.

Fuente: Informe Análisis de Fluidos, SOS Caterpillar.

En las conclusiones derivadas del análisis de componentes, representado por la Figura 8, menciona que el uso inadecuado de la transmisión provocó un notable aumento en la temperatura de los frenos, lo que derivó en la degradación del aceite del sistema y en la pérdida de sus propiedades lubricantes y de viscosidad. Este deterioro comprometió

el funcionamiento del eje trasero. Además, el excesivo estrés y la carga aplicada al eje aceleraron su desgaste y aumentaron la fricción entre sus componentes. La combinación de temperaturas elevadas y la contaminación del lubricante contribuyó de manera decisiva al deterioro prematuro del eje, culminando en su eventual fallo. Cabe destacar que, a pesar de los valores críticos obtenidos en las muestras, no se implementaron las acciones correctivas recomendadas.

Comments: En conclusión el abuso de la transmisión a de provocar un aumento significativo de la temperatura en los frenos, lo que llevó a la degradación del aceite del sistema. Esta degradación del aceite resultó en la pérdida de sus propiedades de lubricación y viscosidad, lo que afectó negativamente el funcionamiento del eje trasero.

El excesivo estrés y esfuerzo impuestos al eje trasero debido al abuso de la transmisión generaron un desgaste acelerado y una mayor fricción en sus componentes. Además, la alta temperatura y la contaminación del aceite contribuyeron al deterioro prematuro del eje trasero, culminando en su eventual falla.

No se realizan las acciones sugeridas por laboratorio teniendo en cuenta los valores arrojados en las muestras.

Figura 8: Extracto Informe de servicios Diferenciales Cargador Frontal Caterpillar 950 GC.

Fuente: Informe de Servicio Caterpillar a Cliente Report

Por lo que, la ausencia de protocolos estandarizados y de modelos de trabajo adecuados, sumada a la realización de un análisis tardío, impidió la implementación oportuna de las medidas correctivas necesarias. Como consecuencia, se produjo la falla total de los componentes internos, resultado del desgaste excesivo al que fue sometido el eje y de la contaminación del fluido lubricante, lo cual aceleró el desgaste prematuro. Esta situación evidencia una deficiencia en la gestión preventiva y en la capacidad de respuesta frente a los riesgos identificados.

Estos ejemplos evidencian la situación actual de la empresa, en la cual se identifican fallas que podrían haberse prevenido mediante la adopción de enfoques y metodologías apropiadas. La implementación de un sistema de mantenimiento eficaz habría permitido mitigar los tiempos de inactividad y los costos asociados, así como reducir la necesidad de reparaciones onerosas. Esto, a su vez, contribuiría a minimizar el tiempo de indisponibilidad de los equipos, mejorando la eficiencia operativa y, por ende, la rentabilidad a largo plazo.

4. Planteamiento del problema

Actualmente, la empresa que trabaja con mantenimiento reactivo-preventivo, requiere enfrentar el desafío significativo de avanzar hacia un enfoque de mantenimiento predictivo utilizando análisis de fluidos para este propósito. Dado que, la actual metodología de mantenimiento, es incapaz de anticipar fallas en componentes críticos, lo que impacta negativamente en la gestión eficiente de los equipos. Esta carencia limita la optimización de la vida útil de los componentes, ya que el mantenimiento preventivo o reactivo, no logra maximizar el rendimiento de los repuestos a lo largo de su ciclo operativo. Además, esta situación genera tiempos de indisponibilidad prolongados debido a fallas inesperadas, afectando la continuidad operativa.

La implementación de un plan de mantenimiento predictivo facilita la anticipación y mitigación de fallas de manera eficiente, lo que conduce a una notable reducción de los tiempos de inactividad. Este enfoque incrementa la eficacia de las intervenciones, optimizando la gestión de activos y prolongando su vida útil, asegurando así un rendimiento óptimo.

Sin embargo, para lograr este objetivo, es necesario superar diversos desafíos fundamentales que afectan la implementación y desarrollo exitoso del proyecto. Entre estas brechas se encuentran:

- **Flujo de Trabajo Actual de Análisis de Muestras:** Para ejemplificar el flujo de trabajo actual con el que cuenta REPORT , se ha elaborado el diagrama de flujo de la Figura 9, en donde se pone en evidencia la falta de un estándar claro para la realización de análisis de fluidos, pese a que la empresa realizaba estos análisis en ciertas ocasiones.

El proceso comienza cuando los colaboradores en terreno detectaban una desviación en el funcionamiento y solicitaban la autorización para realizar un análisis de forma completamente reactiva, o bien el analista a cargo del equipo solicitaba dicha acción de forma preventiva, como es el caso de la mayoría de los equipos Caterpillar, donde durante el periodo de garantía se debe monitorear de forma periódica el equipo hasta las 2000 horas de uso. Este flujo resalta varias deficiencias clave, como la inexistencia de un criterio estándar para seleccionar las acciones correctivas o para programarlas adecuadamente.

Por otro lado, las decisiones sobre ¿Qué acciones correctivas se deben tomar? y ¿Cuándo implementarlas? se basaban exclusivamente en los informes emitidos por los laboratorios. A pesar de la experiencia técnica de estos laboratorios en la generación de informes, sus recomendaciones no toman en cuenta el contexto operacional específico del equipo, limitándose a acciones estandarizadas. Si bien estas recomendaciones podían ser apropiadas en algunos casos, en otros resultaban ineficaces e ineficientes, al no estar alineadas con las condiciones particulares de operación de cada equipo, repitiéndose el mismo problema observado con los planes de mantenimiento generalizados.

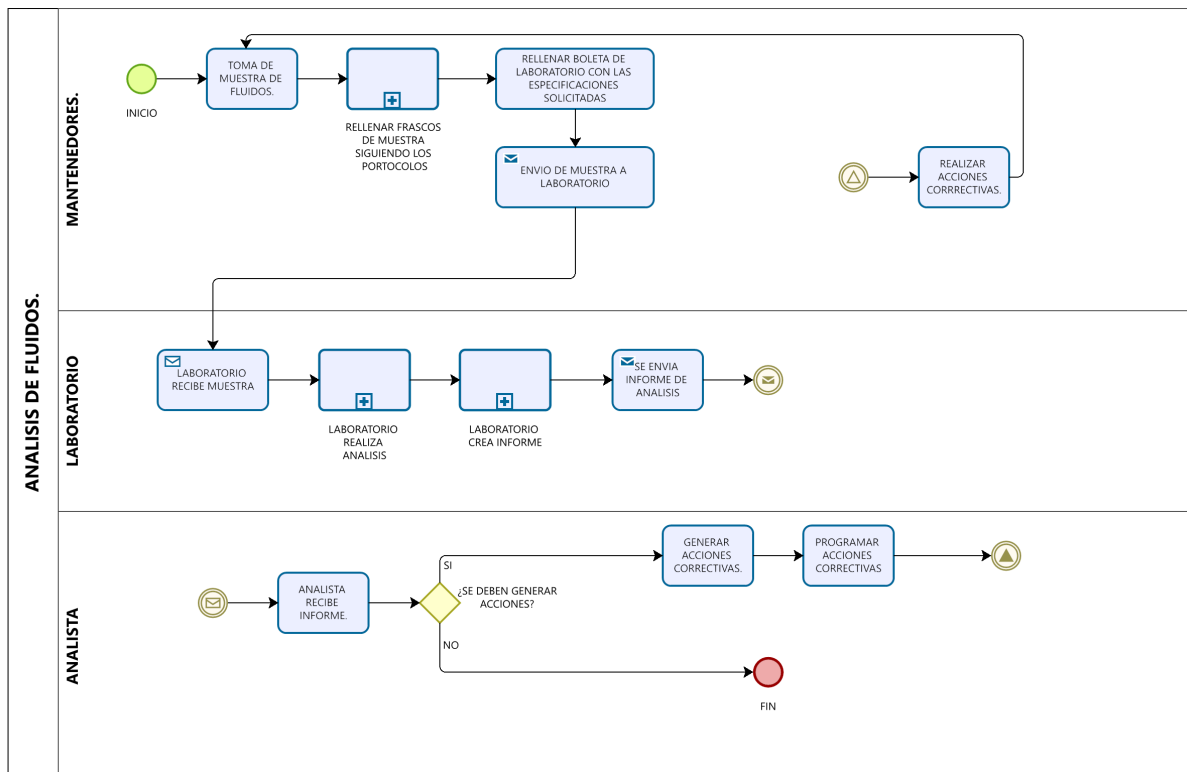


Figura 9: Flujo de trabajo actual para realizar Análisis de Muestra

Fuente: Elaboración Propia

- **Falta de Información Clave y Estado de los Equipos:** A pesar de contar con más de cuatro décadas en el mercado, REPORT enfrenta importantes deficiencias en la gestión de la información clave de los equipos bajo su supervisión. Datos esenciales, como: la identificación de los componentes críticos o las especificaciones de los fluidos recomendados por los fabricantes. Datos que no están adecuadamente registrados o, en algunos casos, dicha información es inexistente. Esta carencia se ve agravada por la falta de registros detallados sobre los fluidos efectivamente utilizados por los mantenedores en terreno para cada equipo y sus componentes, lo que genera importantes brechas de información. Estas lagunas aumentan el riesgo de fallos operativos, especialmente al emplear fluidos inadecuados o incompatibles, comprometiendo tanto el rendimiento como la vida útil de los equipos.

Esta falta de información crítica refleja una desconexión con el estado real de los equipos gestionados, limitando la capacidad de la empresa en la toma de decisiones informadas y preventivas. En entornos donde la correcta gestión de fluidos es esencial para garantizar la disponibilidad operativa y la seguridad, estas deficiencias no solo incrementan la probabilidad de fallas imprevistas, sino que también afectan negativamente la confiabilidad general de los equipos.

- **Falta de Trazabilidad:** Derivado de los puntos mencionados, se evidencia una clara falta de trazabilidad en las condiciones de los equipos, principalmente atribuido a la ausencia de una metodología estandarizada para gestionar la información clave. Esta carencia imposibilita llevar un registro consistente y detallado tanto de los fluidos utilizados en los distintos equipos como de los análisis realizados a lo largo del tiempo. La ausencia de un sistema de seguimiento adecuado, imposibilita detectar patrones de comportamiento o identificar señales tempranas de fallos, limitando la capacidad de anticiparse a posibles problemas y optimizar la toma de decisiones. Además, la falta de trazabilidad complica la comparación entre equipos similares, lo cual es crucial para implementar acciones correctivas más efectivas y personalizadas.

4.1. Análisis FODA empresa REPORT

Para una comprensión precisa de las oportunidades, debilidades y fortalezas de la empresa, se realizó un análisis exhaustivo de las fallas significativas durante la fase inicial del proyecto, centrándose en la etapa de auditoría interna. Este enfoque facilitó la identificación de las causas raíz de los problemas, siendo la base para el desarrollo de un análisis FODA que sintetiza los aspectos clave del entorno y las operaciones de la empresa. Se presenta a continuación una versión complementada del análisis, proporcionando una visión detallada de la situación actual y las áreas de oportunidad, para mejorar la gestión y optimización de recursos.

4.1.1. Fortalezas:

- **Experiencia técnica acumulada:** La empresa cuenta con un equipo altamente capacitado y con una sólida experiencia en el mantenimiento de equipos críticos. Esto le permite llevar a cabo intervenciones correctivas y preventivas de manera eficiente, minimizando el tiempo de inactividad.
- **Sistemas de mantenimiento establecidos:** Se han implementado sistemas de mantenimiento preventivo y correctivo que, si bien necesitan ajustes, proporcionan una base sólida para la transición a un enfoque más predictivo, como el análisis de fluidos.
- **Diversificación de Equipos:** La gestión de una variedad de equipos de distintas industrias, incluida la minería, facilita una comprensión amplia de las necesidades de mantenimiento.
- **Red de Apoyo del Grupo Agunsa:** Al ser parte de un grupo más grande, existe acceso a recursos y tecnología que pueden apoyar la transición hacia un enfoque más avanzado en el futuro.

4.1.2. Oportunidades

- **Innovación tecnológica y digitalización:** La adopción de nuevas tecnologías, como sistemas de monitoreo remoto y plataformas digitales de gestión de mantenimiento, puede mejorar significativamente la eficiencia operativa y la toma de decisiones basada en datos.

- **Implementación de mantenimiento predictivo basado en análisis de fluidos:** Existe una oportunidad clara para la empresa de integrar un sistema de mantenimiento predictivo, lo que permitiría monitorear los parámetros clave de los equipos, reduciendo la probabilidad de fallas imprevistas y optimizando los recursos.
- **Demanda de Mayor Eficiencia:** Las industrias están cada vez más enfocadas en reducir costos y mejorar la eficiencia, lo que crea una oportunidad para adoptar nuevas estrategias de mantenimiento.
- **Aumento en la Vida Útil de los Equipos:** Un enfoque predictivo podría extender la vida útil de los equipos, lo que sería un beneficio significativo para la empresa.
- **Mejora en la Planificación y Gestión de Repuestos:** Optimizar la gestión de repuestos para el mantenimiento preventivo podría mejorar la disponibilidad de equipos y reducir tiempos de inactividad.
- **Capacitación del Personal:** Aumentar la capacitación del personal en prácticas preventivas avanzadas podría mejorar la capacidad de anticiparse a problemas y reducir la dependencia del mantenimiento reactivo.
- **Optimización de los Programas Preventivos:** Existe la oportunidad de mejorar la eficiencia y efectividad del mantenimiento preventivo a través de un análisis más riguroso de los intervalos y necesidades de los equipos.

4.1.3. Debilidades

- **Dependencia del Mantenimiento Reactivo:** Actualmente, la empresa depende en gran medida del mantenimiento reactivo, lo que podría estar resultando en tiempos de inactividad no planificados y costos operativos elevados.
- **Planes de mantenimiento estandarizados:** Existe una dependencia significativa en los planes de mantenimiento basados en las recomendaciones de los fabricantes, los cuales no siempre reflejan las condiciones operativas reales, lo que provoca una desalineación entre la teoría y la práctica.

- **Uso Ineficiente de Recursos:** Si no se optimiza el mantenimiento preventivo, puede resultar en reemplazos innecesarios de piezas y equipos, generando costos adicionales sin necesidad.
- **Limitación en la Anticipación de Fallas:** Los métodos actuales no permiten prever fallas incipientes, esto quiere decir que los problemas a menudo se detectan solo cuando ya han causado daño.

4.1.4. Amenazas

- **Competencia en el mercado:** La entrada de nuevas empresas con tecnologías más avanzadas en mantenimiento predictivo puede, poner en riesgo la competitividad, si no se acelera la adopción de estas innovaciones.
- **Incremento de Costos Operativos:** La dependencia del mantenimiento reactivo puede resultar en un aumento continuo de los costos operativos, debido a la naturaleza impredecible de las fallas y las reparaciones urgentes.
- **Riesgo de Paradas Prolongadas:** La falta de capacidad para predecir fallas puede llevar a paradas prolongadas de equipos críticos, afectando la productividad y la eficiencia.
- **Desgaste Acelerado de los Equipos:** Las condiciones ambientales adversas, como: el polvo, la salinidad, y las variaciones extremas de temperatura, pueden afectar el desempeño de los equipos, incrementando el riesgo de fallas y acortando la vida útil de los activos, si no se implementan medidas adecuadas.

4.2. Identificación de Brechas a Corregir

1. Capacidad Limitada para Anticipar Fallas:

- **Descripción:** La empresa no cuenta con herramientas ni métodos que permitan anticipar fallas antes de que ocurran. Esto resulta en una alta dependencia del mantenimiento reactivo, lo que aumenta el riesgo de paradas inesperadas y costos adicionales.
- **Corrección Necesaria:** Implementar sistemas de monitoreo básico y realizar un análisis más detallado de las causas de fallas recurrentes, podría ayudar a mejorar la capacidad de anticipación dentro de las limitaciones actuales.

2. Ineficiencia en la Gestión de Recursos para Mantenimiento Preventivo:

- **Descripción:** El mantenimiento preventivo actual podría estar utilizando recursos de manera ineficiente, como reemplazos innecesarios de piezas que aún no están en riesgo de fallar. Esto puede resultar en un gasto innecesario y reducir la disponibilidad de los equipos para tareas críticas.
- **Corrección Necesaria:** Optimizar los intervalos de mantenimiento y mejorar la gestión de repuestos para asegurar que los recursos se utilicen de manera más eficiente y sólo cuando sea necesario.

3. Dependencia Excesiva del Mantenimiento Reactivo:

- **Descripción:** La empresa se apoya en el mantenimiento reactivo para resolver problemas, pero solo después de que ocurren, lo que puede conllevar a paradas de emergencia, afectar la productividad y aumentar los costos de reparación.
- **Corrección Necesaria:** Fortalecer los programas de mantenimiento preventivo, mediante la implementación de mejores prácticas y auditorías regulares, con la finalidad de reducir la necesidad de intervenciones reactivas.

4. Falta de Capacitación Especializada en Mantenimiento Avanzado:

- **Descripción:** El personal puede no estar completamente capacitado en técnicas avanzadas de mantenimiento preventivo, sin embargo al contar con estas técnicas se podría optimizar la operación de los equipos.

- **Corrección Necesaria:** Invertir en la capacitación continua del personal, en lo que respecta: las mejores prácticas de mantenimiento preventivo y en el uso de nuevas herramientas o tecnologías que puedan apoyar las estrategias actuales.

5. Riesgo de Desgaste Acelerado de Equipos:

- **Descripción:** La falta de un enfoque proactivo en el mantenimiento, podría estar contribuyendo a un desgaste apresurado de los equipos, disminuyendo su vida útil.
- **Corrección Necesaria:** Revisar y ajustar los planes de mantenimiento preventivo, para incluir inspecciones más detalladas y reparaciones menores, antes de que ocurran daños significativos, con el objetivo de extender la vida útil de los equipos

Con lo expuesto, se evidencian las problemáticas centrales que este proyecto pretende resolver. Los desafíos identificados, tales como la ausencia de un enfoque preventivo en el mantenimiento, las fallas recurrentes en equipos críticos y los elevados costos derivados de la indisponibilidad de los activos, son aspectos fundamentales que este proyecto busca abordar integralmente. El objetivo principal es diseñar e implementar un plan de mantenimiento predictivo basado en análisis tribológicos, que permita anticipar fallas y optimizar el rendimiento de los equipos, lo que se traducirá en una reducción de los tiempos de inactividad, costos de reparación y en la prolongación de la vida útil de los componentes. La adopción de estas estrategias no solo busca remediar las deficiencias actuales, sino también establecer un modelo de gestión eficiente y sostenible para el futuro.

5. Marco Teórico

Una vez establecidos los antecedentes y el problema central del proyecto, es fundamental identificar los conceptos y métodos clave que facilitarán una solución efectiva por parte de la empresa. El marco teórico proporciona una base sólida para comprender los enfoques y técnicas a emplear, así como su importancia en la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo fundamentado en el análisis tribológico.

En este contexto, se presentará una descripción exhaustiva de las herramientas utilizadas, así como de los métodos que han mostrado su eficacia en la gestión del mantenimiento y la optimización de activos. Esto abarca tecnologías avanzadas, tales como: el análisis de fluidos, el monitoreo de condiciones y enfoques de control basados en confiabilidad y costos, los cuales son esenciales para generar soluciones integrales a los problemas organizacionales.

El objetivo principal de este marco teórico es proporcionar los fundamentos necesarios para la aplicación efectiva de herramientas de mantenimiento predictivo en el contexto empresarial, garantizando una transición exitosa que minimice las fallas inesperadas y optimice la utilización de recursos.

5.1. El Mantenimiento

5.1.1. Concepto de Mantenimiento

El mantenimiento es un concepto que ha sido interpretado de diversas maneras por distintos autores. Moubray (1997) lo define como "las acciones necesarias para asegurar que los activos físicos continúen cumpliendo con sus funciones en un entorno operacional dado"[16], subrayando la importancia de la confiabilidad de los equipos y la reducción de riesgos asociados a fallos inesperados. Este enfoque, denominado Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), busca optimizar tanto la disponibilidad como la seguridad de los activos físicos.

Por otro lado, Kelly (2006) proporciona una definición actualizada del mantenimiento, describiéndolo como "Proceso mediante el cual los equipos o sistemas son preservados o restaurados a un estado en el que puedan realizar su función original de manera efectiva y eficiente"[13]. Este enfoque resalta la relevancia de la eficiencia operativa y la optimización de las actividades de mantenimiento, con el fin de reducir su impacto en la productividad y en los costos a largo plazo.

En este contexto, el mantenimiento se define como el conjunto de estrategias técnicas y administrativas orientadas a preservar el rendimiento, la confiabilidad y la disponibilidad de los activos físicos. Esto asegura su funcionamiento continuo y eficiente a lo largo de su ciclo de vida.

A medida que los activos fijos funcionan o se enfrentan a condiciones adversas, experimentan un deterioro en su rendimiento y estado físico. Este desgaste afecta tanto el desempeño operativo de los equipos como los estados financieros de la empresa, donde la depreciación representa la pérdida de valor de los activos debido al uso y desgaste. La depreciación se registra como un gasto esencial en la generación de ingresos, lo que reduce la utilidad gravable antes de impuestos.

Cada activo presenta un diferente nivel de desgaste. Si bien existen curvas teóricas que modelan este comportamiento, se consideran solo como referencias generales. Desde una perspectiva financiera, el Servicio de Impuestos Internos proporciona tablas de vida útil para los activos, lo que permite prever con mayor precisión la depreciación y optimizar la planificación financiera.

En el ámbito industrial, el objetivo primordial es maximizar los beneficios, evitando pérdidas asociadas a una menor producción o costos derivados de la ineficiencia. Esto debe lograrse considerando los costos de mantenimiento y alineándose con las políticas de la empresa en lo que respecta a la seguridad del personal y la protección del medio ambiente.

No obstante, el proceso de evolución del mantenimiento se ha desarrollado a través de diversas etapas, cada una caracterizada por métodos, herramientas y metodologías específicas[18]. Esta evolución responde a los múltiples cambios que ha experimentado la industria a lo largo del tiempo, influenciada por hitos históricos que han determinado el desarrollo tecnológico y económico a nivel global. Cada fase en la historia industrial ha generado nuevas demandas y desafíos, repercutiendo en la gestión de activos y en la eficiencia operativa.

Según Juan Díaz Navarro, autor de "Técnicas de Mantenimiento Industrial", y John Moubray en "Mantenimiento Centrado en Confiabilidad", la evolución del mantenimiento industrial se puede clasificar en cuatro etapas principales[19].

- **Primera Generación:** Comprende desde la revolución industrial en el siglo XVIII hasta después de la segunda guerra mundial. En este periodo el mantenimiento solo se ocupaba de reparar defectos, es decir, netamente correctivo. Esta interacción es producto, como nos detalla John Moubray, en su artículo "Mantenimiento Centrado en Confiabilidad", "En esos días la industria no estaba muy mecanizada, por lo que, los períodos de paro no importaban mucho. Los equipos y máquinas era sencillos y en la mayoría de los casos diseñados para un propósito determinado. Esto hacía que fueran confiables y fáciles de reparar. Como resultado no se necesitaban sistemas de mantenimiento complicados, y la necesidad de personal calificado era menor que ahora"[18].

- **Segunda Generación:** Durante la segunda Guerra Mundial y hasta aproximadamente finales de la década de los setenta, el paradigma comienza a cambiar. Se descubre la relación entre la edad de los equipos y la probabilidad de su fallo. Además, la guerra obligó a la industria a adaptarse dada la necesidad de productos de toda clase y la baja disponibilidad de mano de obra industrial, obligando a un aumento de mecanización. Para satisfacer esta necesidad, se construyeron equipos más complejos de los cuales las empresas comenzaron a depender. Por tanto, " Al aumentar esta dependencia, el tiempo improductivo de un equipo se hizo más evidente. Esto llevó a la idea de que todas las fallas se podían y debían prevenir", naciendo así el conocido mantenimiento preventivo.
- **Tercera Generación:** Durante la década de los ochenta, las empresas experimentaron un cambio acelerado impulsado por la mecanización y la automatización, lo que aumentó la importancia de la disponibilidad de los equipos en la producción. Con el incremento de los estándares de calidad, cualquier falla comenzó a tener consecuencias más graves, afectando la seguridad y el medio ambiente. Esto resaltó la necesidad de implementar estrategias de mantenimiento más avanzadas, como el mantenimiento predictivo, que permite detectar fallas incipientes y tomar medidas correctivas, antes de que se agraven los problemas. Asimismo, se promovió la colaboración de los departamentos de producción en la identificación de fallos, lo que optimizó la coordinación con las áreas de mantenimiento.
- **Cuarta Generación:** Surge a comienzos de la década de los noventa, en un contexto donde el mantenimiento comienza a ser integrado dentro del concepto de calidad total. En este marco, se reconoce que mediante una adecuada gestión del mantenimiento es posible aumentar la disponibilidad de los equipos, al mismo tiempo que se reducen los costos operativos. Esta evolución conceptual da paso al mantenimiento basado en el riesgo (MBR), que redefine el rol del mantenimiento dentro de la organización.

El MBR se concibe como un proceso integral de la empresa, en el que se reconoce que otros departamentos también contribuyen al éxito de las operaciones de mantenimiento. Este enfoque transforma la percepción del mantenimiento, pasando de ser una función puramente reactiva y de soporte a una fuente estratégica de beneficios. En lugar de considerar el mantenimiento solo como un gasto, comienza a ser valorado como un medio para mejorar la eficiencia operativa y la rentabilidad de la empresa.

El MBR implica la identificación y gestión de los riesgos asociados a la posibilidad de fallos de las máquinas y los equipos, así como las consecuencias que estos fallos pueden tener para la organización. Esta gestión del riesgo permite priorizar las actividades de mantenimiento en función del impacto que puede tener un fallo, tanto en la producción como en la seguridad y medio ambiente.

En la actualidad, se combina el mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM), nacido en la década de los setenta, centrado en optimizar las tareas de mantenimiento según el impacto de las fallas y tecnologías emergentes de la Industria 4.0. Herramientas como el Internet de las Cosas (IoT), el big data y la inteligencia artificial permiten la implementación de un monitoreo continuo y en tiempo real de los equipos. Esto no solo facilita la identificación temprana de problemas, sino que también permite una mejor toma de decisiones, en cuanto a las intervenciones de mantenimiento necesarias.

La integración de estas tecnologías con el RCM y el MBR, no solo mejora la eficiencia del mantenimiento, sino que también aporta a la sostenibilidad y resiliencia de la organización. Al contar con información en tiempo real sobre el estado de los equipos, las empresas pueden planificar de manera más efectiva, optimizando el uso de recursos y reduciendo los tiempos de inactividad. En resumen, la evolución del mantenimiento se centra en la proactividad, el análisis basado en datos y la colaboración interdepartamental, lo que resulta en un enfoque más integral y estratégico hacia la gestión del mantenimiento.

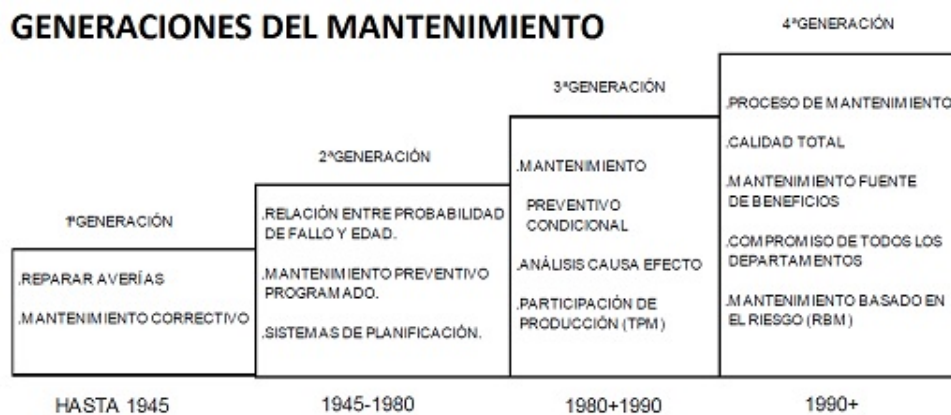


Figura 10: Evolución del Mantenimiento

Fuente: <https://mantenimientoindustrialdeequipos.blogspot.com/2016/01/mantenimiento-industrial.html>

Finalmente, es fundamental considerar que, en la actualidad, la aplicación de diversas generaciones de metodologías de mantenimiento varía según las características específicas de cada empresa. Estas características incluyen: la estrategia de negocio, los estándares de calidad, los recursos disponibles y los objetivos empresariales. Estas metodologías, aunque efectivas en su tiempo, han evolucionado para responder a los desafíos del entorno industrial contemporáneo. Hoy en día, el mantenimiento ha transitado de ser una función secundaria y reactiva a convertirse en un elemento estratégico esencial en la búsqueda de la excelencia operacional.

El mantenimiento contemporáneo va más allá de la mera respuesta a fallas, centrándose en la prevención, predicción y optimización de recursos. Las organizaciones que integran sus objetivos de mantenimiento con estrategias globales logran no solo una mejora en la eficiencia operativa, sino también una optimización de la disponibilidad de equipos y una disminución de costos operativos. Este enfoque permite anticipar posibles fallas, mitigar sus impactos y garantizar la continuidad operativa, aspectos fundamentales para mantener la competitividad en un entorno global, cada vez más exigente.

La implementación de un enfoque integral de mantenimiento permite a las empresas transformar esta función en una ventaja competitiva, optimizando recursos y mejorando aspectos clave como la seguridad, sostenibilidad y rentabilidad. En este contexto, el mantenimiento se rige como un pilar esencial para las organizaciones que buscan alcanzar el estatus de empresas de clase mundial, donde la excelencia en la gestión de activos y la eficiencia operativa son estándares.[25]

5.1.2. Confiabilidad

La confiabilidad en el mantenimiento se define como, la capacidad de un sistema o componente para operar sin fallos en un intervalo determinado y bajo condiciones específicas. Un sistema confiable ejecuta sus funciones especificadas sin interrupciones, lo cual es fundamental para garantizar la continuidad operativa y la eficiencia en la utilización de recursos.

L. S. Rausand y A. Ø. Høyland, en su libro *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*, definen la confiabilidad como *"la probabilidad de que un sistema o componente funcione adecuadamente durante un período específico bajo condiciones de operación definidas"* [24]. Esta definición subraya la relevancia de dos factores clave: las condiciones de operación y el tiempo.

Los autores también enfatizan que *"la confiabilidad puede mejorarse mediante prácticas de mantenimiento adecuadas, como el mantenimiento preventivo y predictivo, que contribuyen a reducir la tasa de fallos y a extender la vida útil de los activos"* [24]. Este enfoque resalta la importancia de la gestión estratégica del mantenimiento como un pilar fundamental para optimizar el rendimiento y la longevidad de los sistemas.

5.1.3. Disponibilidad

La disponibilidad, en el ámbito del mantenimiento, se define como la capacidad de un sistema o componente para estar operativo y listo para funcionar según lo exijan las condiciones de uso. Este indicador es fundamental para evaluar la eficacia de un sistema, ya que integra los factores de confiabilidad y mantenimiento en términos temporales. Comúnmente, la disponibilidad se expresa como un porcentaje que representa el tiempo total en el que el sistema está accesible para su operación, en relación con el tiempo total evaluado.

Una definición precisa de disponibilidad es presentada por S. B. McGhee y R. A. Schmid en su libro *Reliability and Maintainability: Fundamentals and Applications*, quienes afirman que *"la disponibilidad es la probabilidad de que un sistema esté operativo y disponible para su uso en un momento dado, considerando las interrupciones por fallas y el tiempo necesario para realizar el mantenimiento"* [15].

6. Estrategias de Mantenimiento

El objetivo principal de cualquier estrategia de mantenimiento es minimizar los tiempos de inactividad, gestionar los costos y garantizar que los equipos operen de manera segura y eficiente, optimizando su rendimiento y prolongando la vida útil de los activos. A lo largo del tiempo, se han desarrollado y perfeccionado diversas estrategias de mantenimiento con este fin.

Las estrategias de mantenimiento se clasifican en dos categorías según su enfoque frente a las fallas. Las acciones **proactivas** se centran en la prevención de fallos, incluyendo el mantenimiento preventivo, predictivo y proactivo, cuyo objetivo es detectar y corregir problemas antes de que afecten el funcionamiento de los equipos. Por otro lado, las acciones **reactivas** se implementan tras la ocurrencia de una falla. Aunque menos deseables debido a los costos y a los tiempos de inactividad que conllevan. Estas intervenciones son necesarias en situaciones donde la prevención del fallo es difícil o inviable [21].

Más específicamente, Alejandro Piastrelli, en su obra *Manual de mantenimiento predictivo. Ingeniería, gestión y operación*, identifica un total de siete estrategias de mantenimiento:

- **Mantenimiento correctivo**
- **Mantenimiento restaurativo**
- **Mantenimiento mejorativo**
- **Mantenimiento preventivo**
- **Mantenimiento predictivo**
- **Mantenimiento detectivo**
- **Mantenimiento previsorio**

Estas estrategias se organizan en dos enfoques primordiales: **acciones reactivas** y **acciones proactivas**. A continuación, se presentan definiciones para cada uno de los enfoques:

6.1. Acciones Reactivas

Las acciones reactivas tienen como objetivo restaurar la operatividad de un equipo o sistema tras una falla funcional inesperada. Estas acciones suelen ejecutarse con escasa o nula planificación previa, lo que puede ejercer una presión adicional para improvisar y así reducir el impacto de la falla. En algunas situaciones, la implementación de acciones reactivas se lleva a cabo tras la identificación de desviaciones iniciales en los parámetros operacionales, lo que permite disponer de una breve oportunidad para programar una respuesta adecuada.

En determinadas circunstancias, puede ser necesario realizar modificaciones o mejoras en el equipo, impulsadas por requerimientos de mantenibilidad, seguridad o eficiencia operativa. Aunque estas acciones no corresponden a un plan de mantenimiento preventivo o predictivo, se integran en la planificación del área de mantenimiento para asegurar una respuesta efectiva [21].

6.2. Acciones Proactivas

Estas acciones fundamentan los planes de mantenimiento, cuyo objetivo es prevenir la materialización de modos de falla o, en caso de que ocurran, minimizar su frecuencia e impacto. Mediante acciones proactivas, el área de mantenimiento gestiona los modos de falla antes de que afecten el rendimiento de los equipos o sistemas.

Las acciones proactivas comprenden el monitoreo constante de condiciones y la implementación de mejoras continuas para prevenir fallas. Estas prácticas son fundamentales para asegurar la operatividad de los activos y extender su vida útil [21].

A continuación, se presenta una descripción detallada de las estrategias mencionadas y que se emplean en la actualidad.

6.2.1. Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento correctivo se centra en la reparación de fallos o averías en el momento en que ocurren, careciendo de planificación previa. Por lo general, es el operador de la máquina quien identifica el problema y lo comunica al equipo de mantenimiento especializado; en algunos casos, el operador puede resolver fallas menores por su cuenta. Esta modalidad de intervención, al no estar programada, conlleva una significativa dependencia del personal de mantenimiento y frecuentemente las soluciones implementadas son temporales, lo cual puede resultar en problemas recurrentes o crónicos.

Una alta frecuencia de mantenimiento correctivo incrementa la necesidad de contar con equipos de reserva, lo que eleva los costos asociados al capital inmovilizado. La falta de previsibilidad en los fallos complica la elaboración de presupuestos, generando así gastos operativos y de mantenimiento superior. A pesar de que los fallos inesperados requieren escasa planificación, pueden paralizar las operaciones, afectando gravemente la producción y la calidad del producto, además de aumentar el riesgo de accidentes por la urgencia en las reparaciones.

6.2.2. Mantenimiento Restaurativo

El mantenimiento se realiza a identificar que los parámetros de operación de un equipo se desvían del estado óptimo, aunque este no haya fallado aún. En situaciones de rendimiento insatisfactorio, se programa una intervención destinada a restaurar la funcionalidad del equipo antes de que ocurra una falla. De este modo, se implementa una reparación planificada y programada, conocida como **Mantenimiento de Restauración Programada** (MRP), lo que minimiza interrupciones operativas inesperadas y facilita una gestión más eficiente de los recursos y del equipo.

6.2.3. Mantenimiento Mejorativo

El mantenimiento mejorativo implica acciones orientadas a optimizar el rendimiento y la confiabilidad de los equipos, estructuradas en dos enfoques principales.

En primer lugar, se encuentra el **Rediseño**, el cual es llevado a cabo por el personal de planta con el propósito de optimizar los procesos, eliminar fallas recurrentes y mejorar la confiabilidad y mantenibilidad de los activos. Los rediseños pueden enfocarse en modificaciones físicas de los equipos o en alteraciones operativas, como la mejora de procedimientos o la capacitación del personal operador y técnico.

En el segundo enfoque, se analizan las intervenciones de los fabricantes, especialmente en productos innovadores o de baja fiabilidad que presentan fallas con implicaciones en la seguridad. Estas intervenciones, denominadas **Mantenimiento Curativo**, comprenden reemplazos masivos de componentes, rediseños de sistemas y modificaciones en los planes de mantenimiento originales, en respuesta a fallas identificadas en análisis previos.

6.2.4. Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo se enfoca en reducir la cantidad de paradas inesperadas mediante la programación de intervenciones en momentos estratégicos, que son convenientes tanto para la producción como para el área de mantenimiento. Este tipo de mantenimiento permite preparar con anticipación las herramientas, repuestos e insumos necesarios, así como seleccionar al personal más capacitado para llevar a cabo las tareas.

Se incluyen servicios de inspección periódica, así como conservación y restauración de componentes, para prevenir, identificar o corregir defectos. Las actividades de mantenimiento preventivo se realizan en intervalos regulares, ya sea en términos de horas, ciclos u otros parámetros definidos, independientemente del estado actual del equipo. Estas tareas suelen llevarse a cabo con el equipo fuera de operación, realizando sustituciones o reparaciones cíclicas de los componentes. En ciertos casos, es fundamental justificar la viabilidad económica de la implementación de estas actividades.

6.2.5. Mantenimiento Predictivo

Este enfoque se fundamenta en la premisa de que determinados componentes generan señales de alerta previo a la ocurrencia de fallos. Mediante el monitoreo continuo de estos indicadores a través de tecnologías avanzadas, es factible evaluar la evolución del estado de los equipos y prever la aparición de fallas.

Una vez identificada una falla incipiente, es factible estimar el tiempo de vida útil restante del componente, lo que facilita la planificación adecuada para su reparación o reemplazo. En el contexto de equipos críticos, se utilizan análisis estadísticos para extrapolar el comportamiento de los componentes y establecer la frecuencia óptima de inspección. A diferencia del mantenimiento correctivo, el mantenimiento predictivo se realiza con los equipos en operación, lo que reduce al mínimo el tiempo de inactividad.

Entre las herramientas empleadas en el mantenimiento predictivo se destacan:

- Análisis de vibraciones (ya sea de forma continua o periódica).
- Termografía infrarroja.
- Análisis de fluidos.
- Inspección por ultrasonido.
- Análisis de amperaje.
- Emisión acústica.
- Verificación de metales y aleaciones, entre otros.

6.2.6. Mantenimiento Proactivo

El mantenimiento proactivo es uno de los enfoques dentro de las filosofías de mantenimiento. Al igual que el mantenimiento predictivo, requiere el monitoreo constante de parámetros específicos de los componentes, lo cual es crucial para determinar intervenciones necesarias. Es esencial distinguir entre " mantenimiento proactivo" y " acciones proactivas". Aunque el mantenimiento predictivo permite prever un fallo, la condición de ciertos componentes puede volverse irreversible, como es el caso de bolas en rodamientos dañadas o el desgaste en componentes eléctricos. En contraposición, el mantenimiento proactivo busca identificar de manera anticipada la causa raíz de las fallas. La identificación de síntomas adversos brinda la posibilidad de implementar acciones correctivas, desviando tendencias desfavorables y mejorando las condiciones operativas antes de que ocurran fallas irreversibles. En contraste, el mantenimiento proactivo busca establecer de manera anticipada la causa raíz de las fallas. Identificar síntomas adversos ofrece la oportunidad de tomar medidas correctivas para desviar tendencias desfavorables y mejorar las condiciones de operación antes de que ocurran fallas irreversibles.

Algunos ejemplos de mantenimiento proactivo incluyen:

- Monitoreo de contaminantes de un lubricante.
- Conteo de partículas.
- Alineación y balanceo.
- Monitoreo de viscosidad y acidez de lubricantes.

6.2.7. Mantenimiento Detectivo

El mantenimiento predictivo se centra en la identificación de fallas ocultas en dispositivos redundantes y de seguridad. La detección y corrección de estas anomalías contribuyen a mejorar la disponibilidad y fiabilidad de los sistemas de protección. La omisión de estas fallas puede provocar fallos funcionales concurrentes en el sistema protegido. Se estima que más del 40% de los modos de falla en la industria son ocultos. A pesar de ello, muchas organizaciones no logran identificar ni gestionar adecuadamente estas fallas, resultando en un aumento significativo de fallos funcionales. Implementar un enfoque que no aborde específicamente estas anomalías puede llevar a un incremento en el mantenimiento preventivo, una estrategia que no siempre resulta en la solución más eficaz.

6.2.8. Mantenimiento Previsivo

El mantenimiento predictivo tiene como objetivo reducir la probabilidad de fallas desde la fase de diseño, generalmente sin la intervención directa del personal de mantenimiento. En diversas aplicaciones tecnológicas, se emplean técnicas de simulación para prever posibles fallas en las instalaciones. Estas herramientas permiten evaluar alternativas de solución y realizar los ajustes necesarios para disminuir el riesgo de fallos en el sistema. Cuando se requiere un alto nivel de confiabilidad, es esencial llevar a cabo análisis desde las etapas iniciales para prevenir la recurrencia de fallos. Este tipo de mantenimiento incluye técnicas de mejora implementadas en el diseño básico, orientadas a optimizar las actividades de mantenimiento, aumentar la mantenibilidad y mitigar las consecuencias de los fallos. Entre las herramientas más efectivas en este ámbito se encuentran el FMEA (Análisis de Modos de Falla y sus Efectos) y el RCD (Diseño Centrado en Confiabilidad).

6.3. Tribología, Lubricación y Equipos

6.3.1. Tribología

La tribología es la ciencia que examina las interacciones entre superficies en movimiento relativo, abarcando fenómenos como: la fricción, el desgaste, la lubricación y el consumo de energía, todos influenciados por la rugosidad de los materiales. Su importancia ha crecido en el sector industrial, donde la eficiencia y durabilidad de los equipos son fundamentales para optimizar la productividad y reducir costos operativos. Según Pedro Albarracín Aguillón, autor de " Tribología y Lubricación", "La tribología es quizás la ciencia de mayor trascendencia en la actualidad y lo será aún más en el futuro, a medida que el hombre necesite ser más productivo, ya que sin su aplicabilidad resultaría casi imposible la supervivencia de los seres vivos en la Tierra."

El término " tribología" fue acuñado en 1966 por David Tabor y Peter Jost, quienes destacaron la importancia de esta ciencia para mejorar la eficiencia y la durabilidad de los sistemas mecánicos. Desde entonces, la tribología se ha consolidado como un campo esencial en la ingeniería mecánica y otras disciplinas industriales. El estudio y control de la fricción y desgaste, permite ofrecer soluciones orientadas a la minimización de pérdidas de energía, la optimización del rendimiento operativo de los equipos y la prolongación de su vida útil. De este modo, la tribología contribuye de manera significativa a la optimización de recursos en industrias de alta exigencia.

6.3.2. Curva Tribológica

La curva tribológica de los componentes mecánicos, análoga a la curva de la bañera de Davis, ilustra el comportamiento del desgaste a lo largo del tiempo. Cada metal que compone la metalurgia de un componente presenta una curva tribológica específica. Dicha curva se divide en tres etapas:

- **Improductiva o Asentamiento:** En esta etapa inicial se presenta un elevado desgaste debido a la interacción de las rugosidades de las superficies en contacto. Este periodo es crítico, ya que un asentamiento inadecuado puede reducir significativamente la vida útil del componente, fenómeno conocido como "mortalidad infantil"[3].
- **Productiva o Vida a la Fatiga:** Es la etapa más importante en la vida del mecanismo o componente. Durante esta fase, el desgaste erosivo se estabiliza y se mantiene en niveles controlados mientras el componente opera dentro de sus parámetros de diseño [3].
- **Final o Remanente:** En esta última etapa, la tasa de desgaste aumenta exponencialmente, lo que indica el final de la vida útil del componente. Identificar correctamente este punto es crucial para planificar un reemplazo antes de que ocurra una falla catastrófica [3].

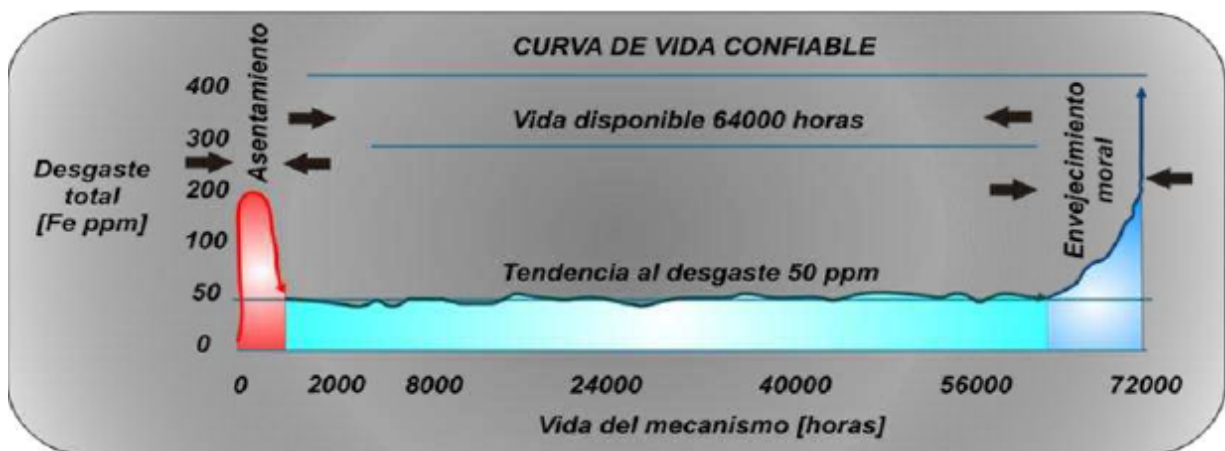


Figura 11: Modelo Curva Tribológica

Fuente: Seminario Tribología y Lubricación.

En el presente modelo de análisis se contemplan tres escenarios, los cuales son fácilmente interpretables:

- **Curva Tribológica Positiva:** Escenario más favorable para la vida útil de un componente o sistema mecánico. Se presenta cuando la curva tribológica del componente se encuentra por debajo de los límites de tendencia establecidos por el fabricante. En términos simples, el desgaste del componente es menor al proyectado, lo que indica un estado óptimo y un correcto funcionamiento del mismo, incrementando su confiabilidad. Dado que es el escenario ideal, resulta ser el más difícil de lograr en la práctica.

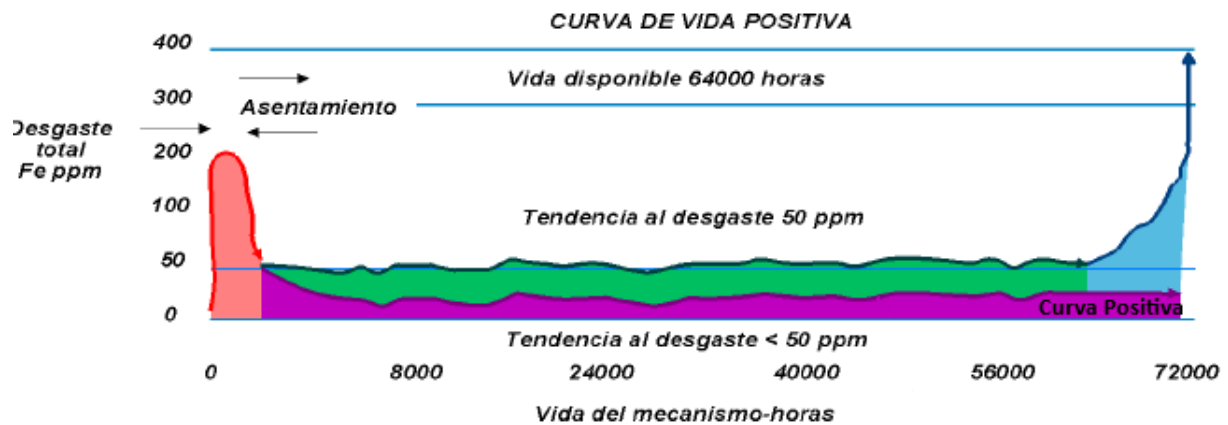


Figura 12: Modelo Curva Tribológica Positiva

Fuente: Seminario Tribología y Lubricación.

- **Curva Tribológica Negativa:** Caso contrario al anteriormente descrito, por tanto, se presenta cuando la curva tribológica del componente se presenta por encima de los límites de tendencia establecidos por el fabricante. Este caso es el más probable de ocurrir cuando no se respetan los tiempos de asentamiento y las técnicas de mantenimiento son inadecuadas, debiendo incurrir en costosas reparaciones, donde muchas veces se condena el componente y debe ser reemplazado en su totalidad.

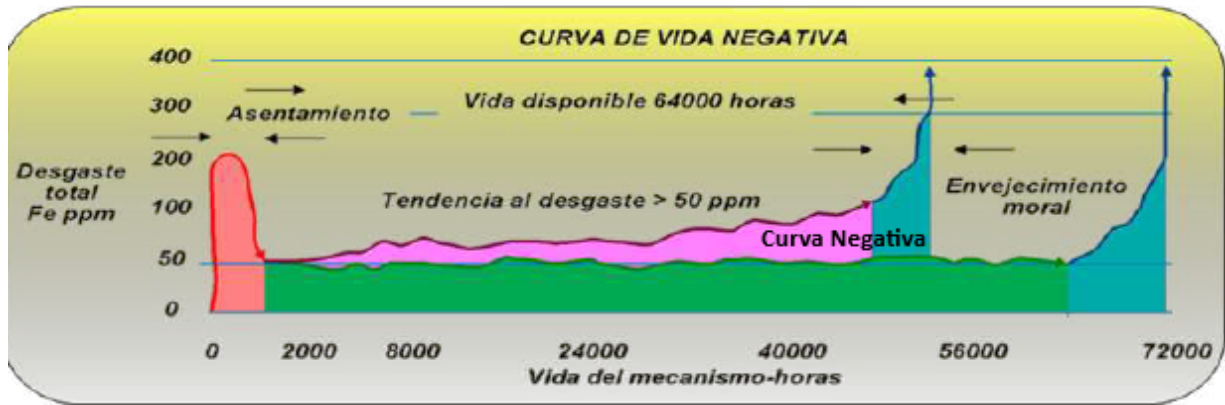


Figura 13: Modelo Curva Tribológica Negativa

Fuente: Seminario Tribología y Lubricación.

- Curva Tribológica Normal:** Escenario esperado, en donde la curva tribológica de desgaste del componente se comporta como el fabricante indica que se comportara, lo que aporta seguridad a la hora de tomar futuras decisiones respecto a las reparaciones o remplazo del sistema mecánico.

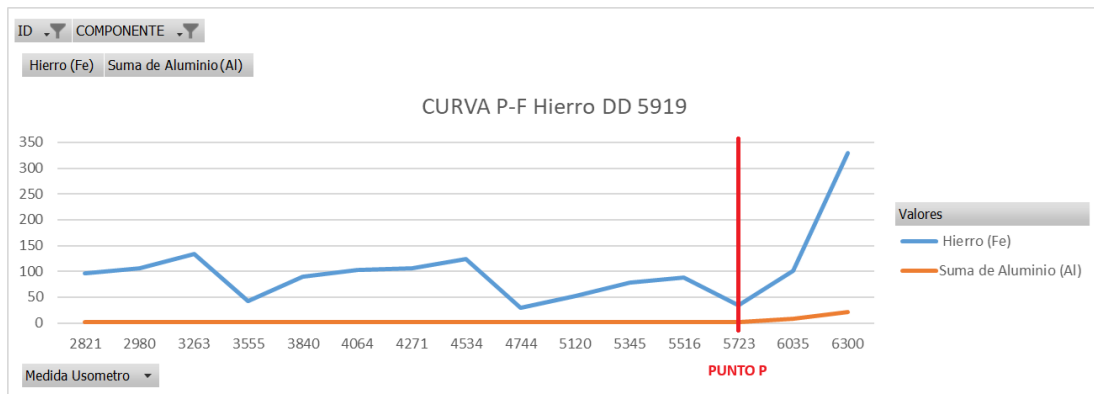


Figura 14: Curva tribología real

Fuente: Elaboración propia

6.3.3. Fricción

La fricción se define como la resistencia al deslizamiento entre dos superficies en contacto, generando calor y provocando pérdidas energéticas. Aunque la fricción resulte útil en aplicaciones como los sistemas de frenos, en la mayoría de los sistemas mecánicos es preferible disminuir su impacto para optimizar la eficiencia energética. Un incremento en la fricción puede ocasionar mayor desgaste, lo que reduce la vida útil de los componentes.

La fricción esta determina por la fuerza de fricción (F), la cual es negativa y se opone al movimiento. Esta fuerza representa la cantidad de energía mecánica que se disipa cuando dos cuerpos inician su movimiento o interactúan entre sí, siendo paralela y opuesta a la dirección del desplazamiento. Adicionalmente, la fricción es un indicador de la eficiencia energética del mecanismo durante su operación. [3]

La fuerza de fricción se determina mediante la siguiente ecuación:

$$F = f \times W \quad (1)$$

Donde:

- **F**: Fuerza de fricción, expresada en kilogramos fuerza [kgf] o libras pie [lbf].
- **f**: Coeficiente de fricción, dado por los materiales participes de la interacción.
- **W**: Fuerza normal que actúa sobre las superficies en contacto, expresa en kilogramos fuerza [kgf] o libras pie [lbf].

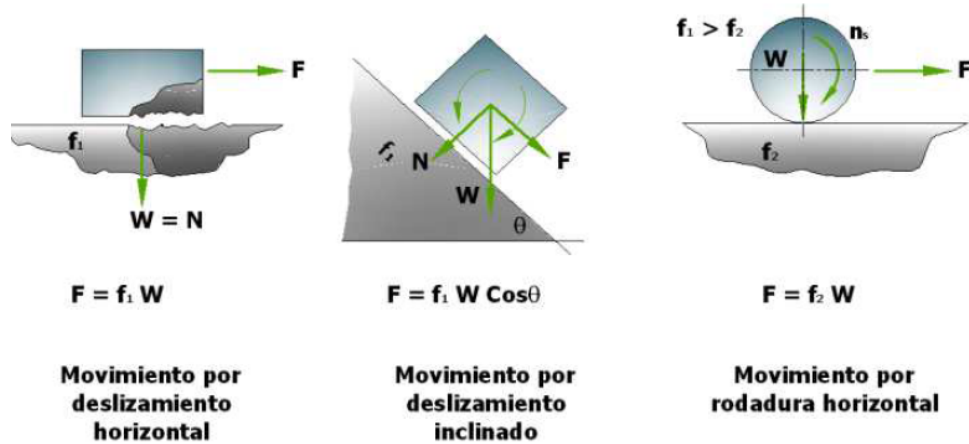


Figura 15: Ejemplos Fuerza de Fricción

Fuente: Seminario Tribología y Lubricación.

La fricción es un factor determinante en el desgaste de componentes mecánicos. Se distingue entre fricción estática, que representa la resistencia inicial antes del inicio del movimiento, y fricción cinética, que se presenta una vez que las superficies están en movimiento.

Dentro de la fricción cinética, se identifican varios subtipos:

- **Fricción metal-metal:** Se da cuando las superficies metálicas entran en contacto directo sin un lubricante adecuado. Este tipo de fricción puede provocar fallas catastróficas debido a la soldadura de las crestas de las rugosidades.



Figura 16: Falla catastrófica buje muñón producto interrupción de flujo de aceite.

Fuente: Seminario Tribología y Lubricación.

- **Fricción sólida cinética:** "Se presenta de manera transitoria siempre que los componentes de la máquina inician su movimiento ó paran. Puede conllevar a altos niveles de desgaste"[3].

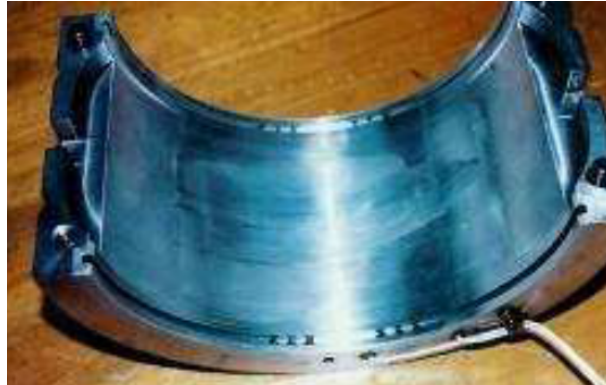


Figura 17: Desgaste adhesivo en buje de compresor por fricción sólida en puesta en marcha.

Fuente: Seminario Tribología y Lubricación.

- **Fricción mixta:** Ocurre cuando las superficies están parcialmente separadas por una película lubricante, lo que resulta en un desgaste moderado.



Figura 18: Desgaste adhesivo por fricción mixta en buje de eje de baja velocidad en un reductor.

Fuente: Seminario Tribología y Lubricación.

- **Fricción fluida:** En este caso, las superficies están completamente separadas por una capa de lubricante, reduciendo significativamente el desgaste, siendo este el caso mas favorable en sistemas mecánicos lubricados.



Figura 19: Película lubricante en buje de apoyo de turbina a vapor cuyo eje gira a 3600 [rpm].

Fuente: Seminario Tribología y Lubricación.

El tipo de lubricante es fundamental, ya que determina su comportamiento entre materiales y la fuerza de corte, lo cual influye en las características de la fricción. Los valores típicos para los diferentes lubricantes, son:

- **Aceite Mineral:** Se modela como la resistencia al corte las laminas que conforman la película de lubricante, cuyo valor típico es de 0,008 [3].
- **Aceites Sintéticos:** En este caso, la fuerza de fricción se representa como la resistencia a la rodadura de esferas de igual diámetro, su valor típico es de 0,006 [3].
- **Aceites Vegetales:** Al igual que en caso anterior, la fuerza de fricción se representa como la resistencia a la rodadura de esferas pero de diferente diámetro, cuyo valor típico es de aproximadamente [3].

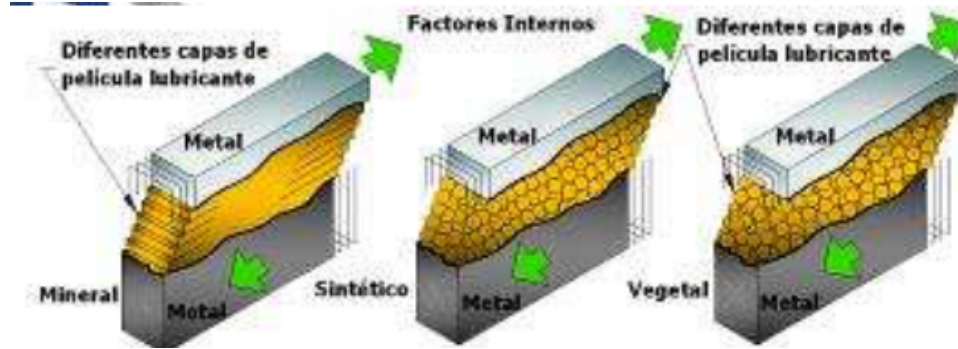


Figura 20: Representación de fricción fluida en diferentes tipos de lubricantes.

Fuente: Seminario Tribología y Lubricación

6.3.4. Generación de Calor

En los sistemas mecánicos, una porción considerable de la energía aplicada se pierde debido a la fricción entre los componentes. Estudios muestran que en automóviles, hasta un 33 % de la energía del combustible en un motor de combustión interna se disipa en forma de calor, provocado por la fricción entre motores, transmisiones y otros sistemas. En cuanto a la maquinaria industrial, las pérdidas por fricción varían entre el 20 % y el 30 % de la energía total usada en su operación. El calor se genera cuando dos superficies que se mueven relativamente entre sí entran en contacto, creando resistencia. Esta resistencia es causada por las microirregularidades en las superficies de los componentes, que afectan su interacción. Las microirregularidades en los componentes provocan esta resistencia. Una gestión incorrecta de esta situación lleva a un aumento continuo de la temperatura y las irregularidades superficiales, aumentando la resistencia hasta superar el torque aplicado. Al alcanzar este límite, el sistema mecánico se detiene, lo que puede causar una falla grave del equipo.

6.3.5. Desgaste

El desgaste resulta de la interacción entre superficies en movimiento relativo, y es una de las principales causas de degradación de componentes mecánicos. En la industria, los diferentes tipos de desgaste pueden disminuir considerablemente la vida útil de los equipos, impactando su rendimiento y elevando los costos de mantenimiento.

Dentro de las principales consecuencias del desgaste a nivel técnico se encuentran:

- Movimiento errático de los mecanismos lubricados.
- Altos valores de vibraciones e incremento en los niveles de ruido.
- Elevadas temperaturas de operación[3].

Mientras que las principales consecuencias a nivel económico son:

- Mayor consumo de repuestos por incremento del mantenimiento correctivo.
- Reducción significativa de la producción por paros de maquinaria.
- Mayor consumo de energía para realizar la misma cantidad de trabajo útil[3].

Hutchings (1992) establece que el desgaste puede surgir de varios mecanismos, entre los cuales se destacan la abrasión, adhesión, erosión y corrosión. A continuación se presentan las definiciones de estos fenómenos:

- **Desgaste adhesivo:** El desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies en contacto, sometidas a presión, tienden a soldarse momentáneamente en sus micro-asperezas debido a la acción de las cargas. Cuando el movimiento se reinicia, estas uniones se rompen, lo que provoca la pérdida de material en ambas superficies. Este fenómeno es especialmente problemático en condiciones de lubricación límite, donde la película lubricante es insuficiente para separar completamente las superficies.

En equipos como: reductores, cojinetes y engranajes, el desgaste adhesivo puede generar una pérdida significativa de material, especialmente bajo cargas altas o en condiciones de arranque y parada frecuente. En aplicaciones mineras o portuarias, donde la maquinaria trabaja a máxima capacidad, el desgaste adhesivo puede acortar drásticamente la vida útil de los componentes[3].

- **Desgaste abrasivo:** El desgaste abrasivo se produce cuando partículas duras, atrapadas entre dos superficies, o una superficie más dura que otra, generan cortes y raspaduras, eliminando material. Este tipo de desgaste es común en entornos donde la contaminación con polvo o partículas es significativa, y puede clasificarse en dos tipos:

1. **Desgaste abrasivo de dos cuerpos:** Una superficie más dura, raspa y elimina material de una superficie más blanda, como ocurre cuando partículas de polvo o material abrasivo entran en contacto con cojinetes o ejes.
2. **Desgaste abrasivo de tres cuerpos:** En este caso, una partícula externa actúa como agente de abrasión entre las dos superficies. " Este tipo de desgaste es común en sistemas con sellos defectuosos o en ambientes altamente contaminados"[3].

Este tipo de desgaste puede ser devastador para equipos como: las correas transportadoras, mandos finales, excavadoras y maquinaria de carga, donde las partículas abrasivas suelen estar presentes. A largo plazo, puede llevar a fallas prematuras y aumentar costos de reemplazo de componentes.

La instalación de filtros eficaces y la implementación de sistemas de lubricación adecuados, ayudan a controlar la entrada de partículas. El uso de lubricantes con aditivos que mejoran la resistencia a la abrasión, son clave para reducir la fricción y prolongar la vida útil de los equipos[3].

- **Desgaste corrosivo:** El desgaste corrosivo es una combinación de procesos tribológicos y químicos. Ocurre cuando las superficies metálicas reaccionan químicamente con agentes corrosivos presentes en el ambiente o en los lubricantes. La corrosión debilita la superficie, lo que facilita la remoción de material por la fricción y el desgaste mecánico.

En los sistemas hidráulicos, cajas de transmisión y motores expuestos a ambientes corrosivos, este tipo de desgaste puede llevar a un deterioro rápido de las superficies metálicas, lo que se traduce en una mayor fricción, calentamiento y fallas prematuras.

La selección de lubricantes resistentes a la corrosión, junto con sellos adecuados para evitar la entrada de contaminantes, es crucial para prevenir este tipo de desgaste. El monitoreo regular de la condición de los fluidos, a través de análisis tribológicos, puede detectar la presencia de agentes corrosivos antes de que se produzcan daños significativos[3].

- **Desgaste erosivo:** El desgaste erosivo ocurre cuando un fluido o una corriente de partículas golpean una superficie con suficiente energía como para remover material. Este tipo de desgaste es común en equipos que manejan fluidos con partículas en suspensión, como: bombas, turbinas, tuberías y otros equipos hidráulicos.

En bombas centrífugas, tuberías y conductos de transporte de pulpas o arenas, el desgaste erosivo puede causar perforaciones y la pérdida gradual de material en las superficies expuestas al flujo de partículas. En aplicaciones mineras, es una de las causas más comunes de mantenimiento correctivo.

La resistencia al desgaste erosivo puede mejorarse utilizando revestimientos protectores, materiales más duros o mejorando el diseño de los sistemas para reducir la velocidad de impacto de las partículas. El monitoreo continuo del desgaste mediante análisis de vibraciones y partículas ayuda a detectar y mitigar problemas antes de que se vuelvan críticos[3].

- **Desgaste por Fatiga Superficial:** El desgaste por fatiga superficial es el resultado de la repetida aplicación de cargas sobre una superficie, lo que provoca la formación de grietas y, eventualmente, el desprendimiento de material. Es común en componentes sometidos a cargas cíclicas, como rodamientos, engranajes y ejes.

Este tipo de desgaste es crítico en componentes rotativos, como los engranajes y cojinetes de grandes equipos, donde las cargas cíclicas pueden provocar grietas que eventualmente derivan en fallas catastróficas si no se detectan a tiempo.

La implementación de programas de monitoreo de vibraciones y análisis de partículas puede identificar los signos iniciales de fatiga. Además, el uso de lubricantes con propiedades anti desgaste, y mejoras en el diseño de componentes críticos pueden ayudar a prolongar la vida útil del equipo[3].

6.3.6. Lubricación

La lubricación es un proceso esencial en la ingeniería que consiste en la aplicación de sustancias, como aceites o grasas, con el objetivo de disminuir la fricción y el desgaste entre superficies en movimiento. Existen diferentes tipos de lubricación que facilitan la creación de una barrera efectiva entre las superficies en contacto, lo que no solo reduce la fricción, sino que también minimiza la generación de calor y extiende la vida útil de los componentes involucrados.

La lubricación de superficies, en condiciones ideales, debería centrarse en limitar la fricción exclusivamente a las capas del lubricante, ya sea en estado líquido o bajo condiciones de elastohidrodinámica (EHL). La efectividad de la lubricación en sistemas mecánicos depende de diversos factores críticos, tales como la viscosidad del lubricante, la cantidad aplicada, el método de aplicación y la frecuencia de relubricación. No obstante, persiste la errónea concepción entre algunos técnicos de mantenimiento de que la lubricación se limita únicamente a la aplicación de grasa o aceite, lo que evidencia una comprensión insuficiente de esta técnica.

6.3.7. Película Lubrificante

La película lubricante actúa como un recubrimiento que protege las superficies de dos componentes en movimiento relativo, previniendo el contacto metálico directo y, por ende, disminuyendo el desgaste. Al inicio del funcionamiento, esta película puede presentarse de forma sólida, mientras que durante la operación se compone de múltiples capas de lubricante. La cantidad de capas es mayor en el régimen de lubricación fluida, que se observa a velocidades normales, y se reduce en la lubricación elastohidrodinámica (EHL), la cual se manifiesta bajo condiciones de alta presión.

El espesor de la película lubricante se ve influenciado por la viscosidad del aceite y la velocidad del mecanismo. La interrelación entre estos factores es crucial; un incremento en la viscosidad y la velocidad genera un mayor espesor de la capa lubricante. Dentro de la película lubricante, algunas capas se adhieren firmemente a las superficies en movimiento y en reposo, mientras que las capas intermedias sufren deslizamiento relativo debido a la fuerza de cizalladura que actúa en direcciones opuestas.

La estabilidad de la película lubricante está directamente relacionada con el índice de viscosidad del lubricante. Un elevado índice de viscosidad favorece el mantenimiento del flujo en un régimen laminar, lo cual es esencial para prevenir el deslizamiento de la película sobre la superficie y, de este modo, garantizar la efectividad de la protección proporcionada.

6.3.8. Tipos de Lubricación

El estudio y evolución de la lubricación se remonta a la Revolución Industrial, particularizando en el desarrollo del motor de vapor. En este periodo, se iniciaron los primeros métodos matemáticos, transformando la lubricación de una mera acción a una disciplina formal dentro de la ingeniería. Históricamente, los equipos operaban principalmente con lubricación fluida, lo que generaba pérdidas económicas significativas debido a que no se lograba alcanzar la vida útil prevista para los equipos. Si bien Hersey (1927) propuso la teoría de la lubricación hidrodinámica, evitando el contacto directo y minimizando el desgaste, fue en la década de los cincuenta cuando Dowson y Higginson lograron distinguir de manera precisa entre los elementos de las máquinas que operan bajo condiciones de lubricación fluida y aquellos que funcionan en el régimen de Elastohidrodinámica (EHL). Esta distinción contribuyó al control del desgaste y permitió que los mecanismos alcanzaran su vida útil de diseño. [3]

En la actualidad, se reconocen varios métodos de lubricación, cada uno con características específicas que dependen de factores como la carga, la velocidad y las condiciones operativas:

- **Lubricación Límite:** La lubricación límite ocurre cuando una película lubricante de espesor mínimo se encuentra entre superficies en contacto, sin ser lo suficientemente densa para evitar el contacto entre metales. En esta situación, la película se adhiere a las superficies, permitiendo que las microirregularidades rugosas interactúen directamente. Esta condición es común en circunstancias de alta carga, baja velocidad o en procesos de arranque y parada recurrentes.

Sus características principales son:

- Se presenta cuando las condiciones de operación no permiten la formación de una película continua de lubricante.
- La fricción y el desgaste tienden a ser más altos que en otros regímenes de lubricación.
- Los lubricantes utilizados en la lubricación límite suelen incluir aditivos antidesgaste (AW) o extrema presión (EP), que reaccionan químicamente con las superficies para formar capas protectoras, reduciendo el desgaste causado por el contacto directo[3].

Este método de lubricación es comúnmente utilizado en cojinetes y engranajes que funcionan bajo condiciones de alta carga o durante arranques en frío. Estas situaciones requieren una lubricación eficiente, ya que no se dispone del tiempo suficiente para formar una película lubricante adecuada.

- **Lubricación Mixta:** La lubricación mixta se caracteriza por la interacción de dos mecanismos, por un lado, el contacto parcial entre las superficies y por otro lado la separación parcial mediante una película lubricante.

Sus características principales son:

- Es un régimen intermedio entre la lubricación límite y la lubricación hidrodinámica, donde las superficies están parcialmente separadas.
- En este tipo de lubricación, es importante que el lubricante tenga aditivos antidesgaste y buena capacidad de retener una película lubricante bajo condiciones de carga moderada.
- La fricción en la lubricación mixta es menor que en la lubricación límite, pero mayor que en la hidrodinámica[3].

Se presenta en sistemas con cargas variables, como en cojinetes de baja velocidad o engranajes que operan bajo condiciones fluctuantes de carga y velocidad.

- **Lubricación Hidrodinámica:** La lubricación hidrodinámica se caracteriza por la separación total de las superficies en contacto mediante una película continua de lubricante. Este estado se logra cuando la velocidad relativa entre las superficies y las condiciones operativas favorecen la formación de una película lubricante efectiva, evitando el contacto directo entre los componentes metálicos. Bajo estas condiciones, se produce una notable disminución de la fricción y un desgaste mínimo de los materiales.

Sus características principales son:

- La película lubricante es lo suficientemente gruesa para soportar las cargas aplicadas sin permitir el contacto entre las superficies.
- La fricción se genera únicamente dentro de la película de lubricante, por lo que la resistencia es mucho menor que en la lubricación límite o mixta.
- Es crucial mantener una viscosidad adecuada del lubricante para asegurar que la película permanezca estable bajo diferentes condiciones de carga y velocidad[3].

Este tipo de lubricación es típico en cojinetes lisos y sistemas que operan a altas velocidades, como ejes rotativos y turbinas. En estas aplicaciones, el movimiento continuo y las elevadas velocidades crean condiciones favorables para la formación de una película hidrodinámica.

- **Lubricación Elastohidrodinámica (EHL):** La lubricación elastohidrodinámica (EHL) es una subcategoría de la lubricación hidrodinámica, que se manifiesta en condiciones de altas cargas sobre superficies de contacto reducidas, como en engranajes y rodamientos. En este fenómeno, la presión en la película lubricante es suficiente para inducir la deformación de las superficies de contacto, lo que incrementa su elasticidad. A pesar de las elevadas cargas aplicadas, las superficies permanecen separadas por una delgada película de lubricante. Las características principales de la EHL son:

- La presión extrema en la zona de contacto genera deformaciones elásticas en las superficies metálicas, lo que permite la formación de una película lubricante que separa las superficies.
- La fricción es baja, pero la lubricación elastohidrodinámica requiere lubricantes de alta viscosidad y resistencia a la presión para evitar que la película lubricante se rompa.
- Los aditivos EP son fundamentales para este tipo de lubricación, ya que ayudan a prevenir el contacto metal-metal incluso bajo cargas extremas[3].

La EHL (Elastohydrodynamic Lubrication) es prevalente en sistemas que operan bajo condiciones de alta carga y velocidad, como engranajes de transmisión automotriz, rodamientos y ejes de turbinas. Una lubricación eficiente en estos sistemas es esencial para evitar el desgaste prematuro y la posible falla de los componentes. Esto es particularmente crítico en escenarios con cargas variables y altas velocidades, donde la integridad de los elementos mecánicos puede verse amenazada sin una adecuada película de lubricante.

6.3.9. Selección de Lubricantes

La selección adecuada del lubricante es esencial para asegurar la eficacia de los sistemas de lubricación, lo que permite alcanzar la vida útil prevista del equipo y la disponibilidad esperada por las empresas. Esto contribuye a la reducción de pérdidas económicas derivadas de la inactividad y, en muchos casos, del lucro cesante asociado a la detención de los equipos.

En los manuales de mantenimiento y uso de equipos, los fabricantes especifican la selección de lubricantes, detallando el tipo, características, marcas recomendadas y viscosidades según la temperatura de operación. No obstante, es esencial que el personal de mantenimiento adquiera conocimientos sobre la correcta selección de lubricantes, particularmente al actualizar los planes de lubricación. Asimismo, deben ser competentes en la determinación del lubricante adecuado para cada componente, en situaciones donde la información específica no esté disponible.

La selección de lubricantes debe llevarse a cabo considerando múltiples factores que afectan su rendimiento y la capacidad de protección de los componentes.

Entre los factores más relevantes a considerar se incluyen:

- **Tipo de Superficies:** Superficies metálicas, plásticas o cerámicas requieren diferentes tipos de lubricantes. Los materiales también influyen en la selección de aditivos.
- **Carga Aplicada:** En sistemas de alta carga, los lubricantes deben tener buena resistencia a la presión y contener aditivos EP (extrema presión) que prevengan el contacto directo entre las superficies. Estos aditivos reaccionan químicamente con las superficies para formar una película protectora.
- **Velocidad de Operación:** A velocidades bajas, es más probable que ocurra lubricación límite, por lo que es necesario un lubricante con una película más resistente. A velocidades altas, la lubricación hidrodinámica es más efectiva, y se requieren lubricantes con viscosidades adecuadas para mantener la película estable a altas velocidades.

- **Condiciones Ambientales:** Factores como la temperatura, humedad, y la exposición a contaminantes afectan el rendimiento del lubricante. En condiciones de alta temperatura, los lubricantes deben tener un alto índice de viscosidad y resistencia a la oxidación.
- **Aditivos:** Los aditivos desempeñan un papel esencial en el rendimiento de los lubricantes. Los aditivos antidesgaste (AW), extrema presión (EP), y antioxidantes ayudan a mejorar la resistencia de la película lubricante, reducen el desgaste y previenen la oxidación del lubricante bajo condiciones severas[3]. Dentro de los aditivos mas importantes se encuentran:
 - **Aditivos Extrema Presión (EP):** Estos aditivos son esenciales en aplicaciones de alta carga, como engranajes y cojinetes. Los aditivos EP reaccionan con las superficies metálicas bajo alta presión y temperatura, formando una película protectora que reduce el contacto metal-metal.
 - **Aditivos Antidesgaste (AW):** Estos aditivos actúan formando una capa protectora sobre las superficies, reduciendo el desgaste bajo cargas moderadas y evitando el contacto directo entre metales.
 - **Aditivos Antioxidantes:** Se utilizan para prevenir la oxidación del lubricante, lo que puede ocurrir a altas temperaturas. Los antioxidantes prolongan la vida útil del lubricante al evitar la formación de ácidos y depósitos en las superficies lubricadas.

Por otro lado y en adición, la selección adecuada del lubricante requiere comprender las diferencias fundamentales entre "Máquina Industrial" y "Máquina Automotriz". Si bien, se pueden homologar ciertos lubricantes entre estas categorías, la utilización de un fluido SAE diseñado para aplicaciones automotrices en maquinaria industrial podría ser inadecuada y perjudicial para la durabilidad del equipo.[3]

Por lo tanto:

- **Maquina Industrial:** “Maquina en la cual ninguno de sus componentes esta expuesto a un proceso de combustión interna con un combustible, como es el caso de reductores de velocidad, compresores, motores eléctricos, etc, por lo tanto los aceites a utilizar deben ser especificación ISO”[2].

- **Maquina Automotriz:** “Maquina en la cual algunos de sus componentes están sometidos a un proceso de combustión interna de un combustible, como es el caso de los cilindros, pistones, anillos y válvulas de los motores Diésel, gasolina y gas; o están relacionados con este proceso como es el caso del diferencial y transmisión de un camión, bus, etc, por lo tanto los aceites a utilizar deben ser especificación SAE” [2].

6.3.10. Selección de Fluidos para Maquinas Industriales:

Para la selección de lubricantes industriales, es fundamental seguir las recomendaciones del fabricante del equipo. A diferencia de las máquinas automotrices, es necesario adoptar el sistema internacional ISO. Este enfoque no solo facilita la correcta elección del lubricante, sino que, en muchos casos, permite optar por aceites de grado ISO, los cuales son entre 1,5 y 2 veces más económicos que sus equivalentes en otros sistemas de clasificación. [3]

La Organización Internacional de Normalización (ISO) estableció en 1975 un sistema para la especificación de la viscosidad de aceites industriales, con el objetivo de facilitar la selección del grado de viscosidad adecuado. No obstante, su adopción por parte de los fabricantes de lubricantes no se generalizó hasta 1979. Este sistema clasifica los aceites industriales según su viscosidad, la cual se mide en centistokes (cSt) a 40°C, utilizando un número estándar que se incluye al final del nombre del producto. La implementación de este sistema contribuye a minimizar el riesgo de errores en la selección del aceite apropiado o en la mezcla de lubricantes de distintas viscosidades.

En la tabla siguiente 21, se presentan los grados ISO junto a sus respectivas medidas máximas y mínimas, las cuales generalmente corresponden al 10 % de cada grado. Es importante destacar que los grados ISO varían entre 2 y 68; a partir del grado 10, se incorporan uno o dos ceros para alcanzar el grado 1500.[3]

Grado ISO	Límites de viscosidad							
	cSt/40°C		cSt/100°C		SSU/100°F		SSU/210°F	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
2	1,98	2,42			32,8	34,4	-	-
3	2,88	3,52			36,0	38,2	-	-
5	4,14	5,06			40,4	43,5	-	-
7	6,12	7,48			47,2	52,0	-	-
10	9,00	11,00			57,6	65,3	34,6	35,7
15	13,50	16,50			75,8	89,1	37,0	38,3
22	19,80	24,20			105,0	126,0	39,7	41,4
32	28,80	35,20			149,0	182,0	43,0	45,0
46	41,40	50,60			214,0	262,0	47,1	49,9
68	61,20	74,80			317,0	389,0	52,9	56,9
100	90,00	110,00			469,0	575,0	61,2	66,9
150	135,00	165,00			709,0	871,0	73,8	81,9
220	198,00	242,00			1047,0	1283,0	90,4	101,0
320	288,00	352,00			1533,0	1881,0	112,0	126,0
460	414,00	506,00			2214,0	2719,0	139,0	158,0
680	612,00	748,00			3298,0	4048,0	178,0	202,0
1000	900,00	1100,00			4864,0	5975,0	226,0	256,0
1500	1350,00	1650,00			7865,0	9079,0	291,0	331,0

Figura 21: Grados viscosidad ISO

Fuente: Seminario Tribología y Lubricación

Los fabricantes de maquinaria industrial especifican el tipo de lubricante y su viscosidad conforme a estándares como SAE, ASTM o AGMA. Para determinar la equivalencia de dichos lubricantes en el sistema ISO, se sugiere la consulta de tablas de conversión, las cuales permiten la comparación y el ajuste de los grados de viscosidad entre los distintos estándares.

A continuación, se presentan tablas que optimizan la ejecución de estas conversiones de manera práctica:

Grado ISO	Grado ASTM	Grado AGMA	Grado SAE			
			Motor		Engranajes	
			Unigrado	Multigrado	Unigrado	Multigrado
10						
15	75					
22	105		0w, 5w		75W	
32	150		10w			
46	215	1	10, 15w			
68, 68EP	315	2, 2EP	20w, 20	10w30, 20w20	80, 80w	
100, 100EP	465	3, 3EP	25w, 30	5w50, 15w40		
150, 150EP	700	4, 4EP	40	15w50, 20w40		
220, 220EP	1000	5, 5EP	50		90	85w90
320, 320EP	1500	6, 6EP				85w140
460, 460EP, 460C	2150	7, 7EP, 7C			140	
680, 680EP, 680C	3150	8, 8EP, 8C				
1000, 1000EP, 1000C	4650	9, 9EP, 9C				
1500, 1500EP, 1500C	7000	10, 10EP, 10C			250	

Figura 22: Conversión de viscosidades en diferentes normas.

Fuente: Seminario Tribología y Lubricación

6.3.11. Selección de Fluidos para Maquinas Automotrices:

Las máquinas automotrices constituyen una interconexión sinérgica de subsistemas que ejecutan funciones específicas, tales como: el transporte de cargas, la operación de implementos y, en ciertos casos, la capacidad de vuelo. Este informe enfatiza la importancia de los subsistemas críticos que requieren lubricación, incluyendo la unidad de potencia, compuesta por motores de combustión interna, así como los conjuntos de engranajes encargados de transmitir la potencia generada a su punto de aplicación. La lubricación adecuada es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento y la eficiencia operativa de estos sistemas.

Por consiguiente, se establece que:

- **Motores de Combustión:** El motor es un componente esencial de un vehículo, constituido por múltiples piezas que sufren fricción. Sin lubricación adecuada, estas fricciones pueden perjudicar el funcionamiento del motor, elevar los costes operativos y dar lugar a reparaciones anticipadas y costosas. Esto no solo supone un gasto significativo, sino también la inaccesibilidad del vehículo. Los motores pueden ser impulsados por gasolina, diésel o gas; el último es mecánicamente similar al motor de gasolina, pero utiliza gas como combustible. El sistema de lubricación en un motor de combustión interna de cuatro tiempos utiliza una bomba de engranajes; ésta extrae el aceite del cárter, que generalmente se encuentra en la parte inferior de la mayoría de los motores, lo filtra y lo distribuye a diferentes áreas del motor que requieren lubricación. Además de lubricar los componentes móviles, el aceite tiene un papel importante en la limpieza del motor, eliminando subproductos de la combustión como hollín, combustible no quemado, lacas, lodos y partículas de carbono. Esto es gracias a los aditivos detergentes y dispersantes presentes en el aceite, que mantienen estos contaminantes en suspensión hasta que pueden ser filtrados. Un aceite de motor de baja calidad o con un paquete de aditivos detergentes-dispersantes inadecuado no podrá mantener limpias las áreas entre anillos y ranuras del pistón, lo que resultará en pérdida de potencia del motor, un aumento en el consumo de combustible, desgaste prematuro de varias partes del motor y un incremento sustancial en los costes de mantenimiento.[3] Por ello, es crucial que los lubricantes para estos motores cumplan con las especificaciones de grado SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices) y el nivel de calidad API (Instituto Americano del Petróleo).

- Grado SAE Para MCI:** " El grado SAE de un aceite para motores de combustión interna indica únicamente cómo se comporta el aceite a ciertas temperaturas, sin relación directa con su calidad, contenido de aditivos, rendimiento o tipo de aplicación. Cada motor requiere una viscosidad específica"[3]. A diferencia de la norma ISO, que clasifica viscosidades a 40 °C, la SAE utiliza como referencia los 100 °C y divide el rango de viscosidades en intervalos de múltiplos de 10 hasta el 50. Además, incorpora grados "W"(de winter, invierno) para identificar lubricantes que conservan su viscosidad en climas fríos. La SAE también ha adoptado la clasificación de aceites multigrados, que especifican dos grados de viscosidad: uno para temperaturas frías y otro para condiciones de operación a mayor temperatura.

Grado de Viscosidad SAE	Viscosidad a Baja Temperatura (°C) , cP		Viscosidades en alta temperatura (°C)		
	Máx. Arranque	Máx. de Bombeo (Sin esfuerzo)	Cinemática (cSt) a 100°C min.	Cinemática (cSt) a 100°C máx.	Alta Tasa de Corte (cP) a 150°C D4683, D4741 y D5481
0W	6 200 a -35	60 000 a -40	3,8	-	-
5W	6 600 a -30	60 000 a -35	3,8	-	-
10W	7 000 a -25	60 000 a -30	4,1	-	-
15W	7 000 a -20	60 000 a -25	5,6	-	-
20W	9 500 a -15	60 000 a -20	5,6	-	-
25W	13 000 a -10	60 000 a -15	9,3	-	-
20	-	-	5,6	< 9,3	2,6
30	-	-	9,3	<12,5	2,9
40	-	-	12,5	<16,3	3,5 (0W-40, 5W-40, 10W-40)
40	-	-	12,5	<16,3	3,7 (15W-40, 20W-40, 25W-40, 40)
50	-	-	16,3	< 21,9	3,7
60	-	-	21,9	< 26,1	3,7

Figura 23: Clasificación de viscosidad SAE J-300-09

Fuente: <https://prodimsa.com/asistencia-tecnica/preguntas-frecuentes-faq/viscosidad-sae/>

- Nivel de Calidad API para MCI:** " La API (Instituto Americano del Petróleo), tiene estandarizados los diferentes niveles de calidad de los aceites para lubricación de motores a gasolina y Diesel. Estas especificaciones de calidad son el complemento indispensable que debe acompañar a la viscosidad en el sistema SAE.Un aceite para servicio automotriz no quedará bien seleccionado si no se tiene en cuenta tanto el grado SAE como el nivel de calidad API."[3]

Desarrollo y Vigencia de las Clasificaciones API							
Motores a Gasolina				Motores a Diesel			
Categoría	Año Lanzado	Duración	Vigencia	Categoría	Año Lanzado	Duración	Vigencia
SA	1900	30 años	Obsoleto	CA	1900	30 años	Obsoleto
SB	1930	34 años	Obsoleto	CB	1930	25 años	Obsoleto
SC	1964	4 años	Obsoleto	CC	1955	24 años	Obsoleto
SD	1968	4 años	Obsoleto	CD	1979	9 años	Obsoleto
SE	1972	8 años	Obsoleto	CE	1988	3 años	Obsoleto
SF	1980	9 años	Obsoleto	CF	1991	2 años	Obsoleto
SG	1989	6 años	Obsoleto	CF-4	1993	2 años	Obsoleto
SH	1992	2 años	Obsoleto	CG-4	1995	4 años	Obsoleto
SJ	1997	4 años	Obsoleto	CH-4	1999	Actual	Vigente
SL	2001	Actual	Vigente	CI-4	2002	Actual	Vigente
SM	2005	Actual	Vigente	CJ-4	2005	Actual	Vigente
SN	2010	Actual	Vigente	CK-4	2017	Actual	Vigente
				FA-4*	2017	Actual	Vigente

* Aceites de baja viscosidad y bajo HTHS para ciertos motores a partir del 2017
[Widman International SRL](http://www.widman.biz) www.widman.biz

Figura 24: Normas API para la calidad de los aceites.

Fuente: American Petroleum Institute-API

El detalle de cada una de estas normas de calidad, se puede encontrar fácilmente dentro de la pagina oficial del American Petroleum Institute, incluyendo información del porque queda obsoleta, cual es su remplazo directo etc.

Finalmente, los aspectos clave para la adecuada selección del aceite lubricante en un motor de combustión interna se resumen a continuación:

1. Siempre utilizar grado SAE recomendado por el fabricante. Si no se cuenta con esta información, se debe seleccionar según la temperatura ambiental donde opera el vehículo, esta información es extraída de tablas como la siguiente:

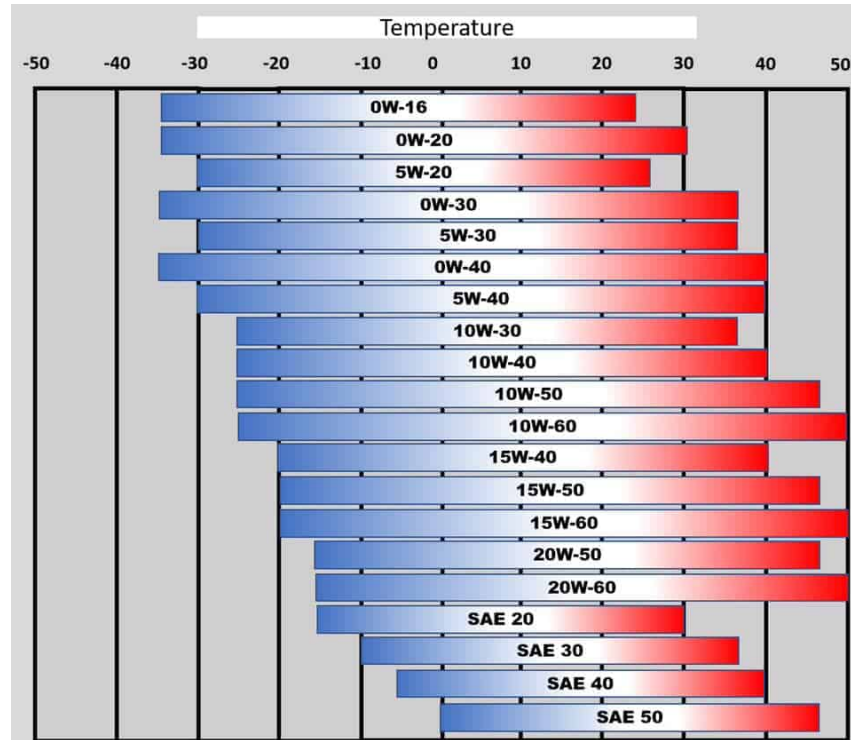


Figura 25: Grados de viscosidad SAE según temperatura ambiental de operación

Fuente: Sociedad de Ingenieros Automotrices

2. Utilizar como mínimo grado API recomendado por el fabricante, o en su defecto grado mas alto que sea el recomendado por American Petroleum Institute y que cumpla con las especificaciones del grado original.
3. Siempre utilizar aceite del mismo grado API y SAE, si se desea cambiar de marca, se debe asegurar que sea completamente equivalente.
4. En motores en muy mal estado mecánico, se ha demostrado una mejor eficiencia de aceites SAE mono grados que multigrados, dado que los lubricantes monogrados contienen menor cantidad de detergentes y dispersantes, lavando en menor medida los residuos de combustión que ayudan a la compresión del motor.
5. Nunca mezclar aceites de diferentes marcas.[3]

- **Engranajes Automotrices:** Los engranajes automotrices son elementos esenciales en la ingeniería vehicular, diseñados para transmitir y adaptar la potencia generada por el motor hacia diversos sistemas del vehículo, optimizando la velocidad y el par en función de las exigencias operativas. Forman parte integral de sistemas críticos, como cajas de cambios sincronizadas, transmisiones automáticas y diferenciales axiales. Su función principal es garantizar una transferencia de potencia eficiente, manteniendo la relación de velocidad adecuada, lo que permite un desempeño óptimo del vehículo en diversas condiciones de carga y velocidad.

En los sistemas de transmisión por engranajes, los lubricantes desempeñan roles esenciales. Además de minimizar la fricción y prevenir el desgaste, estos fluidos protegen los componentes contra la corrosión generada por contaminantes. Asimismo, inhiben la formación de depósitos o lodos resultantes de la oxidación del fluido a altas temperaturas, regulan la generación de espuma y aseguran la integridad de sellos y empaquetaduras, evitando fugas y pérdidas de presión en el sistema.

Los lubricantes para engranajes automotrices, al igual que los aceites de motor, se clasifican según su viscosidad en el sistema SAE. A diferencia de los aceites de motor, los lubricantes para engranajes, similares a los industriales, no requieren dispersantes ni detergentes, dado que su presencia no es esencial para el óptimo funcionamiento de los engranajes. La diferencia fundamental entre los lubricantes automotrices e industriales reside en la naturaleza y cantidad de aditivos, lo que permite a los aceites automotrices mantener su eficacia en condiciones operativas severas.

Estos aceites, también deben cumplir con grado SAE y Nivel de calidad API. [3]

- **Grado SAE para Sistemas de Engranajes:** " Los aceites SAE para engranajes automotrices, se clasifican en monogrados y multigrados ya establecidos en la norma J306, para los aceites monogrados, que corresponde con la DIN 51512, y la SAE J306C para los aceites multígrados.

<i>Monogrados</i>	<i>Multigrados</i>	<i>Viscosidad cinemática cSt/100°C</i>	<i>Temperatura ambiente máxima de bombeo °C</i>	<i>Temperatura ambiente máxima de trabajo °C</i>
<i>70W</i>		<i>4,1 hasta 4,4</i>	<i>- 40° hasta -10°</i>	
<i>75W</i>		<i>4,1 hasta 4,4</i>	<i>- 35° hasta -10°</i>	
<i>80W</i>		<i>7,0 hasta 9,4</i>	<i>- 30° hasta -10°</i>	
<i>85W</i>		<i>11,0 hasta 13,0</i>	<i>- 25° hasta -10°</i>	
<i>80</i>		<i>8,6 hasta 11,3</i>		<i>- 20° hasta -10°</i>
<i>90</i>		<i>13,5 hasta 24,0</i>		<i>- 10° hasta 32°</i>
<i>140</i>		<i>24,0 hasta 41,0</i>		<i>Mayor de 25° hasta 46°</i>
<i>250</i>		<i>41,0 hasta 60,0</i>		<i>Mayor de 46°</i>
	<i>75W90</i>	<i>14,5 hasta < 16,5</i>		<i>Desde - 42° hasta 32°</i>

Figura 26: Aceites SAE monogrados y multigrados para engranajes automotrices

Fuente: Seminario Tribología y Lubricación

- **Calidad API para Sistemas de Engranajes:** " La clasificación API (Instituto Americano del Petróleo) para aceites de engranajes automotrices está determinada por su tipo y la condición operativa, que puede ser hidrodinámica o EHL. La especificación API se denota con las letras GL (Gear Lubricant) seguidas de un número del 1 al 6." [3] Estas categorías se pueden consultar en el sitio web oficial del Instituto Americano del Petróleo o en tablas como la que se muestra en la imagen numero 27.

Por su parte, algunos fabricantes de sistemas de engranajes, han dispuesto sus propios estándares de calidad similares a las especificaciones API, entre los que destacan:

- Caterpillar con sus normas TO-2 y TO-4.
- Mercedes Benz con sus normas DB 236.6.
- Volkswagen con la norma TL 52726.
- Ford con su norma ESP-M2C166-H.
- Allison con su norma C-4.

Sin embargo, los aspectos más relevantes para la selección adecuada del aceite lubricante en sistemas de engranajes de máquinas automotrices se resumen en los siguientes puntos:

1. Siempre utilizar grado SAE recomendado por el fabricante. Si no se cuenta con esta información, se debe seleccionar según la temperatura ambiental donde opera el vehículo, esta información es extraída de tablas en la figura numero 25.

2. Utilizar como mínimo grado API recomendado por el fabricante, o en su defecto grado mas alto que sea el recomendado por American Petroleum Institute y que cumpla con las especificaciones del grado original.
3. Siempre utilizar aceite del mismo grado API y SAE, si se desea cambiar de marca, se debe asegurar que sea completamente equivalente.

CLASIFICACIÓN	TIPO DE SERVICIO	CARACTERÍSTICAS
GL-1	Servicio poco severo bajo condiciones normales. Engranajes cilíndricos y cónicos con cargas ligeras y uniformes (transmisiones, diferenciales, tornillos sin fin). Obsoleto	Aceite mineral sin aditivos EP. Pueden tener antioxidantes y antiespuma.
GL-2	Condiciones severas de carga. Engranajes de tornillo sin fin y corona cuando no es suficiente GL-1. Obsoleto	Sin aditivos EP. Contiene aditivos de antidesgaste o de densidad.
GL-3	Condiciones severas de cargas. Cajas de cambio manuales y diferenciales con engranajes cónicos. Obsoleto	Poca cantidad de aditivos EP. Con aditivos antidesgaste.
GL-4	Diferenciales con engranajes cónicos espirales e hipoides (transmisiones manuales sincronizadas, diferenciales con engranajes hipoides y pequeños ejes). (Sustituye a GL-1, GL-2 y GL-3)	Prestaciones EP medias. Satisfacen la norma MIL-L-2105.
GL-5	Para condiciones muy severas y cargas variables. Diferenciales con engranajes hipoides y grandes ejes. No cambios sincronizados (no sule a GL-4)	Extrema presión (prestaciones EP elevadas). Satisfacen norma: MIL-L-2105-D.
GL-6	Diferenciales hipoides con grandes distancias entre ejes de la corona y del piñón. Obsoleto	Cumplen la norma FORD ESW M2 C.105 A.
MT-1	Cajas de cambio manual no sincronizadas que trabajen con servicio muy severo. (Autobuses y camiones de servicio pesado). Brindan protección contra la combinación de degradación térmica, desgaste de los componentes y deterioro del sello de aceite, algo que no proporcionan los lubricantes que cumplen únicamente con los requisitos de API GL-4 y API GL-5. Menor oxidación y mayor vida útil que un GL-4 o GL-5.	No cubiertas por lubricantes que cumplen GL-1 al GL-5. Mejor estabilidad térmica y mayor vida útil.

Figura 27: Clasificación calidad API lubricantes de engranajes

Fuente: Ing. Juan Carlos Mirada R

6.4. Mantenimiento Predictivo, Análisis y Límites Condensatorios

Dado que el mantenimiento predictivo constituye un componente esencial en este proyecto, su comprensión profunda es crucial para garantizar su continuidad y eficacia. El análisis de fluidos se destaca como el segundo pilar clave de este trabajo de título, ya que facilita la evaluación del estado de los equipos y la detección de condiciones de falla incipientes, optimizando así la planificación de las intervenciones de mantenimiento.

6.4.1. Mantenimiento Predictivo

El Mantenimiento Predictivo es una estrategia fundamental dentro del mantenimiento basado en condiciones, cuyo objetivo es maximizar la vida útil de los equipos mediante la identificación temprana de fallas potenciales, antes de que se conviertan en problemas críticos. Esto posibilita intervenciones planificadas y anticipadas de manera precisa. A diferencia del Mantenimiento Preventivo, que se rige por un calendario fijo de revisiones, el Mantenimiento Predictivo se apoya en la evaluación en tiempo real del estado de los equipos mediante el monitoreo continuo de variables específicas. Este enfoque proactivo permite anticipar fallas, reducir paradas no programadas y mejorar tanto la disponibilidad como la fiabilidad de los equipos.

La principal diferencia entre el mantenimiento predictivo y el preventivo radica en las variables que se observan: mientras que el mantenimiento preventivo se centra en señales externas y visibles de desgaste, el predictivo analiza parámetros internos, a menudo imperceptibles, que pueden anticipar problemas antes de que se manifiesten. La evaluación detallada es especialmente valiosa en equipos críticos, donde una falla inesperada podría generar costos significativos, tanto operativos como financieros.

La implementación del mantenimiento predictivo requiere la integración de tecnología avanzada y personal especializado en la interpretación de datos complejos, así como en el uso de herramientas de monitoreo, como sensores y sistemas de análisis en tiempo real. A pesar de que la inversión inicial es mayor en comparación con el mantenimiento preventivo, los beneficios incluyen la obtención de datos precisos y confiables, propiciando una gestión más eficiente de los activos y optimizando el rendimiento, lo que se traduce en una reducción de los costos operativos a largo plazo. John Moubrey define una "falla potencial" como una condición identificable que anticipa

una futura falla funcional. La identificación de estas fallas potenciales permite estimar el tiempo restante de vida útil, facilitando así la planificación óptima de reparaciones o reemplazos antes de que ocurra una falla irreversible.

Históricamente, el mantenimiento de equipos se basaba en la percepción sensorial humana para identificar signos de desgaste, lo que limitaba su efectividad debido a la subjetividad inherente. Las tecnologías actuales permiten diagnósticos fundamentados en parámetros medibles y un monitoreo continuo, proporcionando información detallada de manera económica y confiable. Estas herramientas resultan especialmente eficaces al detectar fallas que se manifiestan mediante cambios sutiles en el comportamiento del equipo, lo que minimiza el riesgo de deterioro significativo y reduce el impacto de interrupciones operativas.

En el contexto del mantenimiento basado en condiciones, las estrategias predictivas y proactivas son fundamentales. El mantenimiento predictivo se enfoca en identificar condiciones de falla a través del monitoreo de variables físicas, que indican el desgaste irreversible de los componentes. En contraste, el mantenimiento proactivo se orienta a prevenir dicho desgaste desde su origen. La implementación del mantenimiento predictivo facilita la programación adecuada del reemplazo o restauración de componentes antes de que se produzcan fallas críticas. Esto contribuye a mitigar las repercusiones de interrupciones inesperadas, optimizando la gestión de recursos y reduciendo la necesidad de reparaciones de emergencia.

Entre las técnicas de monitoreo predictivo más comunes se destacan el análisis de vibraciones, el monitoreo térmico y el análisis de aceite, siendo este último particularmente eficaz para evaluar el desgaste y la contaminación en componentes críticos. En el siguiente apartado se analizarán estas técnicas en detalle, con énfasis en el análisis de aceite, dado su papel crucial en la predicción de fallas en sistemas lubricados.

6.4.2. Termografía

La Termografía Infrarroja es una técnica avanzada que permite medir y visualizar temperaturas superficiales con gran precisión y sin contacto directo. Esta técnica utiliza la física de la radiación infrarroja para convertir las mediciones de radiación en valores de temperatura, lo que se logra mediante la captación de la energía emitida en el espectro infrarrojo por la superficie del objeto, transformándola en señales eléctricas interpretables.

Dado que la radiación infrarroja emitida por los objetos no es visible al ojo humano, las cámaras termográficas utilizan sensores infrarrojos especializados, capaces de "ver" en esas longitudes de onda invisibles. Así, es posible medir la energía radiante emitida por las superficies y obtener la temperatura en tiempo real y a distancia, lo que proporciona una herramienta invaluable en la evaluación de condiciones térmicas sin necesidad de contacto físico.

La termografía infrarroja es una tecnología rentable y ofrece datos de alto valor para la industria, por lo que su uso es altamente recomendable en múltiples sectores. Algunas de sus aplicaciones más destacadas incluyen:

- **Detección de fugas de calor** y entradas no deseadas de energía en sistemas termodinámicos, como calderas y unidades de refrigeración (chillers).
- **Identificación de fugas de corriente** y sobrecargas en componentes eléctricos, tales como interruptores y transformadores, previniendo fallos y asegurando la seguridad.
- **Localización de puntos de sulfatación** o de falta de apriete en tableros eléctricos, lo cual puede prevenir problemas graves de funcionamiento.
- **Identificación de sobrecalentamientos** en componentes mecánicos específicos, como chumaceras, rodamientos y equipos en movimiento constante, anticipando desgastes o fallas.
- **Detección de fugas de agua** en tuberías o estructuras, permitiendo intervenciones rápidas y eficaces.
- **Identificación de obstrucciones internas en tuberías** o conductos, facilitando el mantenimiento y la reparación de los sistemas.

6.4.3. Análisis de Vibraciones

El Análisis de Vibraciones constituye una técnica fundamental en el mantenimiento predictivo de maquinaria rotativa. Esta metodología facilita el diagnóstico del estado operativo de las máquinas y sus componentes en condiciones normales de funcionamiento dentro de una planta de producción. Su aplicación es prevalente para la detección de fallas potenciales, lo cual permite prevenir impactos negativos en el rendimiento productivo.

Mediante el análisis de vibraciones, es posible evaluar el estado de cada componente del equipo, lo que facilita la programación de actividades de mantenimiento necesarias sin interrumpir el funcionamiento. Todas las máquinas generan vibraciones como parte natural de su operación; no obstante, cuando un componente comienza a experimentar fallas, las características de dichas vibraciones se alteran. Un análisis detallado permite identificar tanto el tipo de falla como su ubicación. Este enfoque optimiza la reparación y garantiza un mantenimiento oportuno.

El análisis de vibraciones implica la interpretación de señales vibratorias generadas por equipos. Este proceso requiere instrumentos de inversión moderada y personal altamente capacitado para la correcta interpretación de los datos obtenidos.

Algunas de las fallas más comunes que se pueden detectar en máquinas rotativas mediante esta tecnología incluyen:

- **Desbalanceo:** Vibraciones anormales causadas por una distribución desigual de masa en el sistema rotativo.
- **Desalineamiento:** Falta de alineación adecuada entre ejes o componentes conectados.
- **Defectos en rodamientos:** Problemas en los rodamientos que generan vibraciones específicas, indicando desgaste o daños.
- **Ejes torcidos:** Ejes con deformaciones que afectan el equilibrio y el funcionamiento de la máquina.
- **Desajuste mecánico:** Componentes sueltos o desgastados que provocan movimientos inusuales.

- **Defectos en engranajes:** Problemas en el engranaje que producen vibraciones específicas, señalando fallas en la transmisión..

6.4.4. Análisis de Fluidos

El análisis de laboratorio de aceites lubricantes constituye una herramienta esencial en el mantenimiento predictivo, dado que permite evaluar la condición del lubricante y el estado del equipo. Los análisis realizados a aceites en servicio proporcionan información clave sobre el estado del lubricante y sus componentes[3]. Esta evaluación temprana es esencial para la detección de desgastes, contaminaciones y pérdidas de propiedades del lubricante, lo cual es vital para asegurar la eficiencia y prolongar la vida útil de los equipos. No obstante, se revela que la “falta de puntualidad en los resultados, la realización de pruebas incompletas y el análisis inadecuado de los datos” son factores que frecuentemente conducen al fracaso de estos programas[3].

El objetivo principal de los análisis de aceite es evaluar las características fisicoquímicas, así como los niveles de contaminación y desgaste, lo que permite identificar el momento oportuno para realizar intervenciones de mantenimiento. Estos análisis son esenciales para detectar contaminantes como agua, partículas sólidas y combustibles, empleando normas reconocidas como ASTM D95 para la detección de agua y ASTM D92 para combustibles [3]. Igualmente, se complementan con la medición del desgaste de los componentes. La espectrofotometría de emisión atómica y la ferrografía son técnicas utilizadas para determinar la presencia y tipo de partículas desgastadas, lo cual resulta fundamental para anticipar posibles fallas [3].

En el análisis de características físico químicas del aceite, se consideran propiedades como la viscosidad, índice de acidez (TAN), el índice de basicidad (TBN) y el contenido de sólidos, entre otros parámetros críticos. Cada propiedad debe ser evaluada en función de su relevancia para la aplicación específica del aceite.

El análisis de desgaste, por otro lado, es esencial, ya que permite identificar la presencia de partículas metálicas, lo que indica el desgaste interno de los componentes lubricados. La implementación de técnicas como la espectrofotometría y la ferrografía posibilita la identificación del tipo y morfología de las partículas, información crucial para evaluar la gravedad del desgaste [3].

A continuación, se presentan los elementos y propiedades que serán objeto de monitoreo en el presente proyecto:

- **Viscosidad:** Es el principal parámetro que se mide y considera el principal indicador de rendimiento y eficiencia del lubricante en diferentes equipos y componentes. La viscosidad es la medida de la resistencia de un fluido a escurrir. En el caso de los lubricantes la viscosidad determina la capacidad de este, en generar una película adecuada entre las superficies en movimiento, reduciendo la fricción y el desgaste. Una viscosidad demasiado baja no garantiza una lubricación efectiva, mientras que una viscosidad excesivamente alta puede incrementar la resistencia al flujo, comprometiendo la lubricación adecuada y afectando la eficiencia energética del sistema. Es por esto, que el aceite debe mantener una viscosidad relativamente constante durante toda su vida útil. Los cambios de viscosidad puede indicar problemas potenciales en el sistema, como: contaminación, oxidación, dilución con combustible u otros fluidos, degradación al exponerse a altas temperaturas, entre otros. En la figura numero 47, contenida dentro de los anexos, se especifica con mayor detalle las posibles causas de los cambios de viscosidad en los lubricantes, junto a esto sus consecuencias y acciones para su corrección.

- **Acidez y Basicidad:** Los números TAN (Total Acid Number) y TBN (Total Base Number) son conocidos como números de neutralización y se utilizan para monitorear la tendencia al agotamiento de aditivos en el aceite, como el ZDDP, detergentes e inhibidores de corrosión. Mientras que el TAN mide el nivel total de ácidos débiles, potencialmente corrosivos, disueltos en el aceite, el TBN evalúa la reserva alcalina en el paquete de aditivos. El monitoreo de ambos es crucial para evaluar la condición del aceite y prevenir el desgaste en los equipos.
 - **TAN (Total Acid Number):** Es una medida que indica la concentración de ácidos disueltos en el aceite y se utiliza para monitorear la degradación o envejecimiento del lubricante. El TAN de un aceite nuevo se compone de la acidez de la base (aproximadamente el 20%) y de la acidez proveniente de los aditivos (aproximadamente el 80%, principalmente de los aditivos antidesgaste). Representa la cantidad de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) necesarios para neutralizar un gramo de aceite. Este ensayo se realiza mediante titulación, con una incertidumbre de hasta 0.3 puntos.

En aceites con alto contenido de aditivos, el TAN puede disminuir inicialmente debido al consumo de los aditivos, pero después de un punto de inflexión, tiende a aumentar debido a la acumulación de ácidos producto de la oxidación. En aceites minerales, el valor inicial del TAN suele estar entre 0.1 y 0.3, mientras que en aceites sintéticos puede alcanzar hasta 1.5. Como norma, se considera una alerta cuando el TAN aumenta entre un 20 % a 40 %, sobre el valor inicial, y una alarma cuando se duplica el valor inicial, ya que altos niveles de acidez en presencia de agua pueden incrementar el potencial corrosivo.

- **TBN (Total Base Number):** Indica la reserva alcalina del paquete de aditivos del aceite, no de la base del mismo. Este número evalúa la capacidad de los aditivos para neutralizar ácidos generados tanto por la oxidación del aceite como por la combustión, principalmente ácidos sulfúrico y sulfuroso derivados del azufre en el combustible. Estos ácidos tienen la capacidad de provocar corrosión en las superficies metálicas, causando desgaste corrosivo. El ensayo del TBN mide los miligramos de ácido clorhídrico necesarios para neutralizar un gramo de aceite con reserva alcalina, indicando así la capacidad del lubricante para proteger contra la corrosión.

El TAN y el TBN son indicadores complementarios en el análisis de la calidad del aceite lubricante:

- Un TAN alto puede indicar oxidación avanzada, contaminación por productos de combustión o desgaste, lo cual sugiere que el aceite está llegando al final de su vida útil, esto puede ocasionar corrosión y desgaste, si no se reemplaza.
- Un TBN alto refleja una mayor capacidad del aceite para neutralizar ácidos y, por tanto, una mayor resistencia a la oxidación, prolongando la vida útil del lubricante. Sin embargo, la disminución del TBN a lo largo del tiempo señala una acumulación de ácidos, indicando oxidación y desgaste en el equipo.

El equilibrio entre el Índice de Acidez Total (TAN) y el Índice de Base Total (TBN) es crucial para asegurar la eficacia del lubricante en condiciones operativas y para evitar fallas en los componentes del motor o equipo. En la imagen 49, que se encuentra en los anexos, se exponen las posibles causas del deterioro del índice TBN, así como sus consecuencias y las medidas correctivas correspondientes.

- **Oxidación:** La evaluación de la oxidación en aceites lubricantes e hidráulicos es fundamental para medir su resistencia a esta reacción química, en la cual el aceite interactúa con el oxígeno presente en el aire. Este proceso produce compuestos que afectan negativamente el rendimiento y la durabilidad del aceite. La oxidación de la base del aceite genera ácidos disueltos, los cuales propician la corrosión de las superficies metálicas y reducen de forma irreversible la vida útil del producto.

El proceso de oxidación en los aceites se inicia con la formación de radicales libres y peróxidos, fenómeno que se ve incrementado por la presencia de oxígeno. La acumulación de aire en el aceite puede acelerar este proceso. A medida que el nivel de oxidación aumenta, se observa un incremento proporcional en el índice de acidez total (TAN). Cuando se alcanzan valores elevados de TAN, la viscosidad del aceite también aumenta, debido a la formación de moléculas de cadena larga insolubles, conocidas como lodos. Aunque ciertos aceites base, como los sintéticos, presentan una mayor resistencia a la oxidación, la incorporación de aditivos es esencial para cumplir con los estándares actuales.

- **Calor:** " La alta temperatura de funcionamiento es el principal iniciador del proceso de oxidación. También agota los aditivos y genera barniz, lodos y carbonización. Existe una regla práctica que establece que si la temperatura de un aceite que opera por encima de 70 °C se reduce en 10 °C, su vida útil se duplica. Además, la disminución de la viscosidad a causa de la alta temperatura afecta la resistencia de la película lubricante." [21]
- **Agua:** " El agua puede estar presente en el aceite en diferentes estados. Puede estar disuelta (invisible) o en forma de emulsión (nebulosa) en concentraciones de hasta 1,000 ppm, formando glóbulos microscópicos que lavan el paquete de aditivos y generan lodos, sedimentos y bacterias. La presencia de agua puede incrementar la velocidad de oxidación en más de diez veces y, en aceites dieléctricos, reducir significativamente la capacidad aislante. También favorece la formación de espuma y aumenta la viscosidad cuando se encuentra en estado de emulsión." [21]
- **Aire:** " El aire puede estar disuelto en niveles de hasta un 10% en aceites minerales, o atrapado en burbujas microscópicas inestables que afectan la capacidad térmica y la compresibilidad del aceite. El aire acelerará el proceso de oxidación y la formación de barniz, además de provocar efectos adversos como la cavitación y la corrosión

localizada. La aireación excesiva puede incrementar la viscosidad y oscurecer el aceite, lo que convierte al grado de viscosidad y al color en indicadores rápidos de fallas sintomáticas."[21]

- **Catalizadores metálicos:** " Partículas de metales como el cobre y el acero son las más generadoras de acidez, mientras que las de aluminio y plomo son menos nocivas. En aceites sintéticos, el proceso de oxidación evoluciona más lentamente en comparación con los aceites minerales. Los dispersantes ayudan a controlar la actividad de estos catalizadores."[21]

Para determinar el nivel de oxidación del aceite, se pueden evaluar diversos parámetros, tales como el índice de acidez total (TAN), el incremento de la viscosidad a 40 °C, el agotamiento de aditivos y características sensoriales, incluyendo el olor, el oscurecimiento del color y el aumento de la densidad.

En la figura número 46, ubicada en los anexos, se presentan las causas potenciales de oxidación en lubricantes, sus efectos, así como las medidas correctivas recomendadas.

La presencia de agua facilita la hidrólisis de los aditivos, mientras que el exceso de calor acelera su degradación térmica. Ambos factores favorecen la formación de hidroperóxidos y radicales libres, potenciando así la oxidación del aceite, un proceso irreversible. Este fenómeno puede servir como un indicador valioso para el monitoreo proactivo de maquinaria. Además, el agua promueve la sedimentación de aditivos en el fondo de los depósitos, propiciando la pérdida de su funcionalidad activa. Asimismo, el agua puede "lavar" los aditivos, desplazándolos hacia el fondo de los depósitos, lo que también conlleva a la reducción de su efectividad.

Por otro lado, los contaminantes sólidos saturan las moléculas de los aditivos, provocando su precipitación o atrapamiento en los filtros junto a los contaminantes. El monitoreo del estado de los aditivos se erige como una técnica fundamental para el mantenimiento proactivo de aceites lubricantes. En la tabla 48, ubicada en los anexos, se detallan los elementos fundamentales para la formulación de aditivos, sus funciones específicas y las fallas sintomáticas que facilitan la identificación del deterioro tanto de los aditivos como del aceite base.

- **Contaminantes:** La evaluación de contaminantes sólidos y disueltos es fundamental en los sistemas de monitoreo de fluidos, ya que estos elementos afectan de manera significativa la operatividad de los sistemas lubricados e hidráulicos. La entrada de impurezas al tribosistema provoca procesos de fragmentación y propagación. Las partículas de mayor tamaño, al interactuar con los mecanismos, se descomponen, generando partículas más pequeñas. Parte de estas partículas será capturada por los filtros, mientras que otras se sedimentarán en el sistema.

Las propiedades más críticas de una partícula incluyen su cantidad, tamaño y dureza. Se ha observado que la dureza de una partícula aumenta a medida que su tamaño disminuye, lo que potencia su capacidad para provocar desgaste. La calidad de los lubricantes se evalúa mediante unidades específicas de limpieza, y este parámetro influye directamente en la vida útil del equipo. Un aumento en la presencia de contaminantes sólidos se considera un indicativo de una posible falla en la máquina.

En la actualidad, la cuantificación de contaminantes se realiza mediante dos sistemas: análisis elementales y conteo de partículas, conforme a la norma ISO 4406 o NAS 1638. Aunque el primer método puede parecer más eficiente y eficaz, es crucial destacar que ambos enfoques son complementarios. Un sistema de monitoreo óptimo debe integrar ambos métodos para una evaluación integral de la contaminación.

- **Análisis Elementales:** Existen distintos métodos, y por tanto, diferentes niveles de precisión para este tipo de pruebas, que se basan en la detección y conteo de elementos metálicos y no metálicos disueltos en los lubricantes. Este análisis permite conocer la cantidad de diversos elementos (Cu, Fe, Cr, Al, Pb, Sn, Si, Na, K, Mo, Ni, Ag, Ti, V, Mn, Ca, P, Zn, Mg, Ba, B) presentes en partículas por millón. Sin embargo, el tamaño máximo que pueden medir estas técnicas es de aproximadamente 10 micras, por lo que, las partículas más grandes, provenientes generalmente del desgaste, quedan fuera del análisis. La identificación de estos elementos, sus proporciones en los lubricantes y fluidos de trabajo es un excelente indicador del desgaste del sistema y, en muchos casos, permite inferir el componente específico de origen de dicho desgaste.

La figura 50, obtenidas del “Manual de mantenimiento: ingeniería, gestión y organización” de Alejandro Piastrelli que se encuentran dentro de los anexos, muestran los posibles orígenes de los elementos contaminantes en los lubricantes.

- **Conteo de Partículas:** El Código de Limpieza ISO 4406 se emplea para cuantificar la concentración de partículas en aceites, tanto metálicas como no metálicas, considerando tanto su cantidad como su tamaño. Este método de recuento es el más difundido y aceptado en la actualidad, y se basa en hacer pasar un volumen de aceite (en cm^3) a través de una membrana estándar de 0,8 micrones, observando luego las partículas al microscopio. El observador cuenta las partículas de cada tamaño específico y asigna un número ISO, apoyándose en una tabla de referencia.

La técnica del código ISO 4406 ofrece tres valores, que representan la cantidad de partículas en el aceite con tamaños de:

- 4 micrones o mayores
- 6 micrones o mayores
- 14 micrones o mayores

Por ejemplo, un código 18/16/13, según la figura 28 indica que en la muestra de aceite hay:

Código	Más de	Hasta e incluso
24	8.000.000	16.000.000
23	4.000.000	8.000.000
22	2.000.000	4.000.000
21	1.000.000	2.000.000
20	500.000	1.000.000
19	250.000	500.000
18	130.000	250.000
17	64.000	130.000
16	32.000	64.000
15	16.000	32.000
14	8.000	16.000
13	4.000	8.000
12	2.000	4.000
11	1.000	2.000
10	500	1.000
9	250	500
8	130	250
7	64	130
6	32	64
5	16	32
4	8	16
3	4	8
2	2	4
1	1	2

- Entre 130.000 y 250.000 partículas de 4 micrones o más.
- Entre 32.000 y 64.000 partículas de 6 micrones o más.
- Entre 4.000 y 8.000 partículas de 14 micrones o más.

Figura 28: Código de Limpieza. **Fuente:** Norma ISO 4406.

La limpieza del lubricante incide directamente en la vida útil de los equipos. Investigaciones han evidenciado que la mejora en el nivel de limpieza del aceite en una unidad puede incrementar la vida de los componentes hasta en cinco veces. Por ende, es crucial mantener los aceites dentro de los rangos establecidos para prolongar la vida del tribosistema. Cualquier avance en el mantenimiento tendrá un impacto positivo en la durabilidad de los mecanismos.[21]

La norma ISO 4406 ofrece códigos estandarizados de limpieza, como se ilustra en la figura 51, conforme al tipo de componente y su lubricación. Esta información resulta valiosa en ausencia de especificaciones directas del fabricante. Aunque estos códigos representan solo una recomendación, por lo que no deben interpretarse de manera rígida, ya que cada componente puede necesitar condiciones de limpieza específicas para su funcionamiento óptimo, constituyen un buen punto de referencia. Para aceites de grado industrial o aceites de grado ISO, existe un procedimiento adicional que permite la personalización de este código de limpieza, resumido de la siguiente manera:

$$CI_C = f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5 * f_6 * f_7 * f_8 * CI_E \quad (2)$$

Donde:

- **CI_C**: Código ISO calculado para aplicación específica.
- **f₁**: Factor de condición de lubricación, ver imagen 52 Anexos.
- **f₂**: Factor de temperatura de operación, ver imagen 52 Anexos.
- **f₃**: Factor de acuerdo con el Índice de viscosidad del aceite ISO 3448 utilizado, ver imagen 52 Anexos.
- **f₄**: Factor de contaminación del aceite con agua, ver imagen 52 Anexos.
- **f₅**: Factor de tipo de material del depósito de aceite y tuberías de circulación, ver imagen 52 Anexos.
- **f₆**: Factor por contaminación en el ambiente, ver imagen 52 Anexos.
- **f₇**: Factor por tipo de programa de lubricación para cambio del aceite, ver imagen 52 Anexos.
- **f₈**: Factor por lugar de la toma de la muestra de aceite, ver imagen 52 Anexos.
- **CI_E**: Código ISO estándar para componente, ver tabla 51 Anexos.[1]

Finalmente, a pesar de la relevancia de esta información, muchos laboratorios optan por no llevar a cabo pruebas de limpieza en los aceites de motores de combustión interna. La razón principal radica en la función crítica de estos sistemas y su método de lubricación, que implica un elevado grado de contaminación. Por ende, la ejecución de estas pruebas no proporciona datos de significancia adecuada en tales situaciones.

6.4.5. Límites Condenatorios

Los límites condenatorios son esenciales en el monitoreo por condición, ya que actúan como criterios de referencia para evaluar el estado de los equipos. Estos límites permiten clasificar el funcionamiento en tres niveles:

- **Estado normal:** El equipo opera dentro de los parámetros aceptables y no presenta señales de desgaste o falla.
- **Estado de precaución:** Se detectan señales que indican un posible problema futuro, aunque el equipo aún puede funcionar sin riesgos inmediatos. Aquí, se recomienda tomar medidas preventivas para evitar un deterioro mayor.
- **Estado crítico:** Las condiciones del equipo superan los límites establecidos, lo que significa una alta probabilidad de falla funcional o incluso una falla crítica, si no se toman acciones inmediatas.

La definición y aplicación precisa de los límites es fundamental para la efectividad del monitoreo y mantenimiento predictivo. Establecer límites excesivamente altos impide la anticipación adecuada de fallas, comprometiendo así el propósito del mantenimiento predictivo. Por el contrario, límites demasiado bajos pueden conducir a un sobremantenimiento, lo que conlleva costos innecesarios. Encontrar un equilibrio adecuado permite prever fallas, optimizar la vida útil de los equipos y reducir costos de mantenimiento, evitando intervenciones superfluas.

En el caso específico del proyecto en curso, se requiere la definición de los siguientes límites condenatorios para los análisis de fluidos:

-
- | | |
|-------------------------------|----------------------|
| ▪ Porcentaje de Hollín | ▪ Cromo (Cr) |
| ▪ TAN | ▪ Cobre (Cu) |
| ▪ TBN | ▪ Níquel (Ni) |
| ▪ Índice PQ | ▪ Plomo (Pb) |
| ▪ Oxidación | ▪ Sílice (Si) |
| ▪ Sulfatación | ▪ Estaño (Sn) |
| ▪ Nitración | ▪ Zinc (Zn) |
| ▪ Hierro (Fe) | ▪ Calcio (Ca) |
| ▪ Aluminio (Al) | ▪ otros. |

Aunque la mayoría de los fabricantes de componentes automotrices e industriales, han desarrollado límites condenatorios basados en modelos específicos o estandarizados según el tipo de componente, esta información frecuentemente es considerada "*sensible para las compañías*", por ende, no se comparte. Esto implica que las empresas que optan por implementar un programa de monitoreo mediante análisis de fluidos deben establecer sus propios límites condenatorios, adaptados a sus necesidades específicas y al contexto operativo en el que se desenvuelven.

A pesar de esta limitación, la literatura especializada ofrece límites condenatorios orientativos que funcionan como referencias iniciales. Las tablas mostradas en las Figuras 53, 54 y 55, extraídas del "Manual de mantenimiento ingeniería, gestión y organización"[21], proporcionan parámetros generales aplicables a diversos tipos de equipos.

Existen diversos métodos para el cálculo de límites, siendo Noria Latin America una fuente destacada en este ámbito debido a su experiencia en programas de lubricación de clase mundial. En sus artículos "Establezca correctamente los límites del análisis de aceite", "Utilice el Análisis Estadístico para Crear Límites para Partículas de Desgaste", y "Establecimiento de límites dependientes del tiempo para mejorar la interpretación de los resultados del análisis de lubricantes", Noria proporciona una guía detallada para el cálculo de dichos límites. Su enfoque categoriza las variables de muestreo en dos grupos: "Dependientes del Tiempo" e "Independientes del Tiempo".

Para establecer adecuadamente los límites condenatorios de cada variable de muestreo, es fundamental comprender la influencia del tiempo en cada una. Este aspecto determina el método pertinente para calcular el límite correspondiente, garantizando que los resultados del análisis de lubricantes sean precisos y aplicables en el área de mantenimiento predictivo. En consecuencia, se definen las siguientes categorías de variables:

1. **Variables Independientes del Tiempo:** Las variables de análisis de lubricantes independientes del tiempo se definen como aquellas cuyo valor diagnóstico permanece constante, sin depender del tiempo de uso del aceite. Estas variables conservan su relevancia, independientemente del periodo de servicio del lubricante. Ejemplos típicos incluyen la presencia de contaminantes externos, como; agua o partículas de suciedad y la concentración de elementos de desgaste iniciales. Dentro de este grupo, se puede realizar una sub-clasificación en función de la capacidad de revertir los parámetros monitoreados:

- a) **Límites Proactivos Independientes del Tiempo (PTI):** Estos límites, denominados PTI por sus siglas en inglés, se aplican generalmente a indicadores como el conteo de partículas (según las normas ISO 4406 y NAS 1638) y la contaminación por humedad. Estas propiedades del lubricante pueden corregirse de inmediato si se detecta una condición fuera de límite, manteniendo así el aceite en óptimas condiciones sin necesidad de reemplazo inmediato.[6]
- b) **Límites Reactivos Independientes del Tiempo (RTI):** Estos límites, denominados RTI, generalmente corresponden a parámetros que no son reversibles, como el aumento de oxidación, el incremento del TAN (Número Total de Acidez) o las variaciones en la viscosidad. Estas propiedades indican una degradación del aceite que, una vez alcanzados los límites, sugiere la necesidad de reemplazo o intervención en el lubricante, ya que no pueden restaurarse a través de un proceso correctivo.[6]

Para determinar los límites condenatorios de los lubricantes, se recomienda seguir las especificaciones del fabricante, dado que estos límites son principalmente propiedades intrínsecas de los fluidos lubricantes. En ausencia de dicha información, se pueden aplicar análisis estadísticos para establecer los límites condenatorios en función del tiempo. Este enfoque es frecuentemente empleado en laboratorios especializados en el análisis de lubricantes [6], [5].

2. **Variables Dependientes del Tiempo:** Las variables de análisis de lubricantes dependientes del tiempo se definen como aquellas cuya aplicabilidad se fundamenta en la duración del uso del aceite. Estas variables experimentan modificaciones en su significado y relevancia en función del tiempo transcurrido desde el último cambio de aceite o su introducción al sistema. Ejemplos representativos de estas variables incluyen la degradación del aceite, la oxidación y la acumulación de partículas de desgaste, las cuales son indicativas de un deterioro progresivo y subrayan la necesidad de llevar a cabo un mantenimiento.

Los límites de contaminación por partículas no pueden ser evaluados de manera absoluta; su interpretación debe considerar el tiempo de uso del sistema. Por ejemplo, una concentración de 100 [ppm] de hierro tras 10 horas de operación tiene un significado distinto en comparación con la misma concentración después de 1000 horas de funcionamiento. Además, la curva de desgaste tribológico correspondiente a cada escenario es diferente, siendo el primer caso (100 [ppm] a las 10 horas) considerablemente más perjudicial debido a un desgaste acelerado.

Los límites se clasifican según su comportamiento temporal en dos categorías: ROC y SOFI para límites para intervalos de cambios de aceite corto, por sus siglas en inglés.

- a) **Límites Tasa de Cambio (ROC):** Estos límites se aplican a cualquier parámetro que demuestre dependencia con el tiempo. Para entender este método, se debe considerar el desgaste típico de un componente industrial, donde los niveles de partículas comienzan generalmente desde cero.



Figura 29: Perfil de desgaste típico de un componente industrial.

Fuente: Noria Latin America.

En la imagen 29, se aprecia perfectamente, gracias a el descenso de los metales, el cambio de aceite realizado durante las 400 horas de uso. Además en la imagen anterior se puede apreciar una generación de desgaste bastante constante, sin embargo, con un análisis más detallado, realizando una gráfica en base al concepto de tasa de cambio ROC llegaremos a un resultado que dista bastante de el anterior. Para interpretar estos resultados mediante la tasa de cambio (ROC), se utiliza la siguiente fórmula: 3

$$\dot{x} = \frac{x_0 - x_{-1}}{t_0 - t_{-1}} \tag{3}$$

donde:

- x_0 : Resultado obtenido del análisis actual.
- x_{-1} : Resultado obtenido del análisis anterior.
- t_0 : Lectura del horómetro en el momento del análisis actual.
- t_{-1} : Lectura del horómetro en el momento del análisis anterior.

Para aplicar esta técnica se deben considerar dos factores.

- Si la muestra es la primera toma después de un cambio, al componente x_{-1} y t_{-1} no están definidos y por tanto se deben sustituir por un resultado razonable que se puede esperar de una muestra tomada inmediatamente después del cambio de aceite.

- El parámetro tiempo puede tener varias unidades incluidas, horas, kilómetros incluso litros de combustibles consumidos[5]

Finalmente, generando la grafica ROC vs Tiempo, el gradiente de la figura numero 29, que originalmente era creciente, se transforma a una tendencia horizontal, como se aprecia en la figura numero 30.

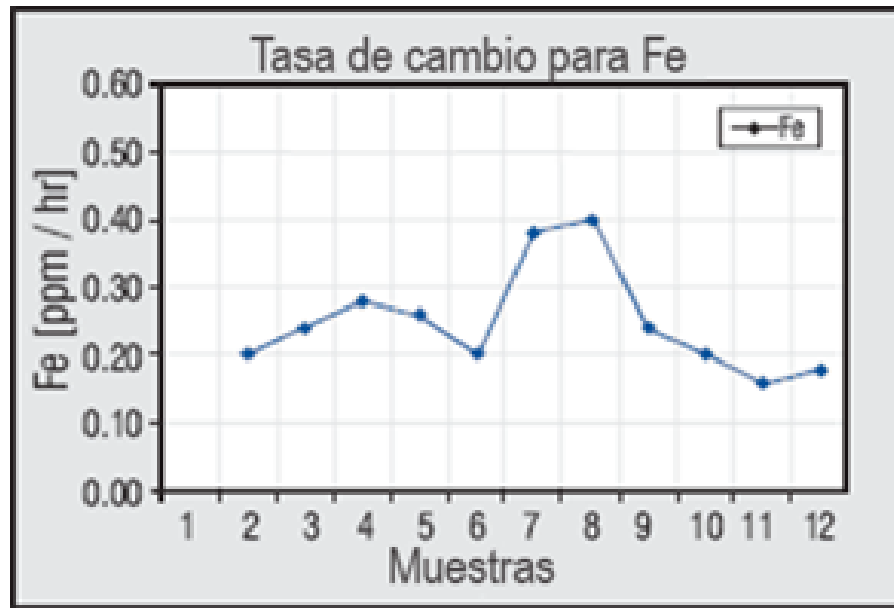


Figura 30: Gráfica de ROC para hierro.

Fuente: Noria Latin America.

En esta gráfica, queda en evidencia un aumento en la generación de hierro entre las muestras 7 y 8 (300 y 350 horas), lo cual no se apreciaba en la gráfica numero 29. Finalmente, se debe considerar además los rellenos de aceite que se hayan realizado, dado que muchas propiedades pueden cambiar por esta acción. Propiedades tales como: la concentración de metales, la oxidación, nitración o sulfatación, pueden sufrir grandes cambios al introducir aceites nuevos. Para tomar en cuenta los rellenos de aceites realizados, se debe normalizar en función del volumen de aceite rellenado utilizando la formula numero 4.

$$N_m = \frac{V + v}{V} \tag{4}$$

Donde:

- N_m : Factor de normalización
- V : Volumen de aceite del reservorio o cárter.
- v : Volumen de aceite añadido después del cambio de aceite [5].

Finalmente, los valores ROC normalizados (\dot{X}_m) se obtienen como sigue:

$$\dot{X}_m = \dot{x} * N_m \quad (5)$$

Es importante destacar que esta normalización por volumen de relleno, no es precisamente necesaria y "dependerá principalmente de la precisión de las estimaciones de volumen de relleno, dado que si el relleno se realiza a volumen constante, el factor de normalización tendera a una constante y puede ser ignorado."

3. **Limites Intervalos Cortos (SOFI):** Se presenta un método innovador que complementa el análisis ROC, diseñado para el monitoreo de componentes automotrices con intervalos reducidos para el reemplazo de aceite. Este enfoque resulta aplicable a componentes que disponen de pocas muestras a lo largo de la vida útil del aceite, a menudo limitándose a una única medición. El método se fundamenta en la normalización temporal (formula numero 6) y en la gestión óptima del nivel de llenado de aceite.

La normalización por tiempo se calcula como:

$$N_t = \frac{t_s}{t_p} \quad (6)$$

Donde:

- N_t : Factor de normalización por tiempo.
- t_s : Frecuencia estándar de cambio de aceite (establecida por manual).
- t_p : Periodo en que el aceite ha estado en servicio.

Entonces, para la normalización de los datos en función del tiempo y del volumen de aceite utilizado, se propone la siguiente metodología:

$$X_{tm} = \dot{x} * N_t * N_m \quad (7)$$

Donde, X_{tm} es el resultado normalizado por el tiempo.

Los intervalos límite SOFI se utilizan en contextos donde se realiza una única toma de muestra a lo largo de la vida útil del aceite. Los resultados obtenidos mediante este método son comparables a los derivados de las curvas ROC. Sin embargo, es importante destacar que este método no es adecuado para establecer límites en propiedades que no comienzan en o cerca de cero, como ocurre con la viscosidad.

6.4.6. Cálculo de Límites Condenatorios

Como se mencionó anteriormente, existen diversos métodos para calcular los límites condenatorios del aceite. Sin embargo, el más utilizado actualmente es el **método estadístico**, debido a su facilidad de aplicación y los excelentes resultados que proporciona. Una vez definido el tipo de límites a emplear, se procede a seleccionar los valores que los determinarán. En este contexto, *Noria Latin America*, en su artículo "*Establecimiento de límites dependientes del tiempo para mejorar la interpretación de los resultados del análisis de lubricante*", presenta las siguientes recomendaciones [4]:

- a) *"Para límites independientes del tiempo, consulte siempre las recomendaciones del fabricante del aceite y las especificaciones OEM."*
- b) *"Para límites dependientes del tiempo, utilice análisis estadístico. Recopile los resultados históricos del aceite y realice conversiones y normalizaciones si es necesario."*

Los métodos estadísticos establecen límites fundamentados en la variabilidad de datos recolectados temporalmente, proporcionando referencias precisas para detectar cambios significativos en las propiedades del lubricante. Estos límites se ajustan al comportamiento histórico de las variables monitoreadas, facilitando la identificación de tendencias de desgaste o degradación antes de que se alcancen niveles críticos. Esto permite una toma de decisiones informada en el mantenimiento preventivo, contribuyendo a la prolongación de la vida útil de los equipos.

El análisis estadístico se define a través de los siguientes parámetros:

- **Límite de Alarma (LA):** Suponiendo una distribución normal, se calcula como:

$$LA = \bar{x} \pm \sigma \quad (8)$$

Donde:

- LA : Límite de Alarma
- \bar{x} : Promedio de los resultados de la propiedad a monitorear.
- σ : Desviación estándar de los resultados.

Este límite representa el 68 % de todas las lecturas posibles, lo que indica un intervalo de valores considerados normales.

- **Límite Condenatorio (LC):** Asumiendo una distribución normal, se define como:

$$LC = \bar{x} \pm 2\sigma \quad (9)$$

Donde:

- LC : Límite Condenatorio
- \bar{x} : Promedio de los resultados de la propiedad a monitorear.
- σ : Desviación estándar de los resultados.

Este límite incluye el 95 % de todas las mediciones posibles, permitiendo la identificación de valores críticos.

Para asegurar la validez y precisión del método, Noria Latin America, en su artículo "*Utilice el análisis estadístico para crear límites para partículas de desgaste*", sugiere que la muestra de datos sea **suficientemente grande (al menos 25 datos)** [4].

Finalmente, es fundamental destacar que "*los límites no están para ser ajustados y olvidados. Al igual que todo en un programa de lubricación, los límites están sujetos a los principios de mejora continua. Utilice el sentido común: si un límite nunca se alcanza, es demasiado amplio. Si el límite se excede continuamente, podría ser poco realista para la aplicación.*"

6.5. Técnicas y Enfoques de Gestión del Mantenimiento

6.5.1. RCM-Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) es una metodología analítica destinada a identificar y priorizar actividades de mantenimiento críticas en sistemas productivos y equipos específicos. Originada en la década de 1960, esta técnica ha evolucionado y se ha adaptado a diversas industrias. Es importante destacar que el método MSG-3 es esencialmente equivalente al RCM, aunque su aplicación en la aviación lo identifica con esta nomenclatura.

La metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) impulsó a la Sociedad Americana de Ingenieros Automotrices (SAE) a desarrollar, en 1999, la norma SAE JA1011. Esta norma establece criterios estandarizados para la evaluación de procesos de mantenimiento, lo cual asegura la confiabilidad funcional de los activos. Actualmente, el RCM es un proceso clave para garantizar el óptimo funcionamiento de los activos físicos, alineándose con las expectativas del usuario y adaptándose al entorno operativo específico.

Para facilitar la identificación de las necesidades de mantenimiento en una organización, el RCM fundamenta su metodología en la respuesta a siete preguntas clave que estructuran su análisis:

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de rendimiento asociados a los activos en su contexto operativo actual?
2. ¿Cuáles son los estados de falla (fallas funcionales) relacionados con estas funciones?
3. ¿Cuáles son las posibles causas de estas fallas? (modos de falla)
4. ¿Cuáles son los efectos de cada una de estas fallas? (efectos de los modos de falla)
5. ¿Qué consecuencias tiene cada falla?
6. ¿Qué se puede hacer para predecir o prevenir la falla?
7. ¿Qué acciones tomar si no se puede establecer una tarea predictiva o preventiva adecuada?

La respuesta a estas interrogantes requiere una comprensión profunda del contexto operativo del equipo o sistema. Es fundamental considerar aspectos como la finalidad del activo, la disponibilidad

de repuestos y la competencia técnica del personal. Además, muchas organizaciones establecen protocolos que definen las actividades preventivas mínimas a implementar, lo que facilita la alineación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) con las prácticas institucionales.

Una vez establecido el contexto operativo, el Análisis de Efectos y Modos de Falla (FMEA) se configura como una herramienta esencial dentro del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

6.5.2. Análisis de modo y efecto de falla (FMEA o AMEF)

El Análisis de Modo y Efecto de Falla (FMEA o AMEF) es una herramienta sistemática que permite identificar y analizar los modos de falla, sus causas, efectos y consecuencias en los procesos operativos. Esta metodología facilita la anticipación de problemas en sistemas, equipos y componentes, además de contribuir a la priorización de activos en función de su criticidad. De acuerdo con John Moubray[17], el FMEA consta de etapas fundamentales, cada una con un propósito específico que permite realizar un análisis integral. A continuación, se describen estas etapas:

- **Definición de Funciones:** En esta primera etapa, se define la función o funciones específicas que desempeñan los activos dentro de su contexto de operación normal. La claridad en la definición funcional permite determinar el papel esencial del activo en el sistema. Es importante reconocer que un activo puede cumplir múltiples funciones dentro de un mismo sistema.
- **Descripción de Fallas Funcionales:** Una falla funcional se describe como la incapacidad del activo para desempeñar su función establecida[17]. En esta etapa, cualquier desviación del funcionamiento óptimo o pérdida de eficiencia es considerada una falla. Todas las alteraciones en la función previamente definida deben ser documentadas minuciosamente para entender el impacto en el sistema.
- **Identificación de los Modos de Falla:** En esta etapa comienza el análisis FMEA propiamente dicho. Luego de definir las funciones y las fallas funcionales, se identifican los modos de falla, es decir, todos los eventos o factores que pueden provocar el estado de falla.

Los modos de falla abarcan: averías por desgaste, condiciones ambientales adversas, errores humanos (por operadores y técnicos de mantenimiento) y fallas de diseño, entre otros. Identificar todos estos modos es fundamental para anticipar posibles fallas en el equipo o sistema.

- **Descripción de los Efectos de los Modos de Falla:** Cada modo de falla tiene consecuencias específicas en el contexto de la operación y el mantenimiento. Entre los efectos más comunes están el tiempo de inactividad del proceso productivo, la afectación a la calidad del producto, y la inhabilitación del sistema por razones de seguridad. La experiencia y el conocimiento de los equipos son esenciales en esta etapa para detallar los posibles efectos de cada modo de falla.
- **Determinación de las Consecuencias de un Modo de Falla:** Determinar las consecuencias de cada modo de falla es crucial para seleccionar las estrategias de mantenimiento más adecuadas. La metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) enfatiza la importancia de mitigar las consecuencias potenciales de un modo de falla en lugar de centrarse únicamente en las características técnicas de la falla misma. Las consecuencias pueden clasificarse en:
 - **Consecuencias de seguridad:** Riesgos para las personas o el medio ambiente.
 - **Consecuencias operacionales:** Impacto en la producción, eficiencia o costos.
 - **Consecuencias no operacionales:** Costos asociados a las reparaciones u otras pérdidas económicas.
- **Determinación de las Actividades de Mantenimiento:** Finalmente, una vez evaluadas las consecuencias de los modos de falla, se realiza un análisis para seleccionar las estrategias de mantenimiento más adecuadas. El objetivo es aplicar una estrategia que permita prevenir o predecir de manera efectiva los modos de falla identificados. Este enfoque busca no solo evitar las fallas, sino reducir al mínimo sus consecuencias.

6.5.3. Resultados de un proceso de RCM

La aplicación de la metodología de Análisis de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) proporciona resultados que deben plasmarse en planes o programas de mantenimiento, los cuales detallan las actividades específicas para cada componente del sistema. Estos planes deben ser desarrollados y ejecutados por el área de mantenimiento.

Dependiendo de los resultados obtenidos en cada análisis, se definirá la estrategia de mantenimiento más efectiva para cada componente. Un análisis exhaustivo, junto con una implementación adecuada, permitirá alcanzar una mayor disponibilidad y confiabilidad. Asimismo, se obtendrán los siguientes beneficios:

- Incremento en la seguridad para el personal operativo.
- Reducción de paradas no programadas.
- Mejora en la organización y gestión del departamento de mantenimiento.
- Prolongación de la vida útil de los equipos.
- Disminución gradual de los costos de reparación.

El Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) se puede integrar con un análisis funcional que permita identificar y evaluar las funciones críticas de cada componente del sistema, así como sus posibles modos de falla. Esta integración optimiza el flujo de trabajo y mejora la definición y claridad en la identificación de los modos de falla.

La metodología FMEA (Análisis de Modos de Falla y Efectos) puede ser mejorada a través de la incorporación de un análisis de criticidad asociado a cada modo de falla y sus efectos, dando lugar al FMECA (Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad).

Para integrar criterios de criticidad en el análisis de fallas, se utiliza el Número de Prioridad de Riesgo (RPN). Este índice permite evaluar cada modo de falla considerando tres parámetros: frecuencia de ocurrencia, severidad y grado de detectabilidad, asignando un valor que cuantifica el riesgo asociado.

En la evaluación de los modos de falla, los valores del Número de Prioridad de Riesgo (RPN, por sus siglas en inglés) se organizan en orden descendente, lo que permite la identificación de los modos de falla más críticos. Los modos de falla con valores RPN más altos señalan áreas de mayor preocupación dentro del equipo o sistema.

6.5.4. Curva P-F

La curva P-F describe el deterioro progresivo de un componente o equipo, comenzando desde la detección de una condición de falla (punto P) hasta la manifestación de una falla funcional (punto F). Esta representación gráfica facilita la visualización del tiempo disponible para la identificación y corrección de problemas, lo que contribuye a prevenir interrupciones en el funcionamiento del equipo.

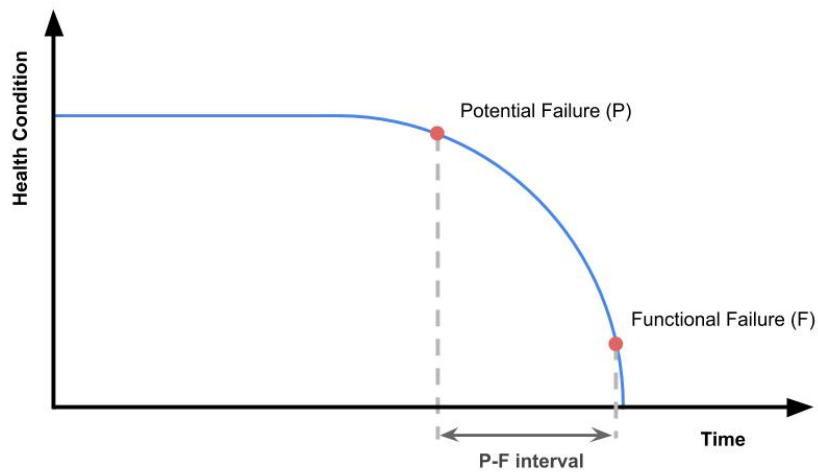


Figura 31: Modelo Curva P-F

Fuente: Explicación de la curva PF: todo lo que necesita saber.

(Upkeep) (07/04/2025) <https://upkeep.com/es/learning/p-f-curve/>

- **Punto P (Potential Failure):** Este es el punto en el que se detecta una condición de falla potencial o inicio de deterioro, que todavía no afecta el funcionamiento del equipo de manera crítica. Las técnicas de mantenimiento predictivo, como el análisis de vibraciones, el monitoreo de temperatura y análisis de lubricante, son clave en esta etapa para detectar indicios de fallas.

- **Punto F (Functional Failure):** Es el momento en el que la falla se vuelve evidente y el equipo pierde su capacidad para operar en condiciones normales. Este punto puede significar la interrupción del servicio, afectando la producción, seguridad o costos.
- **Intervalo P-F:** Este es el tiempo entre el punto P y el punto F, y es crucial en el mantenimiento predictivo. Un intervalo P-F amplio permite planificar y ejecutar intervenciones de mantenimiento antes de llegar al punto de falla funcional. La longitud del intervalo P-F depende de diversos factores, como la criticidad del equipo y las condiciones de operación.

La curva P-F es una herramienta clave para determinar el momento óptimo para la realización de mantenimiento predictivo y correctivo, maximizando el ciclo de vida de los activos. Asimismo, contribuye a la gestión de riesgos y a la planificación eficiente de recursos, al ofrecer un intervalo de aviso entre la identificación de una falla y el instante en que esta se traduce en un problema operativo.

Algunas estrategias derivadas de la curva P-F son:

- **Monitoreo Predictivo:** Implementación de tecnologías que detecten de manera temprana los modos de falla en el punto P. Esto permite acciones correctivas antes de que la falla se vuelva funcional, evitando una pérdida total de la capacidad operativa.
- **Gestión de Condición:** Evaluar el equipo en función de las lecturas de condición obtenidas para ajustar la frecuencia de inspección y priorizar las intervenciones.
- **Optimización del Tiempo de Intervención:** Conocer el intervalo P-F permite programar las intervenciones en un momento que minimice el impacto en la producción y reduzca los costos de mantenimiento.

La curva P-F constituye una herramienta fundamental para la planificación de actividades de mantenimiento y la optimización de recursos. Su aplicación propicia la reducción de costos operativos, al mismo tiempo que mejora la confiabilidad y disponibilidad de los equipos.

6.5.5. Análisis Funcional

El análisis funcional es una metodología que facilita la descomposición de activos en sistemas, subsistemas y componentes, permitiendo así identificar y comprender las funciones específicas en un entorno operativo particular. Esta metodología enfatiza el establecimiento de relaciones y requisitos funcionales entre los componentes, garantizando que el sistema en su totalidad opere de acuerdo con los estándares de seguridad, confiabilidad y eficiencia.

Para el análisis funcional de activos, se recomienda la utilización de las normas SAE JA1011 y SAE JA1012, que establecen directrices para el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM). Estas normas organizan el análisis de funciones y modos de falla, asegurando que los procedimientos se ajusten a las necesidades operativas, mitigando los riesgos de falla y optimizando la disponibilidad de los equipos. Específicamente, la norma SAE JA1011 establece los requisitos del proceso RCM, mientras que la SAE JA1012 proporciona las metodologías necesarias para su implementación, incluyendo principios de gestión de riesgos.

Las secciones fundamentales que deben ser consideradas en un análisis funcional son:

1. **Definición de Funciones Primarias y Secundarias:** Se identifican las funciones esenciales del equipo (función primaria) y aquellas funciones complementarias o de soporte (funciones secundarias). Cada función debe describirse junto con sus parámetros de rendimiento, como velocidad, capacidad o precisión, para definir los requisitos específicos que debe cumplir el activo.
2. **Identificación de Modos de Falla:** Se analizan los posibles modos de falla que podrían impedir el desempeño óptimo de las funciones identificadas. Cada modo de falla considera factores como frecuencia, efectos potenciales, y la probabilidad de ocurrencia para facilitar la evaluación de riesgos y priorizar acciones preventivas.
3. **Efectos de Falla y Consecuencias:** Se evalúan los efectos de cada modo de falla sobre el equipo, los operadores y el entorno. Las consecuencias pueden incluir pérdida de funcionalidad, riesgos para la seguridad, o impactos económicos. Esto ayuda a determinar la criticidad de cada componente en base a los riesgos que presentan sus fallas.

4. **Estrategias de Mantenimiento:** Basado en los modos y efectos de falla, se diseñan estrategias de mantenimiento predictivo, preventivo o correctivo. Aquí se aplica la matriz RPN (Número de Prioridad de Riesgo) o métodos similares para clasificar y priorizar las fallas más críticas.
5. **Evaluación de Requerimientos de Rendimiento:** Se comparan las condiciones de operación reales con los parámetros de rendimiento esperados para identificar brechas en la confiabilidad y la seguridad. Los requerimientos de rendimiento definen estándares de operación como eficiencia, durabilidad y capacidad del equipo, que son fundamentales para una operación estable y segura.

6.5.6. Norma ISO 14224 y Jerarquizan de Equipos

Este apartado describe una técnica fundamental para la jerarquización de activos de producción en función de su criticidad, que facilita la identificación de procesos, sistemas, máquinas, equipos y componentes cuya falla o anomalía afecta la productividad, asignándoles un orden de prioridad adecuado.

La norma ISO 14224 establece criterios y técnicas para evaluar la relevancia de cada equipo en un sistema productivo. Clasifica los modos de falla según su impacto en la función productiva y el mecanismo de falla, que puede ser mecánico, eléctrico, estructural, entre otros. Asimismo, proporciona directrices para organizar los activos en categorías jerárquicas, abarcando desde clases de equipos y sistemas hasta subsistemas, ítems mantenibles y componentes específicos.

Las técnicas de jerarquización establecidas en la norma son aplicables a diferentes niveles de complejidad, incluyendo enfoques cuantitativos, cualitativos, gráficos y multicriterio. Estas técnicas consideran aspectos fundamentales como la confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, configuración de equipos, condiciones operativas y el riesgo asociado. De este modo, la norma permite una selección eficiente de la herramienta más adecuada para cada contexto operativo, optimizando la identificación de equipos críticos y estructurando planes de acción para el mantenimiento.

En resumen, ISO 14224 promueve una metodología estándar para el tratamiento de equipos críticos, facilitando la toma de decisiones en mantenimiento y la implementación de estrategias óptimas para gestionar recursos y reducir riesgos en función de la criticidad de cada activo.[11]

6.5.7. Número de Prioridad de Riesgo (RPN)

El método de Número de Prioridad de Riesgo (RPN, por sus siglas en inglés) es una técnica destinada para calcular un índice de riesgo asociado a los activos. A diferencia de otros métodos, el RPN está estrechamente relacionado con el Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA o AMFE), lo que permite una priorización precisa de los componentes dentro de un sistema o equipo.

El cálculo del RPN (Número de Prioridad de Riesgo) se realiza a través de la siguiente fórmula:

$$\text{RPN} = S \times O \times D \quad (10)$$

donde:

- **S (Severidad):** Representa el impacto previsto de la falla en el sistema. Estos impactos pueden clasificarse en categorías como ambientales, económicos, operacionales, entre otros. El valor de severidad generalmente se asigna de manera cualitativa, con base en estimaciones subjetivas de expertos, quienes utilizan tablas de referencia previamente desarrolladas para asignar un valor ponderado a cada tipo de impacto.
- **O (Ocurrencia):** Refleja la probabilidad de que ocurra una falla específica en el equipo. Esta probabilidad se estima a partir de datos históricos de fallas, o, en ausencia de estos, mediante la opinión de expertos en el equipo. Se recomienda utilizar tablas en las que las probabilidades se estratifiquen en intervalos con diferentes ponderaciones según el nivel de ocurrencia. La norma SAE J1739 proporciona una guía para esta estratificación de probabilidades.

- **D (Detectabilidad):** Indica la probabilidad de detectar la falla antes de que cause un impacto significativo en el sistema, considerando el intervalo de detección de cada técnica (denominado intervalo P-F). La detectabilidad también se pondera utilizando una escala que refleja la eficacia de las medidas de monitoreo o de mantenimiento predictivo para detectar fallas.

Una vez evaluadas las variables, el valor del Número de Prioridad de Riesgo (RPN) resultante debe ser clasificado de forma decreciente. Este proceso de ordenamiento permite identificar los componentes que presentan un mayor nivel de riesgo en el equipo o sistema.

La norma SAE J1739 proporciona tablas para la ponderación de las variables de severidad, ocurrencia y detectabilidad, lo cual optimiza su adecuación al contexto particular del cliente o del sistema evaluado.

6.6. Mejora Continua y Excelencia Operacional

Este proyecto se centra en el diseño de un plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis de fluidos para equipos críticos, estableciendo al mismo tiempo las bases para alcanzar la excelencia operacional en la gestión de dichos fluidos. Mediante la filosofía de mejora continua, se pretende fomentar un proceso sistemático y constante de optimización en la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento. Es fundamental, por tanto, definir y comprender las metodologías subyacentes —como la mejora continua y la excelencia operacional— que facilitarán la implementación eficiente y sostenible del plan de mantenimiento.

6.6.1. Mejora Continua

La mejora continua es una metodología de gestión enfocada en la optimización constante de los procesos, productos y servicios de una organización. Su fundamento radica en un enfoque sistemático para identificar y eliminar ineficiencias, como desperdicios, errores, cuellos de botella y actividades que no aportan valor añadido, tanto para el cliente como para la organización. En lugar de proceder a modificaciones drásticas de manera inmediata, la mejora continua busca incrementos graduales y sostenidos mediante pequeños ajustes y perfeccionamientos que, acumulados, propician mejoras significativas en el rendimiento organizacional. [10]

Este enfoque se representa comúnmente mediante el ciclo PDCA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar), un proceso cíclico desarrollado por Walter A. Shewhart y popularizado por W. Edwards Deming. Durante la fase de Hacer, se implementan los cambios de manera controlada. En la etapa de Verificar, se analizan los resultados obtenidos y se evalúa el desempeño en comparación con los objetivos establecidos. Finalmente, en la fase de Actuar, se determina si los cambios deben estandarizarse o si se requieren ajustes adicionales [7].

La mejora continua se sustenta en herramientas como Kaizen, la cual traduce "cambio para bien" y enfatiza la participación activa de todos los colaboradores. Este enfoque fomenta una cultura de colaboración y responsabilidad compartida, donde los empleados se convierten en actores clave en la optimización de su entorno laboral. Así, se promueve una cultura organizacional centrada en el aprendizaje constante y la innovación [14].

Los beneficios de la mejora continua incluyen una optimización de la eficiencia operativa y un incremento en la satisfacción del cliente. Estudios han demostrado que la implementación de programas de mejora continua en el sector industrial permite a las empresas adaptarse de manera efectiva a las fluctuaciones del entorno, reducir costos, elevar la calidad de sus productos y servicios, y, por ende, potenciar su competitividad [12].

La mejora continua fomenta una cultura de análisis crítico y aprendizaje, esencial en sectores competitivos, donde la capacidad de adaptarse y perfeccionarse constantemente se establece como un factor diferenciador clave.

6.6.2. Excelencia Operacional

La excelencia operacional es un enfoque integral de gestión dirigido a maximizar el rendimiento organizacional mediante la optimización de las operaciones. Este concepto se basa en la alineación estratégica, la mejora continua y la ejecución eficiente de procesos, con el fin de satisfacer de manera consistente las necesidades del cliente. Implica alcanzar altos niveles de eficiencia, calidad y seguridad en todas las áreas de la organización, fomentando una cultura organizativa en la que todos los empleados se comprometan con elevados estándares de desempeño [9].

Uno de los marcos conceptuales más aplicados en la búsqueda de la excelencia operacional es Lean Six Sigma, que integra la metodología Lean, centrada en la eliminación de desperdicios, con el enfoque Six Sigma, orientado a la reducción de variabilidad. Dicha combinación permite a las empresas lograr altos niveles de rendimiento mediante la optimización de procesos, la mejora de la calidad, así como la disminución de los tiempos de ciclo y los costos. Los principios de Lean Six Sigma ayudan a las organizaciones a reducir el desperdicio y mejorar la calidad de forma sistemática, generando valor constante para los clientes [8].

Además, la excelencia operacional se apoya en el modelo de madurez de capacidades (CMM, por sus siglas en inglés), que permite a las organizaciones evaluar y mejorar sus capacidades mediante un enfoque estructurado y medible. Este modelo establece cinco niveles de madurez, desde la ejecución básica de procesos hasta la optimización continua, lo que facilita a las organizaciones identificar áreas de mejora y alcanzar un desempeño de clase mundial [20].

Los beneficios de la excelencia operacional incluyen una mayor eficiencia y productividad, un mejor control de calidad, y una reducción de riesgos, lo que permite a las empresas adaptarse mejor a los cambios del mercado y las demandas del cliente. Según estudios, las organizaciones que adoptan prácticas de excelencia operacional logran una ventaja competitiva sostenible, mejoran su resiliencia y alcanzan una mayor satisfacción del cliente [22].

En resumen, la excelencia operacional promueve una cultura organizacional basada en la optimización continua y la innovación, donde cada nivel de la organización contribuye a alcanzar los objetivos estratégicos de manera efectiva.

7. Metodología

El presente estudio adopta un enfoque mixto, combinando métodos cualitativos y cuantitativos para abordar de manera integral la gestión de activos críticos en REPORT-AGUNSA. Dada la prolongada duración necesaria para evaluar la efectividad del plan de mantenimiento predictivo en los equipos gestionados por la empresa, se optó por un enfoque exploratorio, llevando a cabo estudios de caso centrados en una muestra representativa de los activos administrados por la Unidad Central de Equipos y Mantenimiento (UCEM). Se exponen a continuación las fases del proyecto, alineadas con el cronograma establecido y los objetivos planteados, cuya curva de avance se presenta en la Figura 32.

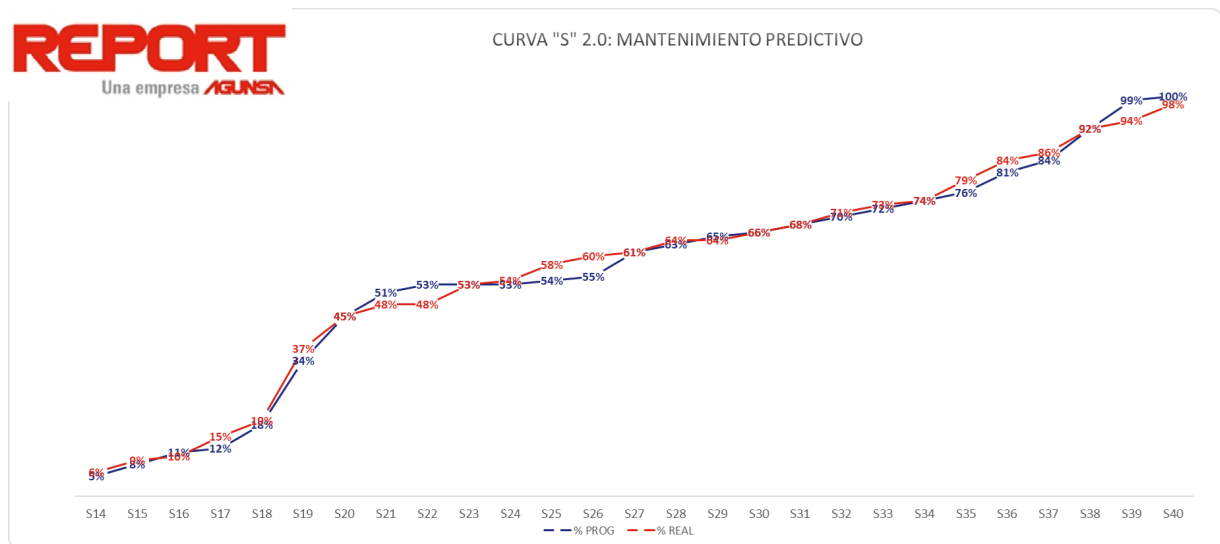


Figura 32: Curva S: FluidExPort

Fuente: Elaboración propia

7.1. Actividades Previas

Esta etapa representa una de las fases iniciales del proyecto, donde se inició la recopilación de antecedentes necesarios para identificar las principales brechas existentes en la empresa que deben ser subsanadas para lograr una gestión óptima de los activos. Durante este período, se definieron los objetivos a alcanzar para considerar el proyecto como exitoso, así como los alcances de dichos objetivos.

Además de establecer un cronograma que detallara cada actividad y sus respectivos alcances, se realizó una primera revisión de los equipos a evaluar, lo que permitió identificar brechas en la adecuada categorización de la prioridad o criticidad de los activos. La categorización existente en la empresa, que se basaba únicamente en un criterio económico relacionado con el valor del activo, no incorporaba otras variables operacionales fundamentales para una gestión eficiente, tales como: el lucro cesante y la seguridad en faena, que impactan directamente en el EBITDA y el HSEQ (Health, Safety, Environment, and Quality).

Por lo tanto, se hace indispensable implementar una nueva categorización que proporcione un método claro para definir correctamente los equipos a incluir en el proyecto y garantizar así una gestión más eficiente en el futuro.

7.2. Etapa 0: Auditoría Interna

La Auditoría Interna dio inicio oficial al proyecto, marcando una fase clave para la recopilación de antecedentes que permitieron esclarecer la situación actual de la empresa. En esta etapa, se aplicaron los análisis PESTEL, 6M y FODA, detallados previamente en las secciones 3.3, 3.4 y 4.1. Los resultados obtenidos de estos análisis revelaron que la gestión de fluidos en la empresa era elemental y rudimentaria, limitándose principalmente al relleno de fluidos y, ocasionalmente, a la toma de muestras.

Se identificó que la información crítica, en particular el tipo de fluido utilizado en cada componente de los equipos, no se monitorea de manera adecuada, dejándose en manos de los colaboradores en terreno. Esta deficiencia en el control representa un riesgo significativo para la vida útil de los equipos, comprometiendo su confiabilidad a lo largo de su ciclo operativo, tal como se describe en el marco teórico.

Es crucial señalar que la información presentada es fundamental para un análisis riguroso de los fluidos. Si bien algunos lubricantes pueden ser compatibles, no aseguran la homogeneidad en la cantidad de aditivos y detergentes, lo que genera diferencias significativas en los parámetros de las muestras analizadas. Por lo tanto, una correcta gestión de estos datos es imprescindible para garantizar resultados precisos y mantener una gestión eficiente en el mantenimiento predictivo.

En este contexto, la situación actual de la empresa y las brechas que el proyecto busca abordar se resumen de la siguiente manera:

- **Falta de gestión de fluidos eficiente:**

- Actividades limitadas al cambio o relleno de fluidos y toma esporádica de muestras.
- Ausencia de un sistema para gestionar y analizar los resultados de las muestras.

- **Información básica incompleta o desactualizada:**

- Desconocimiento del tipo de fluido utilizado en cada componente de los equipos.
- Dependencia de la decisión de los colaboradores en terreno para seleccionar fluidos.

- **Categorización inadecuada de activos críticos:**
 - Clasificación basada únicamente en criterios económicos (valor del activo).
 - Falta de consideración de variables operacionales como el lucro cesante y la seguridad en faena.

- **Incompatibilidad y riesgos en el uso de lubricantes:**
 - Uso de lubricantes que, aunque compatibles, tienen diferentes aditivos y detergentes.
 - Parámetros inconsistentes en los análisis de fluidos debido a la mezcla de productos.

- **Ausencia de estándares y procedimientos claros:**
 - Falta de protocolos para la toma, análisis y gestión de muestras de fluidos.
 - Carencia de procedimientos estandarizados para el mantenimiento predictivo.

- **Baja confiabilidad y disponibilidad de los equipos:**
 - Riesgo de fallas prematuras debido a la falta de control sobre los fluidos utilizados.
 - Compromiso de la confiabilidad de los equipos a lo largo de su ciclo de vida.

- **Impacto negativo en indicadores clave:**
 - Afectación directa en el EBITDA por costos no controlados de fallas.
 - Incidencia en HSEQ por problemas de seguridad relacionados con el estado de los equipos.

- **Pérdidas por detenciones no planificadas:**
 - Fallas con consecuencias catastróficas generadas por desgaste prematuro y severo en componentes críticos.
 - Afectación directa a la sustentabilidad y competitividad de REPORT.

En esta fase, una vez definidos los elementos anteriores, se desarrolló el programa a seguir y los objetivos específicos a cumplir, con el fin de mitigar o reducir aquellas prácticas inadecuadas o ineficientes que afectan la correcta gestión de equipos y la competitividad de la empresa en el mercado. Las principales actividades identificadas para abordar estas brechas, y que están directamente alineadas con el cumplimiento de los objetivos expuestos al inicio de este informe, se resumen a continuación:

1. Análisis de Criticidad
2. Realizar levantamiento de contexto operacional
3. Realizar levantamiento nacional de fluidos recomendados versus utilizados.
4. Realizar estudio de viabilidad técnica y económica para proyecto.
5. Diseñar un plan de muestreo y análisis de aceites para equipos críticos.
6. Creación de protocolos de análisis de fluidos.
7. Implementar sistema de registro y seguimiento de datos.
8. Crear plan para integrar satisfactoriamente modelo creado.

Cada una de estas actividades forma parte de las etapas subsiguientes, las cuales se explicarán a continuación.

7.3. ETAPA 1: Levantamiento de Información

Este período tuvo como objetivo comenzar a cerrar las brechas básicas de información y gestión que han persistido durante años y que se han agudizado con el tiempo. Así, se establecieron métodos y procedimientos para una correcta gestión de fluidos y equipos, tanto para los actuales como para los futuros.

En esta etapa, se diseñó una matriz de criticidad para equipos bajo la norma ISO 14224. Aunque esta norma está orientada principalmente a las industrias petroquímica, química y de gas, proporciona directrices claras y contundentes para establecer los parámetros con los cuales se pueden calcular las prioridades de los equipos actuales y futuros. La matriz tiene como objetivo identificar los equipos críticos para la operación, respondiendo a una serie de criterios relevantes tanto para la empresa como para la gestión de mantenimiento y activos, pero sin basarse exclusivamente en un criterio económico relacionado con el valor inicial del equipo, como era el método utilizado previamente por la empresa. De esta manera, se incorporan categorías que evalúan directamente aspectos como HSEQ y parámetros que permitan estimar de manera más precisa el EBITDA a futuro.

Los criterios considerados en la matriz, denominada “Matriz ECM” o “Matriz de Equipos Críticos Muestreables”, fueron diseñados inicialmente para identificar los equipos que cumplen con las condiciones y requerimientos necesarios para integrarse al programa de muestreo de fluidos. Cada uno de estos criterios se evalúa en una escala de 1 a 5, siendo 5 catastrófico y 1 insignificante. A continuación, se detallan los criterios específicos que conforman esta matriz, así como lo que implica cada valor en la escala descrita:

- **Lucro Cesante:** Este criterio viene a evaluar las consecuencias que trae para mantener la continuidad operativa del contrato el que un equipo falle, considerando además, el desgaste prematuro que puede producirse al sobre utilizar equipos sustitutos ("Back-Up") en caso que se cuente con ellos.
 - **Catastrófico (5):** Se debe gestionar Equipo sustituto (Arrendar o trasladar equipo sustituto)
 - **Severo (4):** Existe 1 equipo de similares características con operación continua que puede absorber carga de trabajo (con un 50% o mayor de sobrecarga operativa)

- **Moderado (3):** Existe al menos 1 equipo de similares características con operación continua que puede absorber carga de trabajo, (Con menos de 50 % de sobrecarga operativa)
 - **Menor (2):** Existe al menos un equipo de similares características con operación continua que puede absorber carga de trabajo, (Con menos de 40 % de sobrecarga operativa)
 - **Insignificante (1):** Existe equipo Back-Up. Operación sigue trabajando con completa normalidad.
- **Coste del Equipo:** Referido al coste original del equipo, sin considerar inversiones posteriores como mantenimientos mayores. Evalúa el impacto económico que tendría para la empresa el adquirir un equipo nuevo en caso de tener que reemplazar el activo en su totalidad.
- **Catastrófico (5):** Sobre cien mil dólares.
 - **Severo (4):** Sobre ochenta mil dólares.
 - **Moderado (3):** Sobre cincuenta mil dólares.
 - **Menor (2):** Sobre veinte mil dólares.
 - **Insignificante (1):** Bajo veinte mil dólares.
- **Seguridad:** Categoría creada para evaluar el impacto que trae para los operadores, mantenedores y colaboradores en terrenos utilizar equipos con desviaciones de su correcto funcionamiento, las que pueden generar perjuicios en el HS (Health-Security) de ellos. La valorización de la escala se desprende de las distintas categorías dispuestas en el código penal chileno.
- **Catastrófico (5):** Lesiones graves gravísimas. Falla genera pérdida de funcionalidad en sistemas crítico en la seguridad del personal y que por tipo de trabajo puede causar lesiones graves gravísimas a un colaborador.
 - **Severo (4):** Lesiones graves. Falla genera pérdida de funcionalidad en sistemas crítico en la seguridad del personal y que por tipo de trabajo puede causar lesiones graves de un colaborador.

- **Moderado (3):** Lesiones menos graves. Falla genera perdida de funcionalidad en sistemas critico en la seguridad del personal y que por tipo de trabajo puede causar lesiones menos graves a un colaborador.
 - **Menor (2):** Lesiones leves. Falla genera perdida de funcionalidad en sistemas critico en la seguridad del personal y que por tipo de trabajo puede causar lesiones leves colaborador.
 - **Insignificante (1):** Lesiones levísimas. Falla genera perdida de funcionalidad en sistemas critico en la seguridad del personal y que por tipo de trabajo puede causar lesiones levísimas a un colaborador.
- **Medio Ambiente:** Parámetro que permite cuantificar e identificar aquellos equipos que produzcan una mayor contaminación cuando se encuentren con problema en su funcionamiento versus a la contaminación que generan cuando se encuentran en optimas condiciones, considerando como contaminación residuos o desperdicios, que afecten de forma directa e indirectamente la huella de carbono del equipo, necesarios para mantener sus funciones operativas.
- **Catastrófico (5):** Gran cantidad de contaminación, mayor o igual a un 40 % extra.
 - **Severo (4):** Contaminación significativa, mayor o igual a un 30 % extra.
 - **Moderado (3):** Alguna Contaminación, mayor o igual a un 20 % extra.
 - **Menor (2):** Contaminación Insignificante, mayor o igual a un 10 % extra.
 - **Insignificante (1):** Sin Contaminación.
- **Producción:** Impacto real o potencial que trae la falla funcional total o parcial del equipo. Considerando el rendimiento para el cual fue adquirido el equipo.
- **Catastrófico (5):** Perdida de la producción sobre 60 %.
 - **Severo (4):** Perdida de la producción sobre 50 %.
 - **Moderado (3):** Perdida de la producción sobre 40 %.
 - **Menor (2):** Perdida de la producción sobre 30 %.
 - **Insignificante (1):** Perdida de la producción bajo 30 %.

- **Consecuencias del Fallo:** Categoría referida al mayor costo de los componente críticos analizables (Motor, diferencial, transmisión, mandos finales, sistemas hidráulicos, etc.)
 - **Catastrófico (5):** Coste de reparación 15 % del valor de equipo.
 - **Severo (4):** Coste de reparación igual o mayor a la pauta de mantenimiento más alta.
 - **Moderado (3):** Coste de reparación igual o mayor al 90 % de pauta más alta.
 - **Menor (2):** Coste de reparación igual o mayor al 80 % de pauta más alta.
 - **Insignificante (1):** Coste de reparación igual o mayor al 70 % de pauta más alta.

Con el objetivo de agilizar y optimizar el cálculo de la " criticidad de muestreo', se excluyeron aquellos equipos que tuvieran un bajo impacto en la producción, un valor económico inferior al 10 % del equipo de mayor valor, y aquellos cuya reposición fuera inmediata, en caso de un desperfecto mayor. Los equipos excluidos incluyen: camionetas, grúas horquillas de bajo valor y camiones de bajo tonelaje. De esta forma, el cálculo se realizó sobre un total de 218 equipos, que representa el 41.2 % del total de equipos gestionados por la empresa.

Posteriormente, con los datos de criticidad, se procedió a evaluar cada equipo en una matriz de criticidad en Figura 33, definida mediante la ley de Pareto (80-20), con la finalidad de clasificar la criticidad de los equipos de acuerdo con los resultados obtenidos.

	1	2	3	4	5	NO APLICA
1	1	2	3	4	5	EVALUACION PARTICULAR
2	2	4	6	8	10	EQUIPO CRITCO MUESTREABLE
3	3	6	9	12	15	
4	4	8	12	16	20	
5	5	10	15	20	25	
6	6	12	18	24	30	

Figura 33: Evaluación de Criticidad

Fuente: Elaboración propia

De esta forma, se logró obtener un sistema metódico para identificar los equipos que deben ser considerados para los subsecuentes análisis. Asimismo, y continuando con el objetivo de cerrar brechas para mejorar la gestión de fluidos en los activos, se realizó un levantamiento y análisis a nivel nacional de información relativa a estos equipos.

El levantamiento de información comenzó con análisis funcionales organizados por: tipo de equipo y contrato. A través de estos análisis, se identificaron de manera clara las condiciones operativas,

tanto ambientales como del terreno, así como las funciones principales y secundarias de los equipos, incluyendo sus respectivos requerimientos de rendimiento. Además, se evaluó el entorno operativo y su impacto en las funciones y componentes críticos susceptibles de muestreo. Finalmente, se identificaron posibles modos de falla. Toda la información recopilada en estos documentos fue estructurada para responder a las siete preguntas clave del *Reliability-Centered Maintenance* (RCM), lo que permitió un acceso ágil y eficiente a esta información esencial para la gestión de los equipos, disponible para quienes la necesiten.

De manera paralela, se llevó a cabo una exhaustiva revisión de los manuales técnicos de los equipos identificados, complementada con la recopilación de información directamente del personal en terreno. El objetivo de esta actividad fue identificar los componentes críticos susceptibles de muestreo, así como los fluidos utilizados en la práctica, contrastándolos con los recomendados en los manuales técnicos, todo esto considerando las condiciones operacionales reales de los activos. Este análisis permitió identificar con claridad aquellos equipos que requerían un enfoque particular debido al uso de fluidos incorrectos, los cuales podrían generar condiciones de base adversas. Esto último fue clave para prevenir discrepancias que pudieran afectar la precisión de los análisis posteriores o comprometer la disponibilidad de los equipos, debido a fallas de carácter catastrófico.

Esta información fue organizada en bases de datos diseñadas para mantenerla estructurada y fácilmente analizable, como se ilustra en las figuras 56 y 57, que muestran extractos representativos de las bases de datos reales. Este enfoque permitió identificar con precisión todos los componentes que debían ser analizados en los *Equipos Críticos Muestreables* (ECM), así como determinar los parámetros específicos que requerían monitoreo para cada uno de ellos.

Posterior a este levantamiento de información, y continuando con el enfoque de identificar todas las necesidades particulares y generales de los equipos, se llevó a cabo un análisis de efectos del modo de falla y su criticidad (FMECA). La finalidad de esto realizado en conjunto con el personal en terreno y tomando en cuenta las necesidades específicas de cada faena, es identificar los modos de fallas que podrían ser resueltos mediante análisis de fluidos. Resultando en la cuantificación del impacto de este proyecto para los equipos, al momento de prever situaciones críticas de estos.

Con la información recopilada, y con el objetivo de seleccionar la mejor opción en cuanto a laboratorios para análisis de fluidos, se realizó un estudio comparativo entre los principales candidatos. De la amplia oferta de laboratorios disponibles en Chile, se identificaron cuatro como

las opciones más destacadas, considerando su trayectoria, experiencia previa de colaboración y los beneficios específicos que ofrecían en sus servicios.

En particular, se llevó a cabo un análisis comparativo tanto cuantitativo como cualitativo de las ofertas presentadas por diversos laboratorios, con el objetivo de identificar la opción más adecuada entre Finning, representante de Caterpillar en Chile y otros países; Mobil, filial de Copec; Luval, filial de Valvoline y Cummins Chile; y, finalmente, Esmax, representante de Petrobras y Lubrax.

- **Tipos de pruebas que realizan:** Se evaluó la variedad de pruebas disponibles, su capacidad para cubrir las necesidades específicas de los equipos críticos y la calidad de los resultados obtenidos.
- **Método de envío de muestras:** Se consideró la logística y la eficiencia en el proceso de envío, evaluando tanto los tiempos de tránsito como las condiciones necesarias para garantizar la integridad de las muestras.
- **Tiempo transcurrido desde la recepción de la muestra hasta la emisión del informe:** Se analizó la rapidez con la que los laboratorios procesan las muestras y entregan los informes, lo cual es crucial para la toma de decisiones oportunas en el mantenimiento de los equipos.
- **Formato de los informes y resultados:** Se verificó el formato en que se entregan los resultados, asegurándose de que sean compatibles con las necesidades de la empresa y fáciles de interpretar para el equipo de mantenimiento.
- **Accesibilidad y facilidad de lectura de los informes:** Se evaluó si los informes son de fácil acceso, lectura e interpretación, lo cual es fundamental para asegurar una correcta utilización de los datos en la toma de decisiones.
- **Asistencia técnica ofrecida por el laboratorio:** Se examinó el nivel de soporte técnico disponible, como la disponibilidad de consultas, aclaraciones y soporte adicional para interpretar los resultados.
- **Controles de calidad y normativas:** Se revisaron los controles de calidad implementados por los laboratorios, las normativas bajo las cuales operan y las certificaciones o homologaciones que aseguran la fiabilidad y precisión de los análisis realizados.

Dado que este análisis presenta información confidencial para las empresas involucradas, no se incluirá dentro del presente documento. No obstante, se adelanta que, por razones estratégicas, se decidió trabajar con los laboratorios Esmax y Finning para la realización del análisis de las muestras obtenidas.

Finalmente, como actividad esencial para esta etapa, se realizó el cálculo de la frecuencia de muestreo para los componentes de los equipos seleccionados. Con el objetivo de representar fielmente las necesidades reales de los equipos y aumentar su disponibilidad y confiabilidad, se diseñaron y adaptaron diversos métodos ampliamente utilizados en la industria para calcular y definir la criticidad de los componentes.

En este contexto, se entiende por componente crítico: *'Los componentes críticos de equipos son aquellos elementos o subsistemas dentro de un equipo cuya falla podría tener consecuencias significativas en la seguridad, la operación, la productividad o el costo de mantenimiento. Estos componentes son fundamentales para el funcionamiento general del equipo y, debido a su importancia, requieren atención especial en términos de inspección, monitoreo y mantenimiento.'* La criticidad de un componente se determina considerando factores como:

- **Impacto en la Seguridad:** La posible ocurrencia de lesiones, accidentes graves o situaciones peligrosas como consecuencia de la falla del componente.
- **Impacto en la Operación:** La capacidad del componente para afectar directamente la productividad o detener el funcionamiento del equipo, interrumpiendo operaciones críticas.
- **Costo de Reparación o Reemplazo:** La relación entre el costo asociado a la reparación o reemplazo del componente y el valor de la pauta de mantenimiento más alta del equipo.
- **Impacto en el Mantenimiento:** La influencia de la falla del componente en el incremento de las necesidades de mantenimiento o el riesgo de causar fallas secundarias en otros componentes.

De esta forma, se utilizó el método de *RPN máximo* (Número de Prioridad de Riesgo), que implica seleccionar el valor más alto entre los modos de falla identificados en el FMECA de los componentes de los equipos. Este valor permite priorizar aquellos componentes que podrían beneficiarse del análisis tribológico, anticipando fallas críticas.

En paralelo, se definió una escala de frecuencias de muestreo basada en los valores máximos y mínimos de las pautas de las estrategias de mantenimiento actuales de los equipos. Para esto, se realizó una subdivisión de los intervalos de mantenimiento, en conjunto con personal especializado en los equipos. La escala final quedó estructurada de la siguiente manera:

- **RPN 1-99:** Frecuencia de muestreo cada 4000 horas o 220.000 kilómetros.
- **RPN 100-199:** Frecuencia de muestreo cada 2000 horas o 180.000 kilómetros.
- **RPN 200-299:** Frecuencia de muestreo cada 1000 horas o 120.000 kilómetros.
- **RPN 300-399:** Frecuencia de muestreo cada 500 horas o 60.000 kilómetros.
- **RPN >400:** Frecuencia de muestreo cada 250 horas o 20.000 kilómetros.

Esta metodología permitió garantizar que las frecuencias de muestreo fueran acordes a la criticidad y a las características específicas de cada componente, maximizando así la efectividad del modelo predictivo y asegurando la confiabilidad operativa de los equipos.

7.4. Etapa 2: Creación de Modelo

Para comenzar con esta etapa, la primera tarea a realizar fue definir los costos anuales asociados a la implementación y posterior utilización del programa predictivo. De esta forma, tanto el *CAPEX* como el *OPEX* fueron definidos en esta fase, dado que ya se disponía de toda la información necesaria para su cálculo, permitió identificar desde el inicio la viabilidad del proyecto y contar con claridad sobre los ajustes que podrían ser necesarios.

En este sentido, dentro del *CAPEX* (costos de implementación) se consideraron los siguientes costos:

- **Análisis Funcional Nacional:** Actividad esencial para conocer las condiciones operativas de los equipos y sus necesidades de mantenimiento.
- **Capacitaciones para Toma de Muestras:** Necesarias para asegurar la integridad en la toma de muestras y evitar la introducción de errores que puedan generar resultados incorrectos.
- **Actividades Administrativas:** Conjunto de actividades que permiten avanzar en el proyecto, tales como el levantamiento de información, la creación de formularios e instructivos, el desarrollo de dashboards, el levantamiento de datos sobre fluidos, el análisis de criticidad y el cálculo de límites condenatorios, entre otros.
- **Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad Nacional:** Actividad destinada a detectar aquellos componentes cuyos fallos pueden anticiparse mediante el análisis de fluidos, contribuyendo a mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos.
- **Herramientas e Insumos:** Elementos básicos necesarios para realizar la toma de muestras de fluidos de forma correcta y segura, tanto para el técnico mantenedor como para el entorno, respetando siempre las normativas HSEQ. Se consideraron, por ejemplo: bombas extractoras para toma de muestras, guantes de nitrilo y paños de limpieza. Aunque en este análisis no se incluyeron antiparras—puesto que cada taller de la empresa cuenta con ellas para sus colaboradores—es fundamental disponer de este equipo durante las operaciones.

Por otro lado, dentro de los costos asociados a mantener en operación del programa de mantenimiento predictivo (*OPEX*), se consideraron los siguientes elementos:

- **Costes de Kit de Muestras:** Gastos relacionados con la adquisición y reposición periódica de los kits necesarios para la toma de muestras, garantizando que se mantengan en condiciones óptimas para la obtención de resultados confiables.
- **Costes de Envío:** Gastos logísticos asociados al transporte de las muestras desde las instalaciones de la empresa hasta el laboratorio de análisis, asegurando el cumplimiento de los tiempos y condiciones requeridas para preservar la integridad de las muestras.
- **Mano de Obra:** Costos laborales correspondientes al personal encargado de la recolección, manejo y envío de las muestras, así como al personal de mantenimiento y soporte técnico que interviene en la operación del programa predictivo.
- **Insumos:** Gastos relacionados con la adquisición de materiales complementarios y consumibles utilizados durante la toma y el análisis de las muestras, tales como productos de limpieza, guantes, embalajes y otros elementos necesarios para el correcto desarrollo del proceso.

Para continuar con el proyecto y asegurar una correcta ejecución de las tomas de muestras, se diseñaron instructivos para la toma de muestras de fluidos, reuniendo las mejores prácticas aprobadas por la industria para su realización de forma eficiente y segura. Estos instructivos, tienen como objetivo instruir a los colaboradores de la información necesaria para localizar los mejores puntos de muestreo en los componentes de los equipos y explicar la secuencia de pasos para realizar de forma efectiva la toma de muestra sin comprometer los datos.

Posteriormente, se procedió a diseñar toda la metodología necesaria para poder llevar a cabo este plan. Diseñando los diferentes flujos de procesos y organizando la información relevante de los equipos, proyectando métodos que garantizaran su alimentación, almacenamiento, protección y fácil accesibilidad.

Para llevar a cabo el diseño de estos flujos de procesos, se tubo que realizar diferentes tareas previas en el camino de este proyecto, como: definir límites condenatorios. Estos límites condenatorios, fueron diseñados utilizando los análisis funcionales realizados en la etapa número 1 de este

proyecto. De este forma se crearon categorías en donde cada equipo con componentes y condiciones operacionales similares pertenecieran a un mismo grupo, con la finalidad de homogeneizar los resultados que pudieran arrojar una interpretación errónea. Todo esto está contenido en una base de datos correspondiente a esta finalidad.

Por otro lado, se definieron acciones correctivas, acciones inmediatas y monitoreo adicional, basándose en las mejores practicas utilizadas en la industria con el objetivo de resolver los problemas que podrían ser detectados mediante análisis de fluidos. En caso de existir alguna desviación dentro de los resultados de análisis, estas acciones, se encuentran en una base de datos que tiene como finalidad que, posterior al análisis del Script, este recomiende las acciones optimas para resolver las desviaciones en caso de ser necesarias.

El flujo de trabajo (Ver Imagen numero: 58 y 59) comienza en la toma de muestra que estará inserta como actividad dentro de la pauta de mantenimiento del respectivo equipo, cada componente con su frecuencia específica, como se menciona anteriormente. En donde, el analista deberá realizar una programación para su ejecución, junto con el resto de tareas como se lleva hasta ahora. Subsecuentemente, el encargado de mantenimiento gestionara la toma de muestra, asignando un mecánico responsable para su ejecución. Este deberá realizar tareas de mantenimiento, asegurando su correcta ejecución, dentro de estas tareas, se encuentra: realizar la toma de muestra de fluido (Aceite), según el protocolo.

Posteriormente, el encargado de mantenimiento, realizara el envío de la muestra al respectivo laboratorio, recordando que por motivos propios de la empresa, se trabajara con los laboratorios Fining y Esmax. En este contexto, el encargado de mantenimiento, creara una solicitud de trabajo en el Software Fractal (CMMS, utilizado para la gestión de activos), detallando: Fecha de toma de muestra, numero de formulario del laboratorio y una foto de la misma. Esto tiene como finalidad, garantizar una optima gestión de datos y de los procedimientos posteriores. De esta forma, se evita la perdida de información valiosa para la empresa y las gestiones de mantenimiento, con el objetivo de evitar casos en donde, la muestra se extravié tanto para el laboratorio como para REPORT, resultando en la no recepción del informe de la muestra.

Dado que se trabajara con dos laboratorios de análisis de muestras distintos mencionados anteriormente. Cada laboratorio realiza la entrega del informe mediante dos formas: una vía correo electrónico para el ingeniero de confiabilidad, al jefe de planificación de REPORT y a

un correo propio de UCEM de REPORT (Creado con fines de automatización de descarga de informes de laboratorios) y la segunda mediante paginas webs: SOSCAT en el caso de Fining y CODDI para el laboratorio Esmax.

Ya que, se generaban informes diferentes, con la finalidad de optimizar recursos, se introdujo al flujo de trabajo en desarrolló un método y subsecuente Script (secuencia de comandos), que permiten procesar la información más importante de los análisis de fluidos y almacenarla de forma unificada, facilitando una interpretación clara, con el objetivo de realizar acciones correctivas inmediatas y futuras, en caso de ser necesarias. Cabe destacar que este proceso se diseñó de forma semiautomatizada, para brindar una total independencia del personal especializado en la mayoría de los casos, requiriendo su intervención únicamente en situaciones excepcionales que demandaran una segunda interpretación u acciones críticas, ver imagen 60, 61, 62, 63, en los anexos.

El Script, realizara la descarga de los informes de las paginas webs mencionadas, procesara y filtrara datos, para posteriormente actualizar los limites condenatorios de la categoría correspondiente. En caso de existir desviaciones en los resultados de los análisis de fluidos, se enviara un correo al ingeniero de confiabilidad en donde se detallara: el equipo, el componente, parámetros fuera de rango y las acciones recomendadas a seguir para resolver dichas desviaciones. En el caso de que estas acciones se validen por el ingeniero de confiabilidad, se reenvía el correo al analista para programación de orden de trabajo. El analista tendrá como tarea generar una orden de trabajo a partir de la solicitud de trabajo existente creada previamente por el encargado de mantenimiento.

Posteriormente, en caso de que estas acciones no sean validadas por el ingeniero de confiabilidad, se encuentran dos posibles situaciones: primero que las ultimas 3 muestras arrojen que los mismos parámetros estén fuera de limite, en donde se deberá agendar una reunión con analista de mantenimiento y encargado de mantenimiento, para definir acciones a realizar. Mientras que en la segunda situación, se podrá encontrar que la muestra se desvié drásticamente respecto a la anterior, por lo que se deberá solicitar una contra muestra, por sospecha de contaminación. Finalmente, en el caso de no haber desviaciones en el análisis de fluidos, se enviara un correo al analista de mantenimiento para cerrar ST, adjuntando: motivo y numero de muestra interna.

7.5. Etapa 3: Lanzamiento Piloto

En esta etapa se llevo a cabo, los primeros casos de prueba de este proyecto. Primero se designaron los limites condenatorios, en donde se creo una base de datos auxiliar definiendo el limite condenatorio para cada componente critico muestreable de cada ECM (ver 34, 35, 36, 37, 38), de esta forma si dos equipos en dos faenas comparten condiciones operacionales, respecto a carga de trabajo, condiciones ambientales, entre otras, pueden compartir limites condenatorios para sus sistemas críticos muestreables. Es por ello que se deben revisar y actualizar constantemente los respectivos análisis funcionales.

Componente	Sigla	Descripción	Aplicación	
MOTOR	M1	CUMMINS NACIONAL 4.5-9.0	Nacional- Continental	
	M2	CATERPILLAR 7.1-3-0	Nacional- Continental	
	M3	GENERADORES NACIONAL	Nacional- Continental	
	M4	CUMMINS NACIONAL QSM 11	Nacional- Continental	
	M5	CUMMINS QSM 11 MARINE		Nacional- Continental
		DAEWOO V158TIM		Nacional- Continental
		SCANNIA 550HP		Nacional- Continental
		CAT 3406		Nacional- Continental
	M6	CATERPILLAR 8.8-18	Nacional- Continental	
	M7	MOTOR GH; BAREBORAS	Nacional- Continental	
	M8	CAMIONES	Nacional- Continental	
	M9	DOOSAN L126TIH		Nacional- Continental
DOOSAN L156TIM		Nacional- Continental		
MERCEDEZ BENZ 175HP		Nacional- Continental		

Figura 34: Catalogo Limite Condenatorio Auxiliar Motor

Fuente: Creación Propia

Componente	Sigla	Descripción	Aplicación
TRANSMISION	T1	PORTACONTENEDOR NACIONAL	Nacional- Continental
	T2	CATERPILLAR NACIONAL CONTINENTAL	Nacional- Continental
	T3	GH NACIONAL, BARREDORAS	Nacional- Continental
	T4	CATERPILLAR GUARELLO	Nacional- Guarello
	T5	CONTRAMARCHA	Nacional- Continental
	T6	CAMIONES	Nacional- Continental

Figura 35: Catalogo Limite Condenatorio Auxiliar Transmisión

Fuente: Creación Propia

Componente	Sigla	Descripción	Aplicación
MANDOS FINALES	D1	PORTACONTENEDOR NACIONAL	Nacional- Continental
	D2	CATERPILLAR NACIONAL CONTINENTAL	Nacional- Continental
	D3	GH NACIONAL	Nacional- Continental
	D4	CATERPILLAR GUARELLO	Nacional- Guarello
	D5	CONTRAMARCHAS NACIONAL	Nacional- Continental
	D6	CAMIONES	Nacional- Continental

Figura 36: Catalogo Limite Condenatorio Auxiliar Mandos Finales

Fuente: Creación Propia

Componente	Sigla	Descripción	Aplicación
SISTEMA HIDRAULICO	H1	PORTACONTENEDOR NACIONAL	Nacional- Continental
	H2	CATERPILLAR NACIONAL CONTINENTAL	Nacional- Continental
	H3	CAMIONES NACIONAL	Nacional- Continental
	H4	GH NACIONAL	Nacional- Continental
	H5	CATERPILLAR GUARELLO 9.3	Nacional- Guarelo

Figura 37: Catalogo Limite Condensatorio Auxiliar Sistemas Hidráulicos

Fuente: Creación Propia

Componente	Sigla	Descripción	Aplicación
DIFERENCIALES	D1	PORTACONTENEDOR NACIONAL	Nacional- Continental
	D2	CATERPILLAR NACIONAL CONTINENTAL	Nacional- Continental
	D3	GH NACIONAL	Nacional- Continental
	D4	CATERPILLAR GUARELLO	Nacional- Guarelo
	D5	CONTRAMARCHAS NACIONAL	Nacional- Continental
	D6	CAMIONES	Nacional- Continental

Figura 38: Catalogo Limite Condensatorio Auxiliar Diferenciales

Fuente: Creación Propia

Cabe destacar que dada la frecuencia con la que se realizan cambios de aceite y la frecuencia con la que se toman muestras de aceite en los componentes de los equipos, que son intervalos cortos, se establecerán límites de tipo SOFI (6.4.5) con un factor de normalización de 1. Como en la gran mayoría de equipos no es necesario ser rellenado, el factor de normalización se obviara.

Asimismo, los límites condensatorios calculables son solo para los factores que cuya concentración dependen del tiempo (ver 39). Debido a que, por ejemplo: el índice de viscosidad y el índice de suciedad, son extraídos directamente de la norma aplicable a cada fluido, siguiendo las recomendaciones del fabricante.

Hollín	Nitración	Estaño (Sn)
TAN	Hierro (Fe)	Sodio (Na)
TBN	Aluminio (Al)	Molibdeno (Mo)
Índice PQ	Cromo (Cr)	Sílice (Si)
Oxidación	Cobre (Cu)	Plomo (Pb)
Sulfatación	Níquel (Ni)	

Figura 39: Elementos a Calcular Limites Condensatorios

Fuente: Creación Propia

Entonces, para que estos límites condenatorios sean compartidos se debe cumplir: igualdad en el tipo de componente, similitud de características y condiciones operacionales. Por lo que, es imperativo destacar que el cálculo de estos límites condenatorios, es un proceso iterable y que solo corresponde para aceites lubricantes e hidráulicos, siendo sus fórmulas:

- **Límite de Alarma (LA):** Suponiendo una distribución normal, se calcula como:

$$LA = \bar{x} \pm \sigma \quad (11)$$

Donde:

- LA : Límite de Alarma
- \bar{x} : Promedio de los resultados de la propiedad a monitorear.
- σ : Desviación estándar de los resultados.

Este límite representa el 68 % de todas las lecturas posibles, lo que indica un intervalo de valores considerados normales.

- **Límite Condenatorio (LC):** Asumiendo una distribución normal, se define como:

$$LC = \bar{x} \pm 2\sigma \quad (12)$$

Donde:

- LC : Límite Condenatorio
- \bar{x} : Promedio de los resultados de la propiedad a monitorear.
- σ : Desviación estándar de los resultados.

Este límite incluye el 95 % de todas las mediciones posibles, permitiendo la identificación de valores críticos.

Para finalizar la etapa 3 de este proyecto, se utilizaron casos de prueba de ciertos equipos que presentaron fallas, en donde se realizaron análisis para detenerlos o aplicar acciones correctivas o preventivas. En donde, se comenzó a aplicar la metodología desarrollada en este proyecto, ofreciendo los primeros resultados técnico-económicos, para su análisis posterior.

Es importante tener en cuenta que muchas de estas pruebas, especialmente el análisis elemental que mide elementos abundantes en la naturaleza como sílice, aluminio, hierro y potasio, no ofrecen un origen determinístico. Esto significa que, de manera aislada, estos elementos no pueden atribuirse a una falla u origen específico. Por lo que, para identificar su fuente, es necesario considerar un panorama más amplio que incluya las distintas combinaciones y proporciones de estos elementos presentes en el análisis.

Para concluir esta etapa, se crearon flujos de trabajos (Anexo numero 64 y 65) especiales para componentes de motor y sistemas de engranajes, que son los más propensos a tener estas situaciones. En donde se consideran, las diferentes combinaciones para recomendar las acciones correctivas o preventivas necesarias. Es imperativo mencionar, que se instruyo a el ingeniero de confiabilidad, el cual sera responsable de detectar estas anomalías y lograr llevar a cabo las acciones necesarias según el caso.

8. Resultados y Discusión

8.1. Resultados

En esta sección se presentaran los principales resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto, que tubo una duración de 6 meses en el año 2024. Considerando que, la principal finalidad del estudio, es visualizar la viabilidad técnica-económica del plan de mantenimiento predictivo para equipos críticos a nivel nacional gestionados por la empresa REPORT.

Con respecto al desarrollo de la etapa 0, titulada Auditoria interna, durante el periodo de estudio se detecto una falta de análisis de fluidos teniendo un total de 576 equipos, siendo 247 de ellos críticos, según la información obtenida desde la empresa. En donde solo el 19 % de los equipos críticos presentaban análisis de fluidos de forma reactiva, esto quiere decir, que se tomaba una muestra de fluidos una vez presentada la no disponibilidad del mismo.

Ademas, se identifico una nula gestión de resultados, donde, la gran mayoría de los equipos críticos no presentaban algún análisis de fluido previo, demostrando una inexistencia de estándares para esta practica, esto significa, que existía una falta de protocolos para la toma de muestras e identificación de equipos, que requieren tener análisis de fluidos, asimismo una falta de gestión de los resultados de análisis esporádicos.

Finalmente se detecto una falta de gestión de la información, retratado en el desconocimiento de los fluidos utilizados en los equipos, fluidos recomendados por el fabricante de los equipos o incluso la criticidad del equipo referida a la gestión del mantenimiento.

En la etapa 1, donde el objetivo principal fue el levantamiento de información. Se logro detectar 178 equipos críticos muestrables (ECM) que requerían análisis de fluidos en sus componentes. Como se menciono anteriormente ECM, son equipos que reúnen una serie de características determinadas mediante la matriz de criticidad, creada específicamente para esta etapa. Consecutivamente, se detectaron 937 componentes críticos muestrables (CCM), utilizando los 68 análisis funcionales bajo metodología RCM creados en el desarrollo de esta etapa.

Por otro lado, se logro la detección de 620 fluidos utilizados en los equipos y su análisis versus fluidos recomendados por el fabricante , de esta manera se logro la detección de equipos con brecha en su gestión de mantenimiento donde se creó un plan y procedimiento para resolver de la mejor manera las brechas y condiciones ocasionadas, por esta falta de gestión.

Paralelamente se desarrollaron 68 análisis de criticidad y efectos del modo de falla, realizados por tipo de equipo y faena, logrando mediante el análisis de RPN máximo, la definición de 937 frecuencias de muestreo integradas en las estrategias de mantenimiento respectivas.

Para concluir con esta etapa, de los 4 laboratorios considerados para su investigación, por ser candidatos principales para realizar las tareas de análisis de fluidos, se seleccionaron dos: Fining y Esmax. Cuyos motivos de selección fueron presentar mayores beneficios para la empresa y, por una decisión estratégica de REPORT cuyas razones contienen información sensible que no pueden ser expuestas en este informe.

Respecto a la etapa 2 de este proyecto se describieron anteriormente los conceptos CAPEX y OPEX. Que dieron como resultado los costos iniciales necesarios para la creación efectiva del plan de mantenimiento predictivo, gasto que hace a la suma aproximada de cinco millones ochocientos mil y fracción, que reúne el costo total de todas las actividades para el diseño y creación del plan de mantenimiento. Mientras que los costos necesarios para la mantención del plan de forma anual, es de quince millones y fracción, valor que reúne los insumos como: kit de muestras, servicios de transportes, insumos de protección personal y costos de actividades tales como el costo de horas hombre (HH) para la toma de muestra necesarios para llevar a cabo el plan de mantenimiento. Esta actividad fue esencial para posteriormente calcular el retorno de inversión y efectividad de este proyecto, para mayores detalles ver imagen 66 hasta imagen 75 en los Anexos de este informe.

También se llevó a cabo el desarrollo de una base de datos de resultado de análisis de muestra unificada para el almacenamiento, de fácil acceso y resguardo de tal valiosa información. Para llevar a cabo esto, se desarrolló un Script, con la finalidad de que este proceso y posterior análisis inicial sea de forma autónoma, sin requerir recursos como HH adicionales.

Por otro lado, se diseñó una hoja de vida para cada equipo y componente, con el objetivo de almacenar información relevante de los equipos, garantizando un fácil acceso a esta. La información contenida es: fluidos recomendados y utilizados a nivel histórico, cambios de componentes importantes junto a sus horas de uso (como: motor, transmisión, diferencial, etc.), entre otras informaciones.

Cabe destacar que se desarrollaron protocolos e instructivos de toma de muestra de fluidos, con el propósito de realizar este proceso de la forma más segura y óptima posible. La información contenida en estos instructivos detallan claramente como ubicar el mejor punto de muestreo en la gran diversidad de equipos existentes, además, instruye a los colaboradores en lo que respecta la correcta selección de insumos, herramientas necesarias y su utilización, para llevar a cabo este procedimiento. Respetando siempre la seguridad tanto del personal encargado de su realización como del medio ambiente.

Por último, se definieron más de 260 acciones correctivas inmediatas y programables a realizar, cuando se detecte una desviación de resultados de muestra. Para llevar a cabo estas acciones se creó un flujo de trabajo que detalla cada uno de los pasos a seguir dentro del plan de mantenimiento diseñado. En adición a lo anterior, y como último resultado obtenido durante esta etapa, se definieron 32 límites condenatorios, donde se agruparon equipos con similares características tanto técnicas como operacionales.

En la etapa número 3 se llevó a cabo el lanzamiento piloto de este proyecto, comenzando con la asignación de 937 límites condenatorios correspondientes a los componentes de los equipos determinados anteriormente.

Por otro lado, se aplicó el modelo desarrollado a un grupo de equipos de prueba, de los cuales, algunos de ellos presentaron desviaciones en los resultados de los análisis de fluidos. Sin embargo, podemos decir que, los resultados obtenidos fueron positivos tanto para el proyecto como para la empresa, ya que se logró detectar a tiempo fallas catastróficas, como en el caso de un motor Cummings QSB 6.7 perteneciente a un porta contenedor empty Ferrari 25K8, operado en el Depósito de Contenedores de San Antonio, donde la falla se anticipó 500 horas antes de su manifestación crítica. Sin embargo, en este equipo las recomendaciones del plan de mantenimiento no fueron implementadas debido a la inmadurez del proyecto, constituyendo un caso de éxito para el proyecto al predecir la falla, aunque no necesariamente para la empresa.

Además, se detectaron desviaciones en el funcionamiento de las bombas hidráulicas del sistema de toma de fuerzas de los camiones MAN TGS 26480 BLS 6X4, utilizados en la faena de AES GENER en Mejillones para el transporte de cenizas. La aplicación de la metodología permitió identificar que una inadecuada manipulación del equipo provocaba un sobreesfuerzo severo, lo que aceleraba el desgaste de sus componentes. Una vez detectada esta desviación, permitió a la UCEM generar un plan de acción para corregir de manera optima este problema, una de las medidas utilizadas para este fin fueron: gestionar aceites con mayor porcentaje de Zinc y mayor presencia de aditivos desmulsificadores juntos con protección de aditivos AW para evitar mayores desgastes en el equipo.

Se aplicó el modelo para predecir fallas funcionales en los diferenciales de los cargadores frontales CATERPILLAR 950-GC, utilizados en Portuaria Cabo Forward, San Vicente. Equipos con un historial prolongado de fallos e indisponibilidad significativa. Gracias al flujo de trabajo implementado, se logró detectar una degradación incipiente del fluido, atribuible a sobreesfuerzos y a contaminación por agentes ambientales, expuesto en la Figura 40, donde se evidencia un incremento exponencial de ciertos contaminantes.

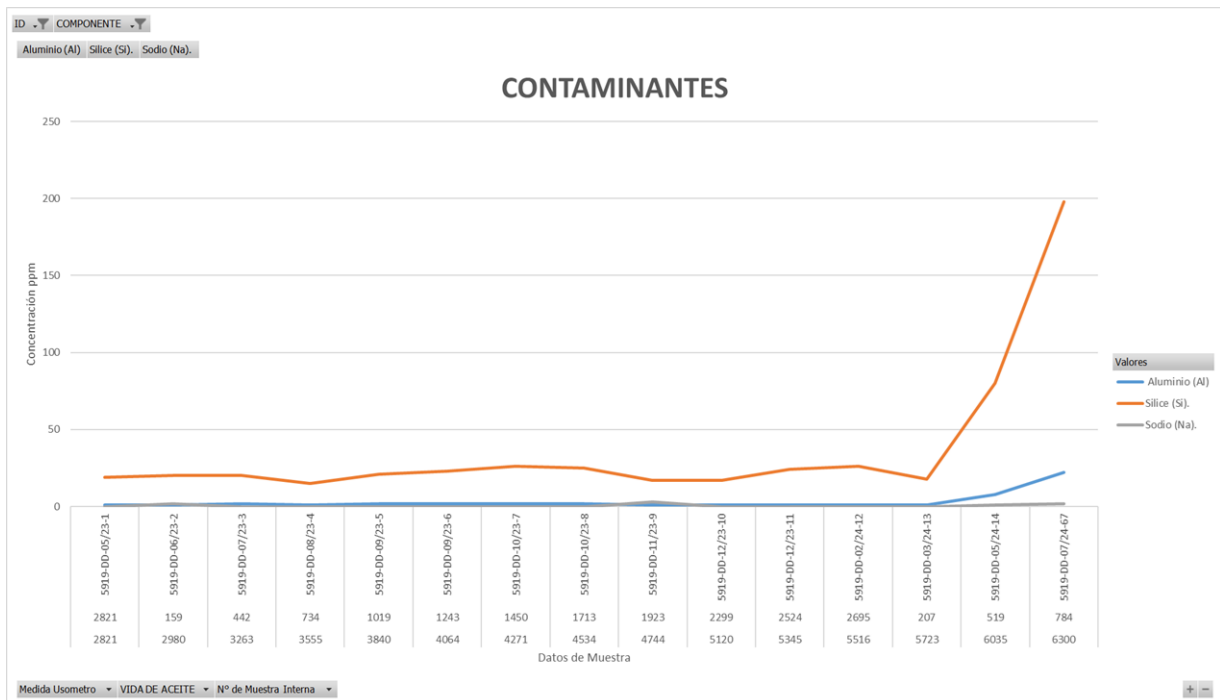


Figura 40: Presencia de Contaminantes en Diferencial Delantero Cargador Frontal 5919

Fuente: Elaboración Propia

Estos agentes ambientales, principalmente Silice y Aluminio, generaron un desgaste significativo en los diferentes diferenciales, como se aprecia en las figuras 41 y 42, en donde, con 6000 horas de uso se presento grandes concentraciones de Hierro en sus resultados, visibles tanto a nivel de espectrofometria (conteo ppm) como en sus altos niveles de Indice PQ.

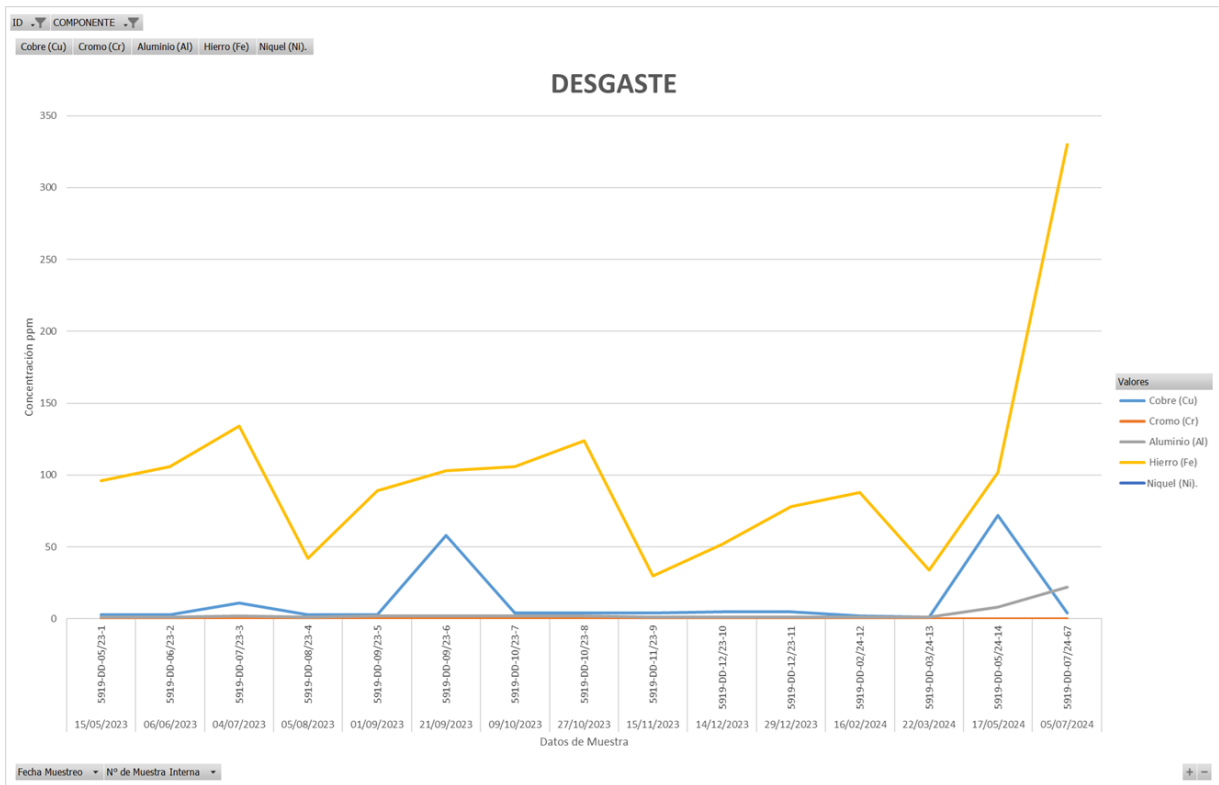


Figura 41: Conteo de Partículas de Desgaste en Diferencial Delantero de Cargador Frontal 5919

Fuente: Elaboración Propia

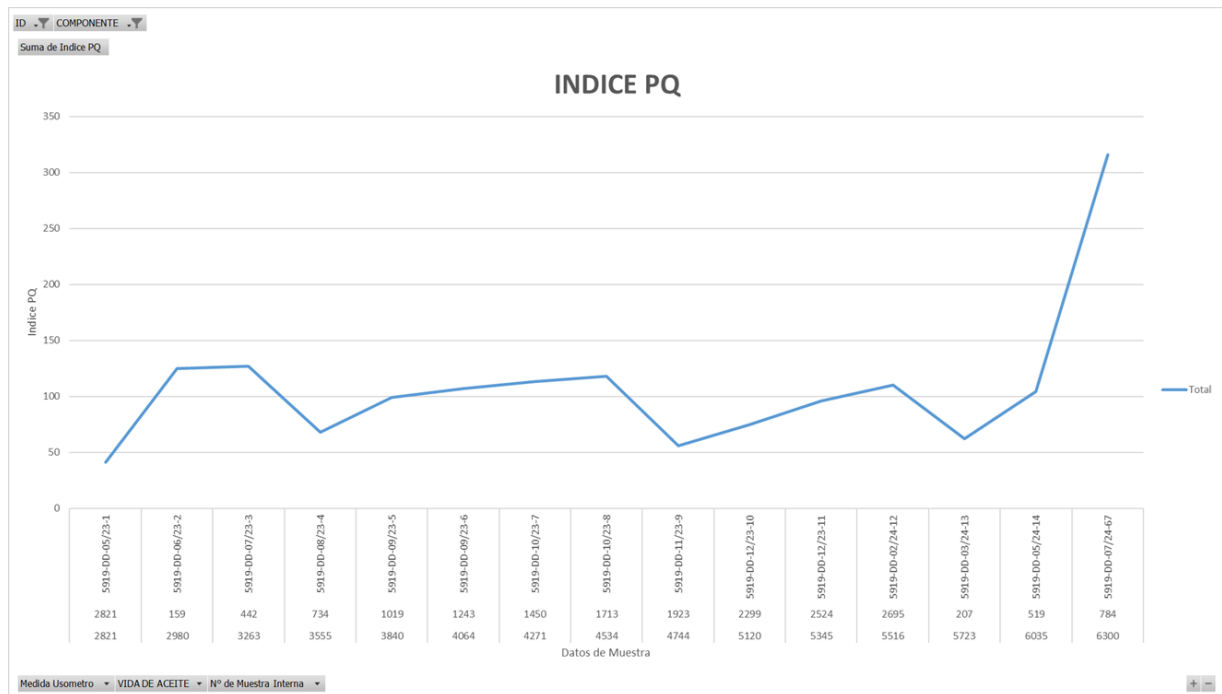


Figura 42: Índice PQ Diferencial Delantero Cargador Frontal 5919

Fuente: Elaboración Propia

También, el modelo se utilizó para mantener un monitoreo continuo en un gran grupo de equipos, entre ellos el activo hermano del porta contenedor Ferrari mencionado anteriormente, que opera en el mismo recinto pero con menor antigüedad. Cuyo propósito, fue prevenir la falla catastrófica del motor y prolongar su vida útil (12,000 horas según el fabricante), o al menos, evitar una falla anticipada, como ocurrió en el caso del equipo previo, cuyo motor presentó fallas funcionales aproximadamente a las 8,000 horas. Otro ejemplo relevante fue el monitoreo continuo del motor de dos retroexcavadoras utilizadas en la creación de infraestructura para la lixiviación en BHP SPENCE, Antofagasta. Equipos con menos de 1,000 horas de vida operativa son particularmente susceptibles a fallas prematuras o a lo que se denomina "mortalidad infantil". Por lo que, se busca corregir de manera anticipada cualquier condición o defecto sin comprometer la vida útil futura del activo ni su disponibilidad productiva.

Para concluir con esta última etapa de este proyecto, como último resultado específico obtenido, se desarrollaron dos metodologías para casos excepcionales. Estas metodologías son esenciales cuando se presenta una combinación de desviaciones en los resultados, tanto en motores como en sistemas de engranajes, elementos que son particularmente propensos a estas situaciones. De

esta manera, el personal contará con todas las herramientas necesarias para identificar estos casos, determinar su origen y generar las acciones óptimas para su corrección en cualquiera de sus etapas. Dichas metodologías se encuentran documentadas como flujos de procesos demostrativos en la sección de anexos (64 y 65).

8.2. Discusión

Como uno de los principales logros del presente proyecto para la empresa, destaca la creación e implementación de la "Matriz de Criticidad ECM". Esta herramienta es un sistema funcional basado en la norma ISO 14224, diseñado para clasificar la criticidad de los diversos equipos, permitiendo evaluar múltiples parámetros y evidenciar el impacto real que la indisponibilidad de un equipo tiene en la operación y en la empresa.

Este método permite a la empresa evaluar de forma integral la criticidad de cada equipo, superando la metodología anterior basada únicamente en criterios económicos. Con la implementación de la Matriz de Criticidad ECM, la gestión del mantenimiento se fortalece considerablemente, facilitando la detección temprana de aquellos equipos que requieren una atención especial debido a su alto impacto económico, operacional y medio ambiental.

También, este proyecto permitió identificar brechas y condiciones adversas en los equipos, derivadas de una inadecuada gestión de los fluidos en el mantenimiento, las cuales se detallan a continuación:

- El 15 % del total de equipos presenta fluidos hidráulicos que no cumplen con las especificaciones requeridas.
- En el 8 % de los equipos con transmisión, se utilizan fluidos que no son los adecuados para su correcto funcionamiento.
- En el 13 % del total de equipos, el tipo de aceite de motor empleado es desconocido, lo que dificulta la evaluación de su eficacia y compatibilidad.
- En el 12 % de los equipos con diferencial, los fluidos utilizados son indeterminados, impidiendo un control adecuado de su desempeño.

Es evidente que el uso de fluidos incorrectos impacta negativamente tanto en la operación como en la duración estimada de los equipos, reduciendo su disponibilidad y vida útil. Asimismo, esta práctica genera una contaminación del sistema y puede provocar daños irreparables en los componentes, aumentando el riesgo de condiciones inseguras para los colaboradores en terreno, especialmente en el caso de los sistemas hidráulicos. Por tanto, se concluye que, una inadecuada

gestión en los fluidos, es el origen potencial de problemas y condiciones significativas para aquellas empresas que gestionan activos.

En toda empresa cada unidad es susceptible a cometer ciertos errores; sin embargo, en el ámbito del mantenimiento, un error no solo tiene implicaciones económicas —como se observó en casos donde se generaron condiciones de funcionamiento adversas por la contaminación de transmisiones y sistemas hidráulicos con fluidos incorrectos—, sino que también puede representar riesgos para la seguridad del personal y para el medio ambiente. Por ello, es fundamental minimizar estos peligros al máximo, teniendo presente que el mayor recurso de una organización es la información.

Bajo este contexto, es fácil ver que durante el desarrollo del proyecto se introdujeron sistemas para organizar y almacenar información, tanto de las condiciones operacionales de los equipos, como información valiosa de estos. De esta forma, se implementaron distintas bases de datos que permiten: pleno control de fluidos en equipos críticos, facilitar identificación de desviaciones en los resultados y facilitar futuras homologaciones de fluidos en caso de ser necesario. Además, de tener fácil acceso a información como el contexto operacional de los equipos, sus modos de fallas detectados y las variables críticas que impactan a la operación.

Por otro lado, y en línea con la gestión de bases de datos, se implementó un proceso semi-automatizado, mediante un Script, en el mantenimiento predictivo basado en análisis tribológicos, lo que permitió redistribuir recursos, como las horas-hombre, a otras actividades, donde sea necesarias.



Figura 43: Resumen Flujo Mantenimiento Predictivo

Fuente: Elaboración Propia

Este enfoque permite llegar a casos específicos, como se muestra en la siguiente tabla ver imagen 44, donde se puede identificar de forma precisa la desviación en el fluido y definir acciones correctivas específicas para cada situación.

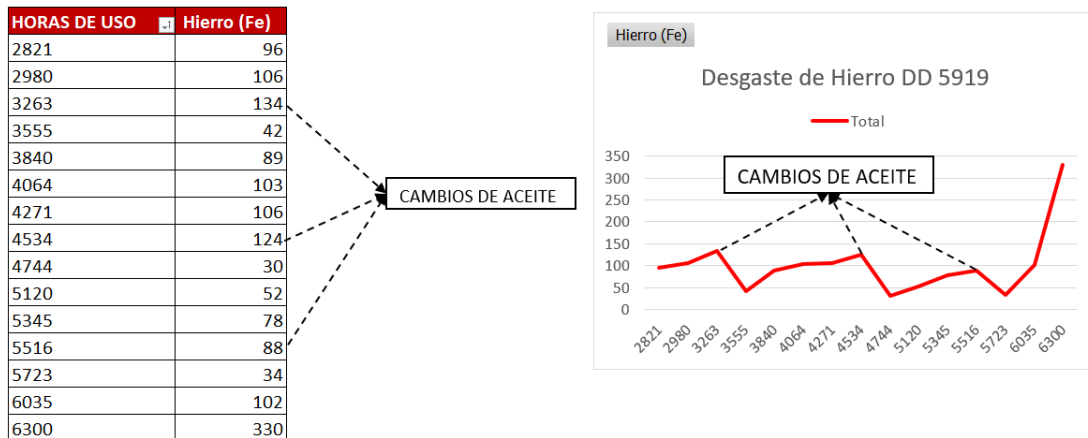


Figura 44: Desgaste de Hierro en Diferencial Delantero de Cargador Frontal

Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica anterior se evidencian claramente los puntos de cambio de aceite, establecidos cada 1000 horas de uso, así como el incremento en la generación de hierro, resultado del desgaste del componente durante los intervalos entre cambios de aceite. Se destaca que el intervalo más perjudicial se ubica tras las 6035 horas, donde la curva tribológica genera una pendiente ascendente abrupta, lo cual se atribuye al uso del equipo como bulldozer para el empuje de material, en contraposición a su función diseñada de levantar carga, generando un mayor desgaste del componente, pudiendo predecir el final próximo de la vida útil del componente.

Por otro lado, es evidente que este proyecto no se limita únicamente a la realización de análisis de fluidos y a la corrección de desviaciones; se trata de un proyecto de mejora continua que sienta las bases para alcanzar la excelencia operacional en la gestión de fluidos y, en consecuencia, en la gestión de activos. Aunque forma parte de un proceso de transformación mucho más profundo que la organización debe atravesar para lograr este estado, el proyecto faculta a la empresa para optimizar de forma activa la gestión de fluidos con mínima intervención.

Más específicamente, el proyecto incorpora, en su composición y asignación de funciones, el denominado ciclo de CAP-DO, una variante del ciclo de Deming o PHVA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar).

Un ejemplo de esta filosofía se observa en la gestión de los límites condenatorios, los cuales deben ser monitoreados y ajustados de forma continua en caso de ser necesario. Esto se debe a que el límite condenatorio de un equipo en un contexto operacional específico no debe ser necesariamente igual al de otro; por ello, es imprescindible realizar un análisis exhaustivo para identificar la raíz del aumento o disminución de estas variables (ver imagen 45).

Otro de los logros principales de este proyecto fue el diseño de un plan de mantenimiento predictivo basado en análisis tribológicos considerando cada actividad desde la toma de muestra, su análisis de aceite y el diagnóstico avanzado para detección temprana de fallas, generando mejores prácticas para la gestión de activos existente en la empresa. Todo esto, junto con su plan de implementación correspondiente, que garantiza una ejecución eficiente y eficaz. Dado que este plan se integrará al plan matriz de los equipos, se tuvieron en cuenta tanto la singularidad de las condiciones operativas como la diversidad de tipos de equipos. De este modo, se desarrolló un esquema adaptable que optimiza el desempeño de cada unidad, maximizando su vida útil y asegurando la continuidad operativa, ejemplo de como puede desarrollarse esta implementación de manera



Figura 45: Ejemplo Ciclo CAP-DO FluidExPort

Fuente: Elaboración Propia

escalonada, es visible en los anexos, específicamente, figura numero ??.

De esta forma se proyecta una mejora del 40 % en el tiempo de disponibilidad de equipos inmersos en este plan, una reducción del 40 % en pérdidas por lucro cesante producto de fallas críticas e indisponibilidad de los equipos y un aumento del 20 % en la diferencia (futura/actual) de la vida útil de equipos críticos muestreables. Si bien, la mejora de estos indicadores son en algunos casos altos y en otros medidos, en comparación a como se verá más adelante el análisis técnico económico de un caso real y bajos para el potencial real que Siemens y PwC demuestra pueden tener los planes de mantenimiento predictivo en sus artículos The True Cost of Downtime [26] y Predictive Maintenance 4.0 Beyond the hype: PdM 4.0 delivers results [23] respectivamente, estos se deben a que es un sistema de trabajo nuevo que traera grandes beneficios para la empresa, pero que sin embargo, estos beneficios se irán normalizando a valores medios con el pasar del tiempo y el plan alcance su madurez.

En un contexto técnico-económico, es fundamental destacar que el principal beneficio esperado para la empresa mediante la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo basado en análisis de fluidos es la reducción de los costos por indisponibilidad. Este modelo permite anticipar fallas críticas y planificar detenciones de equipos con suficiente antelación, reduciendo

significativamente el tiempo improductivo y evitando, por ejemplo, la necesidad de gestionar equipos sustitutos.

Como antecedente, se considera que el costo promedio por indisponibilidad para los equipos incluidos en este plan asciende a \$1.500 por día. Adicionalmente, el tiempo medio de reparación ante una falla crítica es de 25 días hábiles, lo que equivale a un costo promedio de \$37.500 por evento, sin considerar los costos adicionales asociados a la gestión de equipos sustitutos, cuyo arriendo mensual asciende a aproximadamente \$5.000. Cabe destacar que la empresa enfrenta, en promedio, 15 fallas críticas inesperadas al año. Por lo tanto, el costo total anual por estas fallas asciende a:

$$15 \text{ fallas/año} \times \$37,500 = \$562,500 \text{ anuales}$$

Considerando una inversión total de \$56.364, que incluye CAPEX y OPEX, una duración proyectada del plan de 3 años, ahorros anuales promedios estimados en \$465.278 y una tasa de descuento del 12 %, se obtiene un Valor Actual Neto (VAN) de \$1.000.000 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 818 %.

Se presenta a continuación un caso real que ejemplifica la situación descrita. Durante la operación de un portacontenedor Ferrari 25K8 con aproximadamente 8.500 horas de uso, se detectó una desviación en el comportamiento del motor QSB 6.7. Sin embargo, debido al reciente diseño del sistema predictivo, no se tomaron acciones correctivas sugeridas, lo que resultó en la falla total del componente y la consecuente indisponibilidad del equipo.

Previo a la falla, la empresa consideraba tres alternativas de acción:

1. **Propuesta 1.- Detener y Reparar:** Teniendo una pérdida de disponibilidad de al menos 28 días hábiles, como resultado de enviar el motor hasta la central de Cummins para su reparación teniendo un costo superior a 15 mil dólares.
2. **Propuesta 2.- Operar hasta la falla:** Pérdida de disponibilidad de 62 días al menos, resultante de la adquisición de un nuevo motor teniendo un costo de 23.700 dólares.
3. **Propuesta 3.- Planificar Detención:** Pérdida de disponibilidad planificada de 3 días,

teniendo como antecedentes que la empresa contaba con un motor de las misma características, proveniente de un equipo hermano, en la central de Cummins a la espera de una orden de reparación teniendo un costo similar a la propuesta numero 1 de 15 mil dólares y fracción.

Ademas, se debe considerar que el valor por turno, de 5 horas de trabajo activo, de este equipo es de 530 dólares. Con estos antecedentes, las propuestas que mayores ventajas trae para la empresa son la propuesta numero 1 por menor tiempo de indisponibilidad y menor costo de reparación y propuesta numero 3 que disminuye aun mas el tiempo de indisponibilidad.

De esta forma se obtiene que la merma que sufre la empresa por la condicion de no disponibilidad del equipo es de:

▪ **Propuesta 1.- Detener y Reparar:**

- Tiempo de Reparación: 28 días hábiles
- Turnos por día: 3
- Valor Turno : 530 dolares

Teniendo como resultado:

$$28[Dias] * 3\left[\frac{Turno}{Dias}\right] * 530\left[\frac{Dolares}{Turno}\right] = 44520[Dolares] \quad (13)$$

▪ **Propuesta 2.- Operar hasta la falla:**

- Tiempo de Reparación: 62 días hábiles
- Turnos por día: 3
- Valor Turno : 530 dolares

Teniendo como resultado:

$$62[Dias] * 3\left[\frac{Turno}{Dias}\right] * 530\left[\frac{Dolares}{Turno}\right] = 98580[Dolares] \quad (14)$$

▪ **Propuesta 3.- Planificar Detención:**

- Tiempo de Reparación: 3 días hábiles

- Turnos por día: 3
- Valor Turno : 530 dolares

Teniendo como resultado:

$$3[Dias] * 3\left[\frac{Turno}{Dias}\right] * 530\left[\frac{Dolares}{Turno}\right] = 4770[Dolares] \quad (15)$$

Por otro lado, se debe agregar el costo asociado que involucra el gestionar un equipo de reemplazo para este contrato, el cual para este caso en especifico tiene un costo 6000 dólares mensuales. De esta forma los costos totales de cada una de las alternativas son:

■ **Propuesta 1.- Detener y Reparar:**

- Costo por indisponibilidad: 44520 [Dólares]
- Costo por Equipo de reemplazo: Considerando solo 1 mes = 6000 [Dólares]
- Costo por Reparación: 15000 [Dólares]

$$CostoTotalPropuesta1 = 44520 + 6000 + 15000 = 65520[[Dólares] \quad (16)$$

■ **Propuesta 2.- Operar hasta la falla:**

- Costo por indisponibilidad: 98580 [Dólares]
- Costo por Equipo de reemplazo: Considerando 2 meses = 12000 [Dólares]
- Costo por Reparación: 23.700 [Dólares]

$$CostoTotalPropuesta2 = 98580 + 12000 + 23700 = 134280[Dólares] \quad (17)$$

■ **Propuesta 3.- Planificar Detención:**

- Costo por indisponibilidad: 4770 [Dólares]
- Costo por Equipo de reemplazo: Considerando solo 3 días, que puede perfectamente planificar una menor carga de trabajo o ser absorbida la carga de trabajo por otro equipo, por tanto no se requiere equipo de reemplazo.
- Costo por Reparación: 15.000 [Dólares]

$$CostoTotalPropuesta3 = 4770 + 15,000 = 19770[Dólares] \quad (18)$$

Con este análisis es fácil observar que la alternativa número 2, donde se opera hasta la falla, es la opción más perjudicial tanto en términos operativos como económicos. La alternativa número 1, "Detener y reparar", se presentaba como la opción más favorable para la empresa en comparación con la alternativa número 2, logrando reducir el impacto operativo (indisponibilidad) en un 65 % y el impacto económico en un 52 %.

Sin embargo, la alternativa número 3, desarrollada a partir de este proyecto, se posiciona como la propuesta más sólida, superando ampliamente ambas opciones anteriores. Esta alternativa permite reducir la indisponibilidad en un 90 % y el gasto económico en un 70 % en comparación con la alternativa número 2, tomando como referencia la opción más favorable con la que contaba la empresa antes de este proyecto.

Por último, y continuando con un análisis económico de la propuesta presentada, teniendo en cuenta únicamente el caso anterior junto a su propuesta número 1, la cual es la más favorable para la empresa con una inversión de 65,520 dólares y la suma total de CAPEX y OPEX cuyo resultado hace a la suma de 56,364 dólares para calcular el retorno de inversión o ROI por sus siglas en inglés se tiene que para el primer año el retorno de inversión es:

- CAPEX = 6,214 [Dólares]
- OPEX = 50,150 [Dólares]
- Costo total primer año = 56,364 [Dólares]

$$ROI = \frac{65,520}{56,364} = 1,16 \quad (19)$$

Mientras que el retorno de inversión para años posteriores queda calculado como:

$$ROI = \frac{65,520}{50,150} = 1,30 \quad (20)$$

En síntesis el análisis económico de la propuesta de implementación de un plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de fluidos demuestra su alta viabilidad y conveniencia para la empresa. Considerando que una sola falla de un equipo generó un gasto de 65,520 dólares, el costo total de implementar la propuesta durante el primer año (CAPEX + OPEX) asciende a

56,364 dólares, lo que representa una fracción del costo de esa única falla. Esto se traduce en un retorno sobre la inversión (ROI) de 1.16 en el primer año, es decir, la inversión se recupera más de tres veces solo con evitar un evento similar. Para los años siguientes, al considerarse únicamente los costos operativos (OPEX), el ROI aumenta a 1.3, reforzando la rentabilidad de mantener el sistema implementado.

Además, el análisis del payback indica que la inversión se recupera en aproximadamente 3.8 meses, suponiendo que se evita una sola falla de magnitud similar. Esto significa que, desde el punto de vista económico, la empresa comienza a obtener beneficios netos en menos de un año. Por lo tanto, el plan propuesto no solo es técnica y operativamente adecuado, sino también una decisión financieramente estratégica para reducir riesgos, aumentar la disponibilidad de equipos críticos y optimizar los recursos a largo plazo.

El desarrollo de este estudio representó un desafío significativo, tanto a nivel técnico como metodológico. Desde el inicio, la necesidad de diseñar un plan de mantenimiento predictivo basado en análisis tribológicos para equipos críticos implicó un profundo entendimiento de los principios de la tribología, así como la adaptación de metodologías existentes a las condiciones específicas de los activos evaluados.

Uno de los principales retos fue la recopilación y validación de datos, ya que la empresa no contaba con información histórica sobre el estado de los lubricantes ni su correlación con las fallas de los equipos. Además, la falta de datos clave, como el tipo y características de los lubricantes utilizados, las condiciones operacionales específicas de los equipos y los registros históricos de mantenimiento, dificultó el establecimiento de una línea base confiable para el análisis. Para superar esta limitación, fue necesario definir criterios claros de selección de datos, complementar la información con referencias bibliográficas y análisis de tendencias, y realizar consultas directas con operadores y personal de mantenimiento.

Otro aspecto crucial del proceso fue la toma de decisiones respecto a los parámetros más relevantes para la evaluación de la condición de los equipos. Si bien existen múltiples indicadores en el análisis tribológico, definir aquellos que proporcionaran el mayor valor predictivo requirió una revisión exhaustiva y una alineación con las estrategias operativas de la empresa.

A lo largo de la investigación, quedó en evidencia que la implementación de un plan de mantenimiento predictivo no solo conlleva beneficios económicos y operacionales, sino que también implica un cambio en la cultura organizacional. La transición desde un enfoque reactivo o preventivo hacia uno predictivo demanda un compromiso por parte de la organización en términos de capacitación, adopción de nuevas tecnologías y generación de confianza en los resultados del análisis tribológico.

En retrospectiva, este trabajo permitió reafirmar la importancia de un enfoque estructurado y basado en datos para la toma de decisiones en mantenimiento. Además, puso en relieve las oportunidades de mejora en la gestión de activos, particularmente en la optimización de recursos y la reducción de fallas inesperadas. No obstante, es importante reconocer que la implementación real de este tipo de estrategias requiere un seguimiento continuo y una adaptación progresiva a las condiciones operativas específicas de cada entorno.

Finalmente, este estudio no solo contribuye a la fundamentación teórica del mantenimiento predictivo basado en análisis tribológicos, sino que también ofrece una base práctica para futuras implementaciones en la industria. La experiencia adquirida en este proceso será invaluable para futuras investigaciones y proyectos relacionados con la optimización del mantenimiento de equipos críticos.

9. Conclusiones y Recomendaciones

Durante el desarrollo de este proyecto se presentaron diversas limitaciones, algunas de las cuales quedaron reflejadas en la curva de avance (Curva S), evidenciando retrasos en la ejecución. A pesar de contar con una planificación adecuada y una programación de actividades bien definida, la magnitud del proyecto —que abarcó un alcance a nivel nacional—, junto con la complejidad de coordinar equipos distribuidos en distintas faenas, generó imprevistos operacionales. Estas faenas, al estar sujetas a contingencias que requerían atención prioritaria, afectaron directamente el ritmo del trabajo. Asimismo, se sumaron problemas externos a la UCEM, lo que obligó a realizar ajustes en el cronograma para asegurar el cumplimiento de los objetivos y alcances definidos.

El análisis de fluidos, como herramienta central de mantenimiento predictivo, se ha identificado como una estrategia viable para mejorar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos críticos gestionados por REPORT. Para asegurar su implementación efectiva, el plan fue diseñado con un enfoque estructurado que permite su integración directa en las actividades rutinarias de mantenimiento de cada activo. La toma de muestras fue incorporada dentro del plan matriz de mantenimiento, asegurando su alineación con los procedimientos operativos vigentes y evitando interrupciones innecesarias. Además, el plan no representa una carga adicional significativa, ya que incorpora recomendaciones operativas de forma progresiva, facilitando su adopción por parte del personal técnico y promoviendo una transición eficiente hacia un mantenimiento basado en condición.

Entre los principales resultados obtenidos destacan:

- La detección de fallas potenciales con hasta 1500 horas de anticipación.
- La reducción de 15 fallas críticas anuales, con un ahorro proyectado de USD 465,278 por año.
- Un Valor Actual Neto (VAN) de USD 1 millones y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 818 %.
- Un retorno de la inversión en menos de un año.
- La integración de 937 frecuencias de muestreo definidas para componentes de equipos críticos.

- La implementación de 32 límites condenatorios por sistema y componente.

La metodología aplicada permitió establecer una jerarquización de equipos conforme a la norma ISO 14224, priorizando aquellos activos cuyo impacto en la operación, la seguridad y los costos era más significativo. Este enfoque holístico no sólo considera la dimensión económica, sino que incorpora variables estratégicas y operacionales, orientando los esfuerzos hacia una gestión más eficiente y confiable de los activos críticos.

La implementación del plan predictivo optimiza el uso de recursos técnicos y económicos, reduce los tiempos de inactividad y disminuye los costos asociados a fallas inesperadas. Adicionalmente, entrega a la organización una ventaja competitiva al maximizar la disponibilidad y eficiencia de sus activos más relevantes. A nivel interno, permite una gestión de mantenimiento más precisa, mejorando los tiempos de respuesta y reduciendo la recurrencia de problemas operacionales.

Durante el desarrollo se identificaron barreras relevantes para su implementación, como la necesidad de capacitación del personal y la integración de los resultados de análisis con los sistemas de gestión de mantenimiento existentes. Estas brechas fueron abordadas mediante el diseño de procedimientos claros, manuales instructivos y la definición de protocolos para orientar y facilitar la adopción del modelo propuesto.

La incorporación de metodologías basadas en el análisis de datos impulsa un cambio organizacional hacia una cultura proactiva en la gestión de activos. Para fortalecer este nuevo enfoque, se recomienda:

- Implementar programas de formación técnica en análisis de fluidos y mantenimiento predictivo.
- Incorporar tecnologías de automatización para la toma y análisis de muestras.
- Complementar el sistema con herramientas como sensores de vibración, termografía o análisis de partículas.
- Integrar los resultados del análisis de fluidos con el CMMS para automatizar alertas y decisiones de mantenimiento.

- Mantener un sistema de mejora continua que ajuste el modelo según el rendimiento y evolución tecnológica.
- Extender la metodología de jerarquización de activos a otras áreas de la empresa para una gestión integral.

La visión moderna del mantenimiento debe trascender los costos iniciales y la depreciación de los equipos, considerando su impacto en la operación, la seguridad y la sostenibilidad del negocio. De este modo, se fomenta una mirada estratégica del mantenimiento y se optimiza globalmente la gestión de activos en la empresa.

10. Referencias

Bibliografía

- [1] AGUILLON, P. R. A. El factor beta y el código de limpieza iso 4406-99 en los procesos de filtración de aceites iso 3448. <https://www.tribosingenieria.com/php/el-factor-beta-y-el-codigo-de-limpieza-iso-4406-99-en-los-procesos-de-filtracion-de-aceites-iso-3448/>.
- [2] AGUILON, P. R. A. *TRIBOLOGIA Y LUBRICACION*. Ingenieros de Lubricacion, 2015.
- [3] AGUILON, P. R. A. Tribologia y lubricacion. In *TRIBOLOGIA Y LUBRICACION* (2024).
- [4] AMERICA, N. L. Utilice el análisis estadístico para crear limites para partículas de desgaste. *Noria.mx* (2013).
- [5] AMERICA, N. L. Establecimiento de limites dependientes del tiempo para mejorar la interpretación de los resultados del análisis de lubricantes. *Noria.mx* (2024).
- [6] AMERICA, N. L. Establezca correctamente los limites del análisis de aceite. *Noria.mx* (2024).
- [7] DEMING, W. E. *Out of the Crisis*. MIT Press, 1986.
- [8] GEORGE, M. L. *Lean Six Sigma: Combining Six Sigma Quality with Lean Speed*. McGraw-Hill, 2002.
- [9] HAMMER, M., AND CHAMPY, J. *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution*. HarperBusiness, 1993.
- [10] IMAI, M. *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. McGraw-Hill, 1986.
- [11] ISO. Iso 14224 industria de petróleo y gas – recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos. norma.
- [12] JURAN, J. M. *Juran on Leadership for Quality: An Executive Handbook*. Free Press, 1989.
- [13] KELLY, A. *Strategic Maintenance Planning*. Butterworth-Heinemann, 2006.

-
- [14] LIKER, J. K. *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. McGraw-Hill, 2004.
- [15] MCGHEE, S. B., . S. R. A. *Reliability and Maintainability: Fundamentals and Applications*. Wiley, 1999.
- [16] MOUBRAY, J. *Reliability-centered Maintenance*. Industrial Press, 1997.
- [17] MOUBRAY, J. *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*, 2 ed. AJadon Ltd, 2004. ISBN: 09539603-2-3.
- [18] MOUBRAY, J. Mantenimiento centrado en confiabilidad. *Aladon* (2023).
- [19] NAVARRO.J.D. *Técnicas de mantenimiento industrial*. Calpe Institute of Technology., 2010.
- [20] PAULK, M. C., CURTIS, B., CHRISISS, M. B., AND WEBER, C. V. *Capability Maturity Model for Software*. Addison-Wesley, 1993.
- [21] PISTARELLI, A. J. *Manual de mantenimiento ingeniería, gestión y organización*. Talleres Gráficos R y C, 2010.
- [22] PORTER, M. E. *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. Free Press, 1985.
- [23] PWC. Predictive maintenance 4.0 beyond the hype: Pdm 4.0 delivers results (2018). *Mainnovation* (2018).
- [24] RAUSAND, L. S., . H. A. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*. Wiley-Interscience, 2004.
- [25] RETAMAL, S. E. M. *GENERACIÓN Y DESARROLLO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN BASE A CRITICIDAD, SEGÚN CRITERIOS DE ESTADÍSTICAS DE FALLA EN EMPRESA QUÍMICA CLARIANT*. PhD thesis, UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA, 2017.
- [26] SIEMENS. The true cost of an hour's downtime: An industry analysis (2024). *Siemens blog* (2024).

11. Anexos

Falla Sintomática en el Aceite	Causa raíz en el Tribosistema	Consecuencia	Mantenimiento	
			Proactivo	Restaurativo*
Oxidación	<i>Excesiva temperatura de funcionamiento.</i>	<i>Oxidación del aceite, mayor actividad de los ácidos y falla de la película lubricante. Mayor desgaste por deterioro de la resistencia de la película lubricante.</i>	<i>Disminuir temperatura de operación.</i>	<i>Reemplazo del lubricante.</i>
	<i>Excesivo aire disuelto.</i>	<i>Ruptura de la película lubricante y desgaste excesivo.</i>	<i>Eliminar fuente de aereación ó cambiar el tipo de lubricante (mayor capacidad antiespumante). Modificar el diseño del mecanismo.</i>	<i>Reemplazo del lubricante.</i>
	<i>Alta presencia de catalizadores metálicos.</i>	<i>Las partículas metálicas favorecen la formación de ácidos. Desgaste corrosivo y abrasivo excesivo.</i>	<i>Eliminar fuente de generación de partículas. Filtración.</i>	<i>Reemplazo del lubricante y posible incorporación de aditivos EP y AD.</i>
	<i>Contaminación con agua.</i>	<i>El agua potencia la acción de los ácidos corrosivos y aumenta la corrosión y formación de herrumbre. Además, lava el paquete de aditivos. Degrada filtros y aumenta la viscosidad por emulsión del aceite.</i>	<i>Eliminar fuentes de contaminación.</i>	<i>Reemplazo del lubricante / Deshidratación.</i>
	<i>Alto contenido de azufre en combustible.</i>	<i>Desgaste corrosivo por elevada concentración de ácidos disueltos (sulfúrico).</i>	<i>Utilizar combustible con menor porcentaje de azufre o verificar TBN del aceite para la aplicación requerida.</i>	<i>Reemplazo de aceite o cambio de formulación (TBN).</i>

Figura 46: Posibles causas y consecuencias de una falla sintomática por oxidación

Fuente: Manual de mantenimiento ingeniería, gestión y organización. Pistarelli, A. J

Falla Sintomática en el Aceite	Causa raíz en el Aceite		Ensayos de Validación [Tendencia]	Causa raíz en el Tribosistema	Consecuencia	Mantenimiento	
	Reversible	Irreversible				Proactivo	Restaurativo*
Incremento de Viscosidad	--	Oxidación (envejecimiento).	TAN y FTIR (para oxidación) [Incremento] Análisis de Elementos para Aditivos [Agotamiento] Olor [Mal] Color [Oscuramiento] Densidad [Incremento]	Alta temperatura de operación. Agua por condensación de la humedad del aire o contaminación. Alto porcentaje de aire disuelto. Elevada cantidad de partículas metálicas (Cobre, Acero, Plomo). Azufre presente como impureza del aceite o disuelto en el combustible.	Formación de barniz adherente y abrasión. Depósitos de lacas y barnices en superficies expuestas a altas temperaturas puntuales. Generación de catalizadores metálicos. Fatiga superficial.	Disminuir temperatura de operación y/o batido del aceite. Eliminar fuente contaminante de líquidos y sólidos. Estudio Tribológico del sistema. desgaste, partículas e impurezas.	Limpieza de mecánismos. Filtrado o reemplazo del lubricante.
	--	Agotamiento de aditivos.	Análisis de Elementos para Aditivos [Agotamiento]	Alteración del tiempo entre reemplazos. Lubricante equivocado. Elevada contaminación.	Formación de barniz adherente y fatiga superficial.	Estudio Tribológico del sistema.	Reemplazo del lubricante.
	--	Volatilización.	Análisis de Elementos [Aumento concentración de aditivos]	Lubricante inadecuado o alta temperatura de funcionamiento.	Formación de lodos y lacas. Desgaste corrosivo.	Estudio Tribológico del sistema.	Reemplazo de filtro y lubricante.
	--	Suspensión de hollín y formación de lodos (óxidos insolubles).	Prueba de "gota" [Mancha oscura en el centro]. Oxidos Insolubles (ASTM D-893) [Aumento].	Mezcla muy rica en combustible, fuga de gases al carter, filtro de aire tapado, alteración del tiempo entre reemplazo.	Provoca el agotamiento de los dispersantes y detergentes. Genera altos niveles de incrustación, depósitos y lodos. Consumo excesivo de combustible.	Eliminar fuente de generación.	Separación, deshidratación o reemplazo del lubricante
Disminución de Viscosidad	Contaminación con agua (emulsión) [Reversible por deshidratación].	--	Contenido de agua (ASTM D-95) [Incremento]. Crepitado [Positivo].	Comunicación de circuitos, combustión o condensación por contacto con la atmósfera.	Desgaste corrosivo y formación de herrumbre. El agua potencia la acción de los ácidos corrosivos y aumenta la corrosión y formación de herrumbre. Se hidroliza y lava el paquete de aditivos.	Eliminar fuente de contaminación.	Separación, deshidratación o reemplazo del lubricante
	Aereación [Reversible por separación].	--	TAN [Incremento]	Batido de aceite / Falta aditivo antiespumante.	Desgaste abrasivo y/o adhesivo. Baja resistencia de la película lubricante y fatiga superficial. Carbonización y depósitos de barniz. Formación de espuma y cavitación.	Eliminar causa de aereación.	Separación o reemplazo del lubricante.
	Contaminación con anticongelante (glicol).	--	Análisis de Elementos [Boro, sodio o potasio]. Densidad [Incremento]. FTIR [Positivo].	Fallas funcionales del circuito de enfriamiento, falla en juntas o sellos.	Formación de lodos. Herrumbre y corrosión. Disminuye la homogeneidad del aceite a baja temperatura. Cae la resistencia de la película lubricante. Degradación de filtros.	Eliminar fuente o causa de contaminación.	Reemplazo del lubricante.
	Contaminación con combustible no quemado.	--	Punto de inflamación [Disminución]	Fallas funcionales en la línea de combustible, problemas en inyectores, excesivas fugas de gases al carter, aros / camisas de pistón dañados.	Se produce la dilución del aceite y falla la película lubricante (pérdida de viscosidad), lavado de aditivos, corrosión y desgaste abrasivo. Aumento del nivel de aceite.	Eliminar fuente de contaminación.	Reemplazo de filtro y lubricante.
Disminución de Viscosidad	Craqueo del aceite base (efecto térmico).	--	Punto de inflamación [Disminución]	Alta carga aplicada o alta temperatura de operación.	Fatiga superficial y desgaste.	Eliminar causas de craqueo.	Reemplazo del lubricante.
	Contaminación con solvente.	--	Cromatografía de gases [Positivo]. Olor característico del contaminante [Positivo].	Contaminación o restos de limpieza.	Disminuye la viscosidad y falla película lubricante. Barrido de aditivos y desgaste abrasivo.	Limpieza y eliminación de la fuente o causa del contaminante.	Limpieza y reemplazo del lubricante.
	Corte y cizallamiento de los mejoradores del IV.	--	Viscosidad a 100°C e índice de viscosidad. [Disminución]	Severas condiciones de operación.	Desgaste abrasivo y/o adhesivo en alta temperatura de funcionamiento.	Estudio Tribológico del sistema.	Reemplazo del lubricante.

Figura 47: Posibles causas y consecuencias de una falla sintomática cambios de viscosidad

Fuente: Manual de mantenimiento ingeniería, gestión y organización. Pistarelli, A. J

Aditivo	Compuesto	Acción del Aditivo	Posibles Falla Sintomática* y [Tendencia]	Consecuencias Tribológicas
Antioxidante	Aceites. Minerales: Ditiiofosfato de zinc (ZDDP), fosfitos orgánicos o fenoles. Aceites Sintéticos: Sulfonatos, imidazolidinas y aminas aromáticas.	Retardan el proceso de oxidación y disminuyen la formación de lodos (insolubles), lacas y barnices. Previenen el aumento de viscosidad.	Disminución de zinc (Zn), fósforo (P) y azufre (S) ó de los elementos de los aditivos orgánicos. Incremento del TAN.	Los ácidos disueltos facilitan la corrosión y la herrumbre por la reacción entre éstos y los óxidos metálicos de las superficies. Forman lodos.
Inhibidores de Corrosión	Compuestos de imidazol, benzotriazol y ZDDP. También sulfonatos básicos (motores de combustión), olefinas fosforadas y ácidos grasos (sistemas hidráulicos).	Forman una película polar que protege las superficies metálicas del agua y del ataque corrosivo.	Disminución de fósforo (P), zinc (Zn) y azufre (S). También disminución del ZDDP.	La corrosión y herrumbre generan desgaste y daño irreversible en las superficies metálicas como cojinetes.
Antiespumante	Siliconas y polímeros orgánicos.	Facilitan el ascenso y la ruptura de las burbujas de aire en el aceite aumentando la tensión superficial.	Disminución de silicio (Si).	Formación de espuma y cavitación. Formación de lodo, barniz y carbonización. Fatiga superficial y desgaste.
Depresores del Punto de Congelación	Polimetacrilatos, poliacrilamidas y fenoles.	Disminuyen el punto de congelación del aceite.	Incremento del punto de congelación.	Falla de película lubricante, abrasión, desgaste. Alta fricción entre metales a baja temperatura.
Mejoradores del Índice de Viscosidad	Copolímeros de etileno propileno (OCP) y polimetacrilatos. Otros compuestos a base de copolímeros.	Sostienen la viscosidad con el aumento de la temperatura.	Disminución de la viscosidad a 100 °C.	Disminuye la capacidad de carga de la película lubricante. Desgaste adhesivo.
Antidesgaste	Dialquil ditiiofosfato (ZDDP) y Tricresil fosfato (TCP).	Forman una película polar que protege las superficies metálicas del desgaste abrasivo y rayado.	Disminución de zinc (Zn) y fósforo (P).	Desgaste de las superficies, daños irreversibles en los mecanismos.
Dispersantes	Compuestos de alquienil succinimidas, ésteres y políesteres de alto peso molecular y sales de amonio de ácidos orgánicos	Mantienen en suspensión las partículas de polvo, hollín, agua, etc. Previenen el aumento de viscosidad y los depósitos. Pueden fallar por alta carga de hollín, contaminación con agua, anticongelante (glicol) y combustible no quemado que pasa al aceite.	Disminución de calcio (Ca) y magnesio (Mg).	Carbonización, lodos, lacas y barnices. Desgaste abrasivo y fatiga de superficies. Alta fricción. Formación de herrumbre.
Detergentes	Jabones organo-metálicos de bario, calcio y magnesio. Sulfonatos, fenatos y sulfonatos	Controlan y evitan los depósitos sobre superficies. Además, neutralizan los ácidos generados por la combustión de los gases que pasan al aceite.	Disminución del TBN, calcio (Ca), magnesio (Mg) y en ocasiones bario (Ba).	Formación de depósitos (lacas y barnices). Alta fricción.
Desactivadores de metal	Derivados de los propilen diaminas o formadores de película como el benzotriazol.	Los primeros evitan que los iones metálicos (cobre, acero, plomo, etc.) catalicen la etapa de oxidación inhibiendo su capacidad de generar ácidos corrosivos. Los formadores de película evitan que los iones metálicos ingresen al aceite.	Disminución de calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S) y zinc (Zn).	La oxidación catalítica genera ácidos que facilitan la corrosión y la herrumbre.
Extrema Presión (EP)	Compuestos químicos de azufre - fósforo (EP) y sólidos suspendidos como boratos, MOS ₂ y grafito.	Aumentan la resistencia de la película lubricante y forman una película adherente resistente al desgaste.	Disminución de azufre (S), fósforo (P), boro (B) y molibdeno (Mo).	Falla de película lubricante, abrasión, adhesión y desgaste. Alta fricción entre metales.

Figura 48: Posibles causas y consecuencias de una falla sintomática agotamiento de Aditivos

Fuente: Manual de mantenimiento ingeniería, gestión y organización. Pistarelli, A. J.

Falla Sintomática en el Aceite	Causa raíz en el Tribosistema	Consecuencia	Mantenimiento	
			Proactivo	Restaurativo*
Bajo TBN	<i>Intervalo prolongado entre reemplazos de aceite.</i>	<i>Desgaste corrosivo por elevada concentración de ácidos disueltos. Otros daños colaterales de desgaste por la inactividad del resto del paquete de aditivos.</i>	<i>Asegurar el cumplimiento de los intervalos de reemplazo y verificar la clasificación API del lubricante para la aplicación requerida.</i>	<i>Reemplazo de aceite o cambio de clasificación API.</i>
	<i>Excesiva temperatura de funcionamiento.</i>	<i>Oxidación del aceite, mayor actividad de los ácidos y falla de la película lubricante. Mayor desgaste por pérdida de película lubricante.</i>	<i>Disminuir temperatura de operación.</i>	<i>Reemplazo de aceite o cambio de clasificación API.</i>
	<i>Combustible con alto contenido de azufre.</i>	<i>Desgaste corrosivo por elevada concentración de ácidos disueltos.</i>	<i>Utilizar combustible con menor porcentaje de azufre o aceite con TBN más alto.</i>	<i>Reemplazo de aceite.</i>
	<i>Inyección defectuosa o ingreso de combustible.</i>	<i>Dilución, pérdida de viscosidad y falla de la película lubricante. Mayor desgaste abrasivo.</i>	<i>Eliminar las causas de fuga (aros o camisas dañados).</i>	<i>Reemplazo del lubricante.</i>
	<i>Alto nivel de humedad en el aceite.</i>	<i>El agua potencia la acción de los ácidos corrosivos. Aumenta la corrosión, la formación de herrumbre y la viscosidad.</i>	<i>Eliminar fuentes de contaminación.</i>	<i>Reemplazo del lubricante / Deshidratación.</i>
	<i>Alta contaminación metálica.</i>	<i>Las partículas metálicas favorecen el consumo de aditivos. Desgaste abrasivo excesivo. Fatiga superficial.</i>	<i>Eliminar fuente de generación de contaminantes. Filtración.</i>	<i>Reemplazo del lubricante y posible incorporación de aditivos.</i>

Figura 49: Posibles causas y consecuencia de una falla sintomática por bajo TBN.

Fuente: Manual de mantenimiento ingeniería, gestión y organización. Pistarelli, A. J

01. SISTEMAS HIDRAULICOS						
No	Componente	Mecanismos	Presión de trabajo Psig		Límites condenatorios del código de limpieza ISO 4406-99	
			Hasta 3000	Más de 3000		
			Código de limpieza ISO 4406-99 estándar		OC: Operación Confiable	OF: Operación en Falla
01	Con bomba de engranajes.	Engranajes.	18/17/15		OC	19/18/16
					OF	20/19/17 - 21/20/18
					EF	22/20/19
			17/16/14		OC	18/17/15
					OF	19/18/16 - 20/19/17
02	Con bomba de pistones, paletas.	Pistones, paletas.	17/16/14		OC	18/17/15
					OF	19/18/16 - 20/19/17
					EF	21/20/18
			16/15/13		OC	17/16/14
					OF	18/17/15 - 19/18/16
		EF	20/19/17			
02. SISTEMAS DE LUBRICACION						
No	Componente	Mecanismos	Lubricación		Límites condenatorios del código de limpieza ISO 4406-99	
			HD	EHD		
01	Transmisión mecánica.	Engranajes, rodamientos.		19/18/16	OC	20/19/17
					OF	21/20/18 - 22/21/19
					EF	23/22/20
02	Transmisión automática.	Engranajes, rodamientos, sincronizadores.	18/17/15		OC	19/18/16
					OF	21/20/18 - 22/21/19
					EF	23/22/20
03	Reductor de velocidad, motorreductor, compresor de tornillo cámara de compresión seca (CCS), compresor de pistón simple y doble efecto, bomba de pistones, soplador de lóbulos.	Engranajes, rodamientos, cojinetes lisos, cilindros, anillos, cruceta, bulón.	19/18/16		OC	20/19/17
					OF	21/20/18 - 22/21/19
					EF	23/22/20
			18/17/15		OC	19/18/16
					OF	21/20/18 - 22/21/19
		EF	23/22/20			
04	Compresor de tornillo cámara de compresión húmeda (CCH), compresor axial, compresor centrífugo, bomba centrífuga.	Cojinetes lisos, cojinete de empuje, rodamientos, tornillos.	17/16/14		OC	18/17/15
					OF	19/18/16 - 20/19/17
					EF	21/20/18
05	Motor eléctrico, ventilador.	Rodamientos.	17/16/14		OC	18/17/15
					OF	19/18/16 - 20/19/17
					EF	21/20/18
06	Motor eléctrico, ventilador.	Cojinetes lisos.	18/17/15		OC	19/18/16
					OF	21/20/18 - 22/21/19
					EF	23/22/20
07	Turbina de vapor, turbina de gas, turbina hidráulica.	Cojinetes lisos, cojinete de empuje, cojinetes guía.	17/16/14		OC	18/17/15
					OF	19/18/16 - 20/19/17
					EF	21/20/18
08	Molino de bolas cemento, molino azucarero.	Cojinetes lisos.	18/17/15		OC	19/18/16
					OF	20/19/17 - 21/20/18
					EF	23/22/19
09	Molino papelerero.	Rodamientos.	17/16/14		OC	18/17/15
					OF	19/18/16 - 20/19/17
					EF	21/20/18

Figura 51: Código de limpieza ISO 4406-99 de acuerdo con el tipo de componente y mecanismos lubricados

Fuente: El factor beta y el código de limpieza ISO 4406-99 en los procesos de filtración de aceites ISO

3448. AGUILLON, P. R. A.

Elemento	Fuente Posible y Tendencia esperada.
Magnesio (Mg)	Presente en ciertos accesorios de turbina y en aditivos de aceites de motor de combustión, agua dura, agua salada y algunos polvos ambientales. Normalmente disminuye por agotamiento de aditivo, aunque puede aumentar por contaminación. En todos los casos deberá analizarse la condición tribológica del sistema.
Zinc (Zn)	Presente en varios aditivos (AD y AO), también en aleaciones de bronce y compuestos cromados. Disminuye con el agotamiento de los aditivos y aumentaría por el deterioro de piezas de la máquina que lo contienen.
Fósforo (P)	Su disminución es proporcional al consumo o agotamiento de los aditivos AD y EP.
Calcio (Ca)	Puede tener una tendencia ascendente o descendente, dependiendo si la fuente es ingreso de contaminante o agotamiento de aditivos. Se encuentra en aditivos detergentes e inhibidores de herrumbre. También puede aparecer como contaminante por agua, polvo o ciertas grasas que contienen calcio. Los valores de alerta y alarma (superior e inferior) deben fijarse en función del tipo de aceite (comparación con el aceite nuevo) y del contexto de funcionamiento.
Boro (B)	Con frecuencia presente en aditivos EP, decreciente por agotamiento. Aumento por contaminación de refrigerante en aceite.
Silicio (Si)	Su origen es muy variado. Es un contaminante por excelencia (polvo, tierra, fibra de vidrio, granito, asbestos, etc.). Además, es el compuesto fundamental de aditivos antiespumantes. Puede aumentar (contaminación) o disminuir (agotamiento aditivo) de acuerdo a la situación. Aunque los dos efectos suelen neutralizarse, cuando la contaminación es elevada se sobrepone a la merma por agotamiento del antiespumante.
Sodio (Na)	Contaminación con agua de mar, mezcla con grasas sódicas, polvo o tierra. Se encuentra presente en ciertos anticongelantes (glicol). Tiende a aumentar cuando se incrementa la contaminación.
Bario (Ba)	En algunas grasas y en ciertos aditivos (detergentes) de motor. Aumenta o disminuye según la aplicación y el tipo de lubricante.
Titanio (Ti)	En rodamientos especiales (según aplicación), álabes de turbinas, rotores de compresor, resortes y restos de recubrimiento o pinturas. El aumento de concentración denota degradación o desgaste.
Vanadio (V)	Elemento característico y presente en válvulas. Su incremento manifiesta desgaste.
Potasio (K)	Presente en algunos anticongelantes. Su presencia es indicio de contaminación con esa sustancia. Polvo atmosférico y agua de mar.
Hierro (Fe)	Elemento mayoritario en mecanismos. Su aumento siempre está relacionado a un desgaste o deterioro del equipo.
Cobre (Cu)	Forma parte de cojinetes, intercambiadores de calor, aleaciones de latón. En ocasiones está presente en aditivos AD. Su incremento manifiesta mayormente desgaste.
Cromo (Cr)	En revestimientos duros, aceros inoxidables y piezas cromadas. Su crecimiento denota deterioro localizado en alguna parte de la máquina que lo contenga.
Molibdeno (Mo)	Es un aditivo de suspensión sólida pero está presente también en aleaciones (aros). Su consumo o aumento dependerá del tipo de lubricante y el contexto operativo de la máquina.
Plata (Ag)	Presente en ciertas aleaciones de componentes de grandes motores y asientos de válvulas de ciertos sistemas hidráulicos. Su aumento, aunque leve, define el nivel de desgaste.
Plomo (Pb)	Se encuentra presente en compuestos de Babbitt (recubrimiento de cojinetes). Su incremento indicaría desgaste.
Estaño (Sn)	Presente en compuestos de Babbitt. Su concentración manifiesta desgaste en partes componentes.
Niquel (Ni)	Común en aleaciones de acero inoxidable y cromados duros. Su presencia manifiesta desgaste de las partes componentes que contengan este elemento.
Aluminio (Al)	Componentes de ciertos rodamientos, cojinetes, pistones, impulsores, pinturas y recubrimientos; también presente en algunos polvos atmosféricos contaminantes. Su aumento manifestaría desgaste o contaminación.

Figura 50: Guía para el acercamiento a fallas sintomáticas por concentración de elementos.

Fuente: Manual de mantenimiento ingeniería, gestión y organización. Pistarelli, A. J

No	Condición operacional real del Componente	Valor del factor modificador de ISO 4406-99							
		f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇	f ₈
01. Factor f₁ por condición de lubricación									
01	Hidrodinámica HD.	1,00							
02	Elastohidrodinámica EHD.	0,99							
02. Factor f₂ por temperatura de operación T_{op}									
01	Hasta 65°C.		1,00						
02	Mayor de 65°C hasta 85°C.		0,99						
03	Superior de 85°C.		0,98						
03. Factor f₃ por Índice del aceite ISO 3448									
01	Hasta 100.			0,97					
02	Mayor de 100 hasta 130.			0,98					
03	Mayor de 130 hasta 150.			0,99					
04	Mayor de 150.			1,00					
04. Factor f₄ por contaminación del aceite con agua									
01	Sin probabilidad de contaminación.				1,00				
02	Escasa probabilidad de contaminación.				0,98				
03	Moderada probabilidad de contaminación.				0,94				
04	Alta probabilidad de contaminación.				0,90				
05. Factor f₅ por Tipo de material del depósito de aceite y de las tuberías									
01	Acero inoxidable 304.				1,00				
02	Acero carbón.				0,99				
06. Factor f₆ por polución en el ambiente									
01	Ninguna.					1,00			
02	Escasa.					0,99			
03	Moderada.					0,98			
04	Alta.					0,97			
07. Factor f₇ por tipo de programa de lubricación para cambio del aceite									
01	Por condición.						1,00		
02	Por preventivo.						0,99		
08. Factor f₈ por lugar de la toma de la muestra de aceite									
01	Puerto de muestreo.							1,00	
02	Por la parte superior con el vampiro.							0,99	
03	Por el drenaje.							0,97	

Figura 52: Factores modificadores del código de limpieza ISO 4406-99 del aceite

Fuente: El factor beta y el código de limpieza ISO 4406-99 en los procesos de filtración de aceites ISO 3448. AGUILLON, P. R. A.

Aceites para Motores Diesel				
Parámetro Sensible	Técnica	Unidad	Alerta	Alarma
Viscosidad a 100 °C	ASTM D 445	cSt	+ 5% ; - 10%	+ 10% ; - 20%
Viscosidad a 40 °C	ASTM D 445	cSt	+ 10% ; - 5%	+ 20% ; - 15%
Índice de Viscosidad (IV)	ASTM D 2270	--	- 10%	- 15%
Punto de inflamación	ASTM D-92	°C	- 10%	- 15%
Acidez (TAN)	ASTM D 664	mgKOH/g	+ 0,4	+ 1
Basicidad (TBN)	ASTM D 5984	mgKOH/g	- 40%	- 55%
Insolubles en Pentano	ASTM D 893	% peso	3	5
Cenizas sulfatadas	ASTM D 874	% peso	3	4
Envejecimiento - Corrosión al cobre	ASTM D 130	--	2b	2d
Aditivos				
Magnesio (Mg)	ASTM D 6595	ppm	+ 20% ; - 40%	+ 30% ; - 60%
Zinc (Zn)		ppm	+ 50% ; - 40%	+ 100% ; - 60%
Fósforo (P)		ppm	- 40%	- 60%
Calcio (Ca)		ppm	+ 20% ; - 40%	+ 30% ; - 60%
Boro (B)		ppm	- 40%	- 60%
Elementos de Desgaste				
Hierro (Fe)	ASTM D 6595	ppm	50	100
Cobre (Cu)		ppm	15	30
Cromo (Cr)		ppm	10	20
Molibdeno (Mo)		ppm	4	8
Plomo (Pb)		ppm	15	30
Estaño (Sn)		ppm	4	8
Níquel (Ni)		ppm	5	10
Plata (Ag)		ppm	3	6
Aluminio (Al)		ppm	10	25
Contaminantes				
Agua	ASTM D 95	%vol	0,3	0,6
Dilución	ASTM D 322	%vol	3	5
Silicio (Si)	ASTM D 6595	ppm	+ 150% ; - 40%	+ 200% ; - 60%
Sodio (Na)		ppm	40	80
Potasio (K)		ppm	50	100
Bario (Ba)		ppm	25	50
Titanio (Ti)		ppm	5	10
Vanadio (V)		ppm	10	20

Figura 53: Valores Orientativos de Alerta y Alarma para Aceites de Motor Diésel

Fuente: Manual de mantenimiento ingeniería, gestión y organización. Pistarelli, A. J

Aceites de Transmisión				
Parámetro Sensible	Técnica	Unidad	Alerta	Alarma
Viscosidad a 100 °C	ASTM D 445	cSt	+ 5% ; - 10%	+ 10% ; - 15%
Viscosidad a 40 °C	ASTM D 445	cSt	+ 10% ; - 5%	+ 15% ; - 10%
Índice de Viscosidad (IV)	ASTM D 2270	--	- 8%	- 15%
Densidad a 15 °C	ASTM D 1298	g/ml	+ 5% ; - 8%	+ 8% ; - 12%
Acidez (TAN)	ASTM D 664	mgKOH/g	+ 0,4	+ 1,2
Potencial ácido (pH)	--	--	5	4
Residuo Carbonoso (Conradson)	ASTM D 189	% peso	+ 0,6	+ 1,2
Color	ASTM D 1500	--	4	5,5
Envejecimiento - Corrosión al cobre	ASTM D 130	--	2c	2e
Vida útil remanente (RBOT)	ASTM D 2272	%	50	35
Aditivos				
Magnesio (Mg)	ASTM D 6595	ppm	+ 50%	+ 100%
Zinc (Zn)		ppm	+ 100% ; - 40%	+ 150% ; - 60%
Fósforo (P)		ppm	- 40%	- 60%
Calcio (Ca)		ppm	+ 100% ; - 40%	+ 150% ; - 60%
Boro (B)		ppm	- 40%	- 60%
Elementos de Desgaste				
Hierro (Fe)	ASTM D 6595	ppm	40	80
Cobre (Cu)		ppm	15	25
Cromo (Cr)		ppm	5	10
Molibdeno (Mo)		ppm	4	8
Plomo (Pb)		ppm	5	10
Estaño (Sn)		ppm	4	8
Niquel (Ni)		ppm	3	5
Aluminio (Al)		ppm	4	8
Contaminantes				
Agua	ASTM D 95 / D 6304	%vol / %p	0,15	0,2
Carbón libre	Cromatografía	%	Vestigios	0,5
Silicio (Si)	ASTM D 6595	ppm	+ 150% ; - 40%	+ 200% ; - 60%
Sodio (Na)		ppm	5	15
Bario (Ba)		ppm	5	10
Titanio (Ti)		ppm	2	4
Vanadio (V)		ppm	2	4
Conteo de Partículas				
Recuento partículas (en 1ml) > 4µm	ISO 4406	Cantidad	2500-5000	10000-20000
Recuento partículas (en 1ml) > 6µm		Cantidad	640-1300	2500-5000
Recuento partículas (en 1ml) > 14µm		Cantidad	160-320	320-640
Código ISO 4406		--	20/18/16	21/19/17

Figura 54: Valores Orientativos de Alerta y Alarma para Aceites de Transmisión

Fuente: Manual de mantenimiento ingeniería, gestión y organización. Pistarelli, A. J

<i>Aceites para Sistemas Hidráulicos</i>				
Parámetro Sensible	Técnica	Unidad	Alerta	Alarma
Viscosidad a 100 °C	ASTM D 445	cSt	+ 5% ; - 7%	+ 10% ; - 12%
Viscosidad a 40 °C	ASTM D 445	cSt	+ 7% ; - 5%	+ 10% ; - 10%
Índice de Viscosidad (IV)	ASTM D 2270	--	- 8%	- 15%
Densidad a 15 °C	ASTM D 1298	g/ml	+ 5% ; - 5%	+ 8% ; - 10%
Acidez (TAN)	ASTM D 664	mgKOH/g	+ 0,6	+ 1,2
Punto de congelación	ASTM D 97	°C	+ 10%	+ 15%
Punto de inflamación	ASTM D 92	°C	- 5%	- 10%
Antiherrumbre	ASTM D 665	--	No Pasa	--
Espumación (Secuencia 1, 2 y 3)	ASTM D 892	ml	- 10%	- 20%
Potencial ácido (pH)	--	--	5	4
Cenizas sulfatadas	ASTM D 874	%	0,5	1
Residuo Carbonoso (Conradson)	ASTM D 189	% peso	0,4	0,8
Color	ASTM D 1500	--	3	4
Envejecimiento - Corrosión al cobre	ASTM D 130	--	2c	2e
Espumación (Secuencia 1, 2 y 3)	ASTM D 892	ml	- 10%	- 20%
Aditivos				
Magnesio (Mg)	ASTM D 6595	ppm	+ 30% ; - 40%	+ 40% ; - 60%
Zinc (Zn)		ppm	+ 100% ; - 40%	+ 150% ; - 60%
Fósforo (P)		ppm	- 40%	- 60%
Calcio (Ca)		ppm	+ 50% ; - 40%	+ 100% ; - 60%
Boro (B)		ppm	- 40%	- 60%
Elementos de Desgaste				
Hierro (Fe)	ASTM D 6595	ppm	20	35
Cobre (Cu)		ppm	5	15
Cromo (Cr)		ppm	5	10
Molibdeno (Mo)		ppm	5	15
Plomo (Pb)		ppm	3	6
Estaño (Sn)		ppm	3	6
Níquel (Ni)		ppm	2	4
Plata (Ag)		ppm	3	6
Aluminio (Al)		ppm	4	8
Contaminantes				
Agua	ASTM D 95 / D 6304	%vol / %p	+ 0,15%	+ 0,25%
Silicio (Si)	ASTM D 6595	ppm	+ 150% ; - 40%	+ 200% ; - 60%
Sodio (Na)		ppm	5	10
Bario (Ba)		ppm	5	10
Titanio (Ti)		ppm	4	8
Vanadio (V)		ppm	4	8
Conteo de Partículas				
Recuento partículas (en 1ml) > 4µm	ISO 4406	Cantidad	2500-5000	2500-5000
Recuento partículas (en 1ml) > 6µm		Cantidad	640-1300	1300-2500
Recuento partículas (en 1ml) > 14µm		Cantidad	80-160	160-320
Código ISO 4406		--	20/18/15	20/19/16

Figura 55: Valores Orientativos de Alerta y Alarma para Sistemas Hidráulicos

Fuente: Manual de mantenimiento ingeniería, gestión y organización. Pistarelli, A. J

ID Aplicables	ESTATUS	SISTEMAS	RECUENTO DE PRUEBA DE			PORCENTAJE		INDICE	HOLLIN	NITRACION	SULFATACION	OXIDACION	TBN/TAN
			PARTICULAS	VISCOSIDAD	ESPECTROMETRIA	DE COMB	DE AGUA						
1131	ACTIVO	Aceite Motor	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1131	ACTIVO	Aceite Hidraulico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1131	ACTIVO	Aceite de Transmision	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1131	ACTIVO	Aceite Diferencial	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1131	ACTIVO	Mandos Finales Der	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1131	ACTIVO	Mandos Finales Izq	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1132	ACTIVO	Aceite Motor	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1132	ACTIVO	Aceite Hidraulico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1132	ACTIVO	Aceite de Transmision	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1132	ACTIVO	Aceite Diferencial	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1132	ACTIVO	Mandos Finales Der	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1132	ACTIVO	Mandos Finales Izq	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1133	ACTIVO	Aceite Motor	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1133	ACTIVO	Aceite Hidraulico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1133	ACTIVO	Aceite de Transmision	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1133	ACTIVO	Aceite Diferencial	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1133	ACTIVO	Mandos Finales Der	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1133	ACTIVO	Mandos Finales Izq	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1134	ACTIVO	Aceite Motor	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1134	ACTIVO	Aceite Hidraulico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1134	ACTIVO	Aceite de Transmision	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1134	ACTIVO	Aceite Diferencial	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1134	ACTIVO	Mandos Finales Der	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1134	ACTIVO	Mandos Finales Izq	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1136	ACTIVO	Aceite Motor	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1136	ACTIVO	Aceite Hidraulico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1136	ACTIVO	Aceite de Transmision	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1136	ACTIVO	Aceite Diferencial	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1136	ACTIVO	Mandos Finales Der	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1136	ACTIVO	Mandos Finales Izq	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1137	ACTIVO	Aceite Motor	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1137	ACTIVO	Aceite Hidraulico	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1137	ACTIVO	Aceite de Transmision	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1137	ACTIVO	Aceite Diferencial	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
1137	ACTIVO	Mandos Finales Der	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

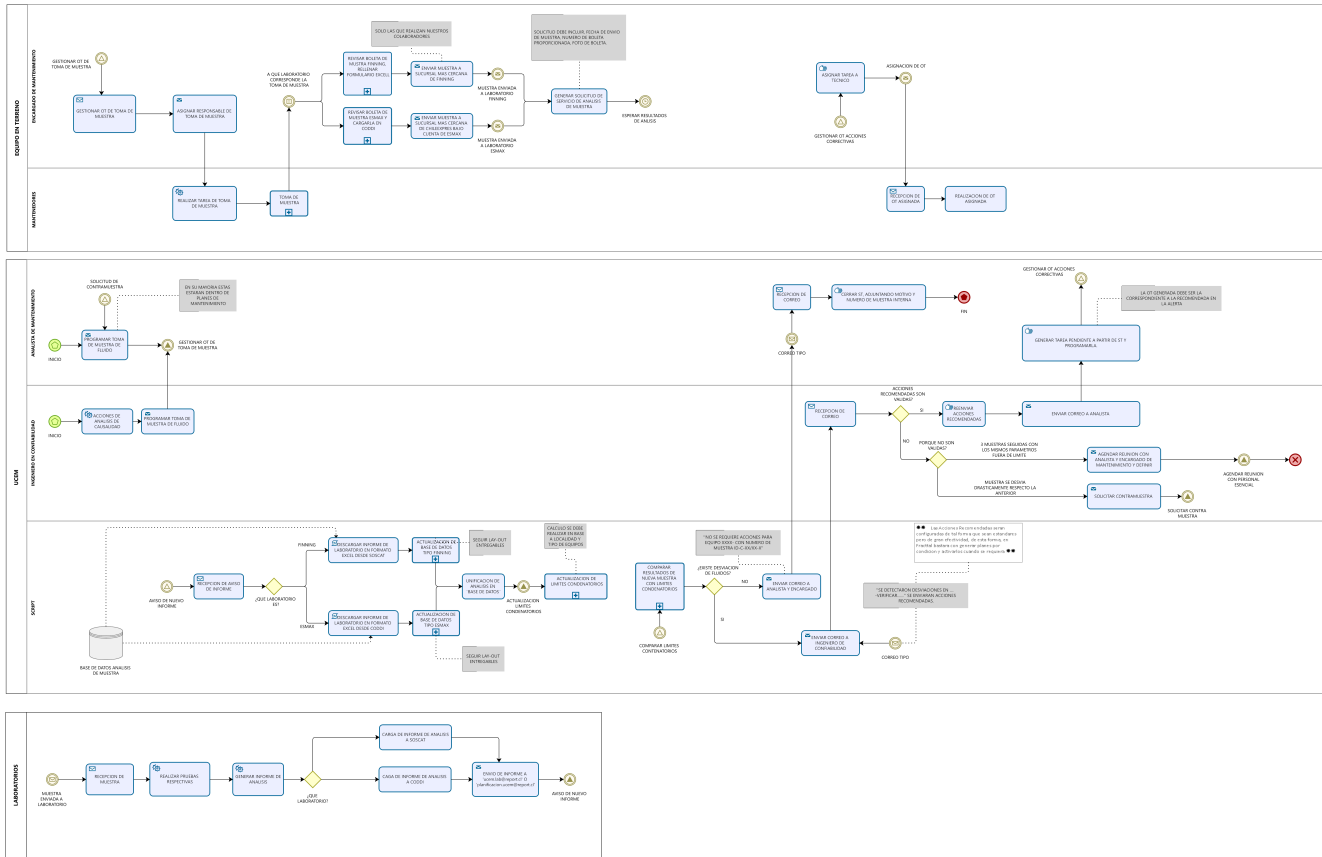
Figura 56: Extracto Base de Datos pruebas a realizar

Fuente: Elaboración Propia.

ID	ACEITE DE MOTOR						ACEITE HIDRAULICO					
	Aplicables	UBICACIÓN	Acete Motor Recomendado	Especificaciones Recomendadas Motor	Acete de Motor Utilizado	Cumple Motor	Acete Hidraulico Recomendado	Especificaciones Recomendadas Hidraulico	Acete Hidraulico Utilizado	Cumple Hidraulico		
1138		61_SAN ANTONIO	RIMULA R3 X 15W40	ACEA E5,36; API CH-4/CG-4/CF-4/CF; VDS-2	Mobil MX 15W 40	SI	TELLUS STX46 -TELLUS S3V46	ISO 11158; DIN 51524-3; ASTM 6158	Nuto H 68	NO		
1139		61_SAN ANTONIO	RIMULA R3 X 15W40	ACEA E5,36; API CH-4/CG-4/CF-4/CF; VDS-2	Mobil MX 15W 40	SI	TELLUS STX46 -TELLUS S3V46	ISO 11158; DIN 51524-3; ASTM 6158	Nuto H 68	NO		
1140		61_SAN ANTONIO	RIMULA R3 X 15W40	ACEA E5,36; API CH-4/CG-4/CF-4/CF; VDS-2	Mobil MX 15W 40	SI	TELLUS STX46 -TELLUS S3V46	ISO 11158; DIN 51524-3; ASTM 6158	Nuto H 68	NO		
1131		71_SAN VICENTE	RIMULA R3 X 15W40	ACEA E5,36; API CH-4/CG-4/CF-4/CF; VDS-2	SAE 15W-40	SI	TELLUS STX46 -TELLUS S3V46	ISO 11158; DIN 51524-3; ASTM 6158	NUUTO 68	NO		
1132		61_SAN ANTONIO	RIMULA R3 X 15W40	ACEA E5,36; API CH-4/CG-4/CF-4/CF; VDS-2	Mobil MX 15W-40	SI	TELLUS STX46 -TELLUS S3V46	ISO 11158; DIN 51524-3; ASTM 6158	Nuto H 68	NO		
1133		21_ANTOFAGASTA	RIMULA R3 X 15W40	ACEA E5,36; API CH-4/CG-4/CF-4/CF; VDS-2	MOBIL MX 15W-40	SI	TELLUS STX46 -TELLUS S3V46	ISO 11158; DIN 51524-3; ASTM 6158	MOBIL NUUTO H68	NO		
1602		61_SAN ANTONIO	Valvoline Premium Blue high-quality 15W-40	API CI-4 PLUS, CI-4, CH-4, SL		SI	ESSO TORQUE FLUID 56 (temperate climates) ESSO TORQUE FLUID 62 (hot climates)	SAE 80W API GL-4		NO		
1603		61_SAN ANTONIO	Valvoline Premium Blue high-quality 15W-40	API CI-4 PLUS, CI-4, CH-4, SL	Mobil MX 15W 40	SI	ESSO TORQUE FLUID 56 (temperate climates) ESSO TORQUE FLUID 62 (hot climates)	SAE 80W API GL-4	MOBIL FLUID 424	SI		
1604		54_CDA	Valvoline Premium Blue high-quality 15W-40	API CI-4 PLUS, CI-4, CH-4, SL	Mobil MX 15W 40	SI	ESSO TORQUE FLUID 56 (temperate climates) ESSO TORQUE FLUID 62 (hot climates)	SAE 80W API GL-4	MOBIL FLUID 424	SI		
					Delvac MX 15W-40	SI			Mobilfluid 424	SI		

Figura 57: Extracto Base de Datos Fluidos Equipos

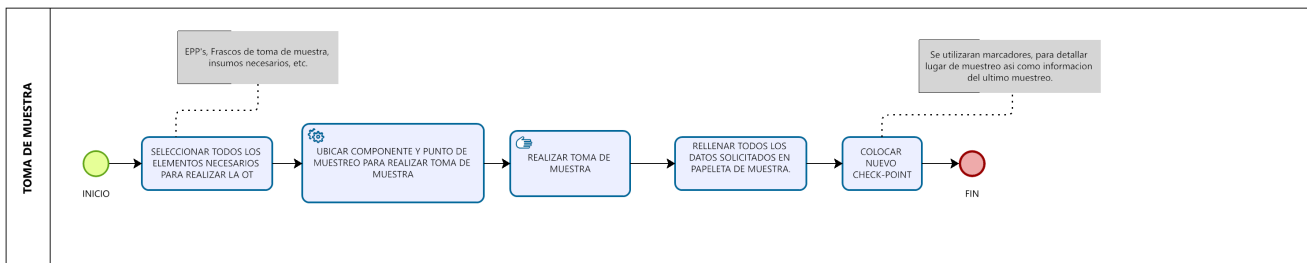
Fuente: Elaboración Propia.



Modeler

Figura 58: Flujo General Procedimiento Trabajo

Fuente: Elaboración Propia.



Powered by
Modeler

Figura 59: Sub-Flujo Procedimiento Toma de Muestra

Fuente: Elaboración Propia.

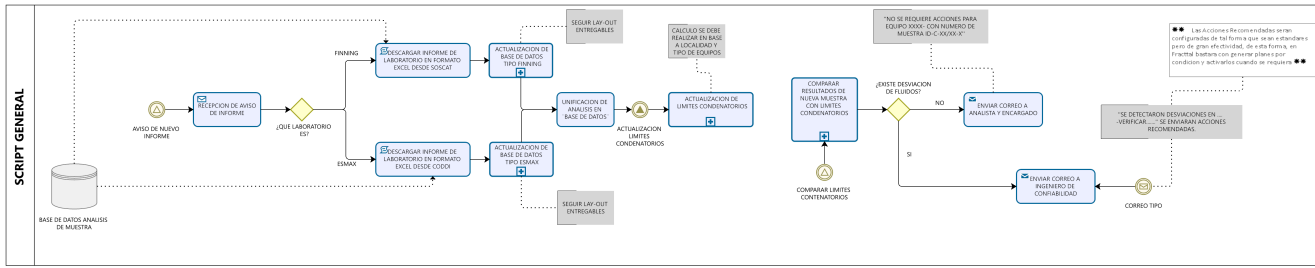


Figura 60: Flujo Funcionamiento Script

Fuente: Elaboración Propia.

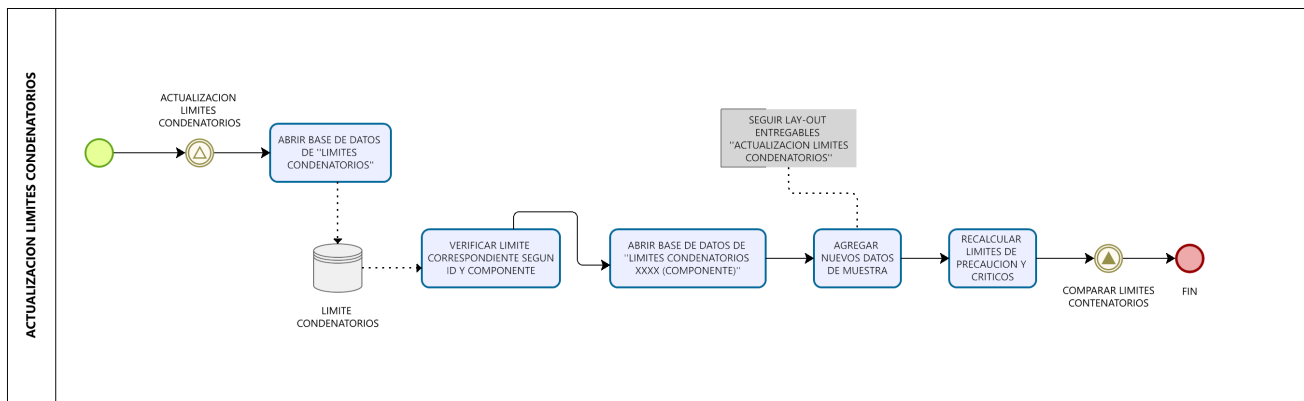


Figura 61: Flujo Actualización Límites Condenatorios

Fuente: Elaboración Propia.

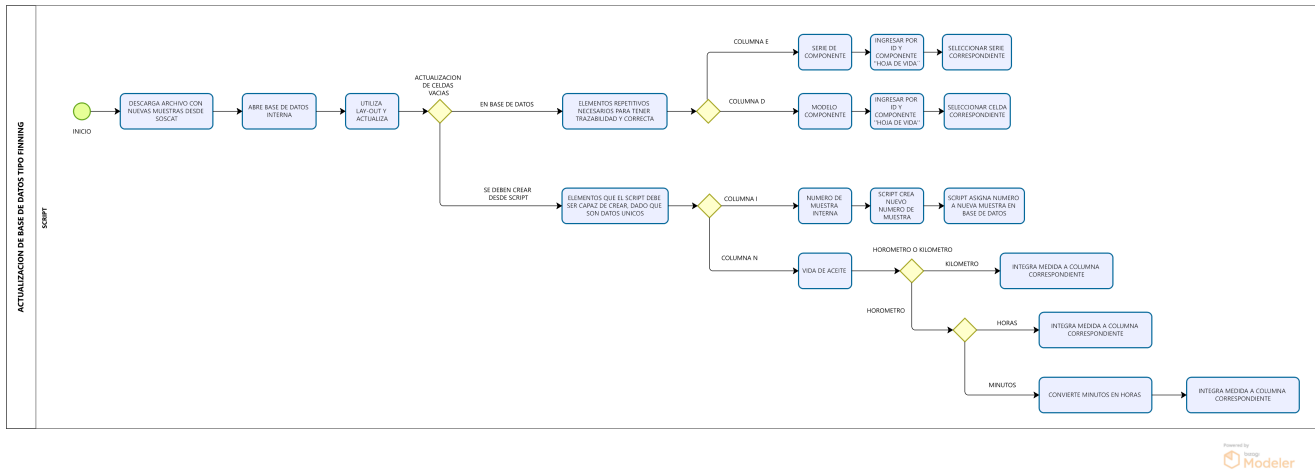


Figura 62: Flujo Actualización Resultados Tipo Finning

Fuente: Elaboración Propia.

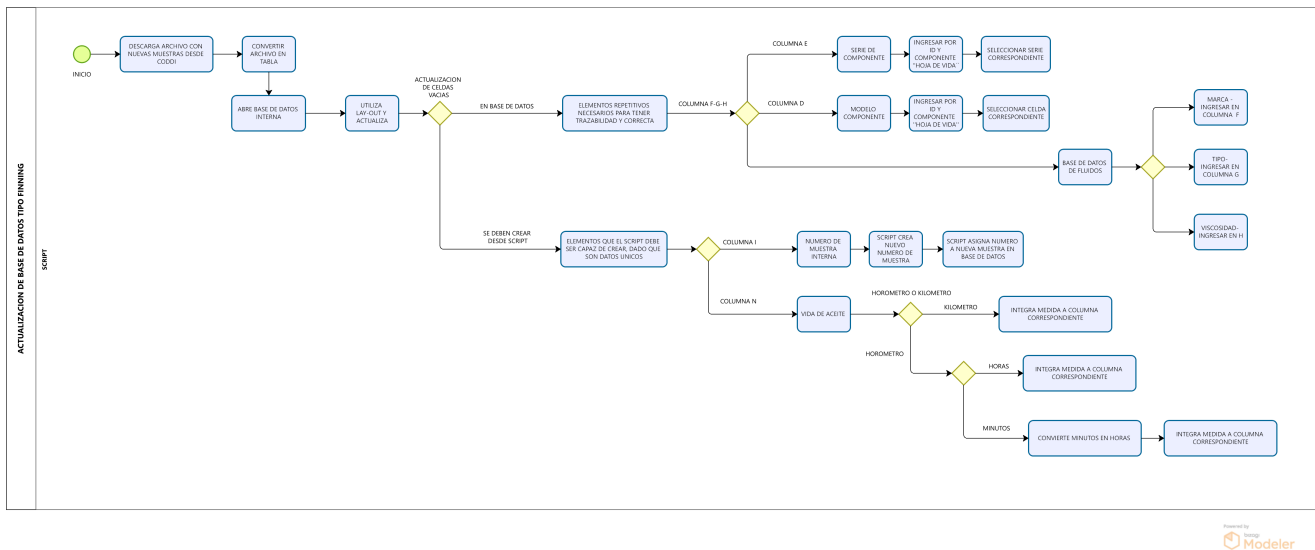


Figura 63: Flujo Actualización Resultados Tipo Esmax

Fuente: Elaboración Propia.

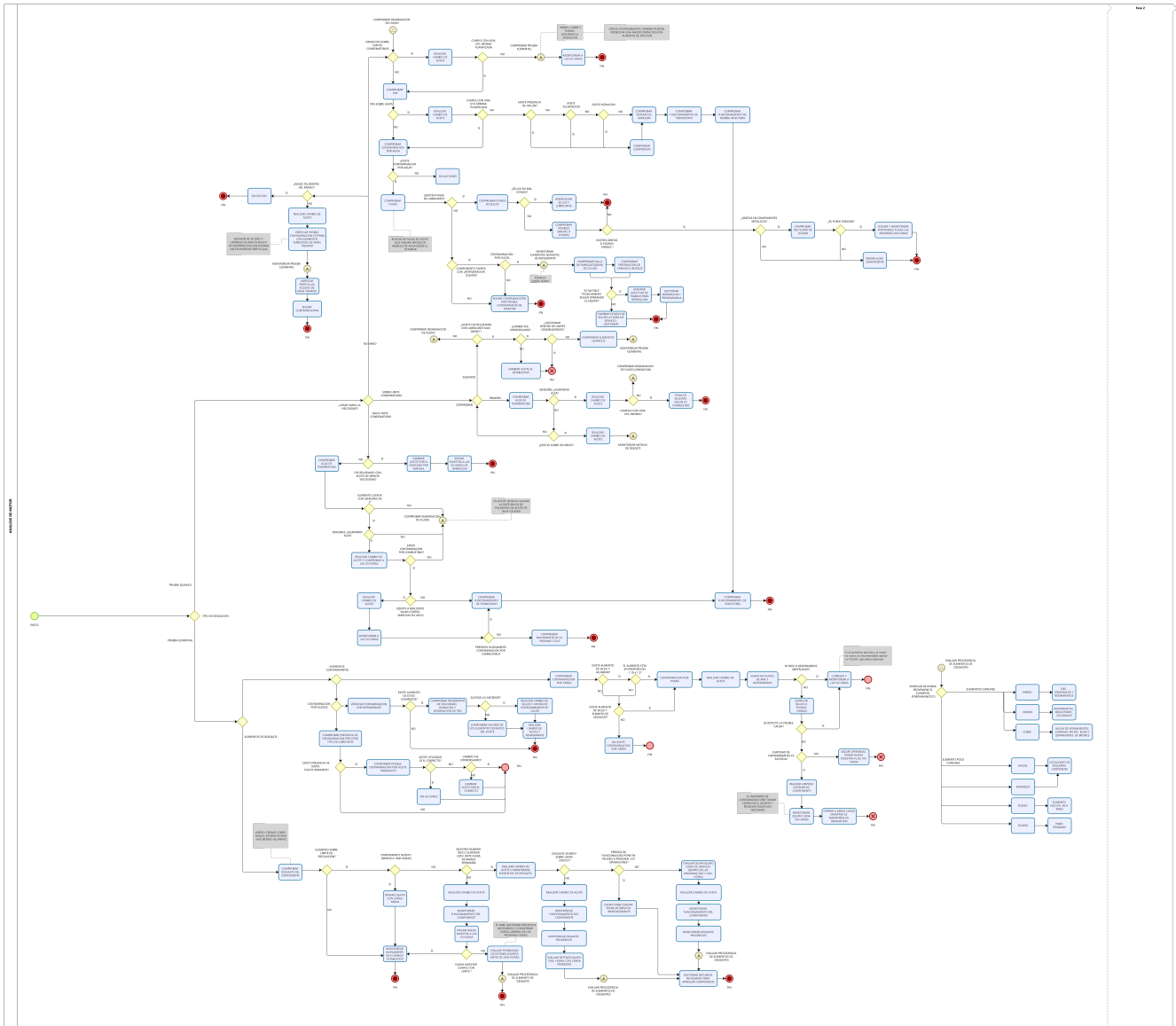


Figura 64: Mapa de Decisión Análisis Resultados Aceite Motor

Fuente: Elaboración Propia.

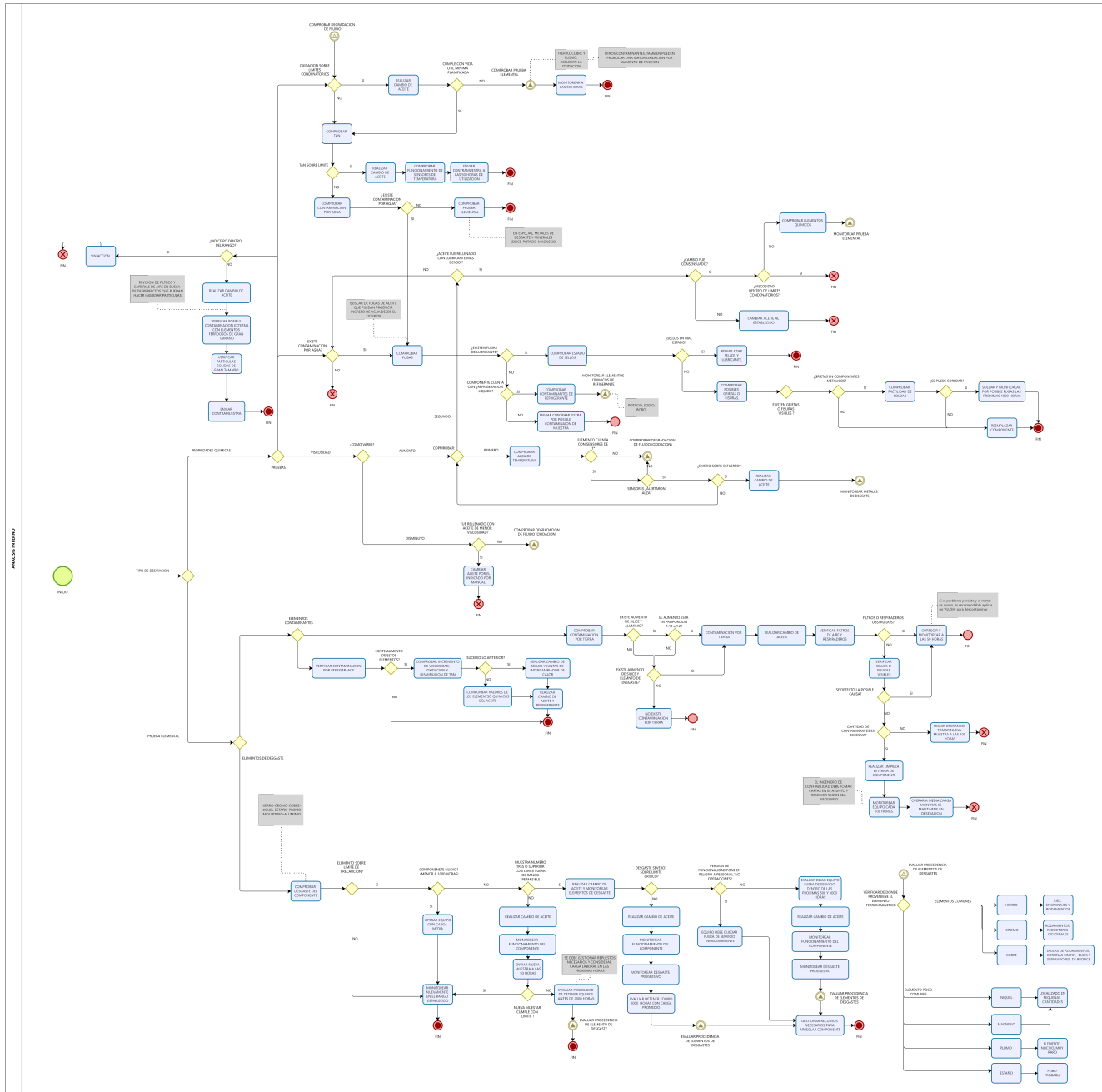


Figura 65: Mapa de Decisión Análisis Resultados Aceite Sistemas de Engranajes

Fuente: Elaboración Propia.

ACTIVIDADES ADMINISTRATIVAS			
	HORAS INVERTIDAS	COSTO UNITARIO	COSTO POR ACTIVIDAD
LEVANTAMIENTO DE INFORMACION	64	2600	\$166.400
CREACION DE FORMULARIOS	20	2600	\$52.000
CREACION DE INSTRUCTIVOS	10	2600	\$26.000
DESARROLLO DE DASHBOARD	100	0	\$0
CREACION DE MODELO PREDICTIVO	100	2600	\$260.000
LEVANTAMIENTO DE FLUIDOS	100	2600	\$260.000
ANALISIS DE CRITICIDAD	30	2600	\$78.000
ANALISIS Y EVALUACION DE LABORATORIOS	6	2600	\$15.600
ANALISIS DE EQUIPOS	30	2600	\$78.000
BASES DE DATOS	60	2600	\$156.000
CALCULOS DE LIMITES CONDENATORIOS	10	2600	\$26.000
ACTIVIDADES VARIAS (ANALISIS DE RESULTADOS)	20	2600	\$52.000
DETERMINACION DE PARAMETROS A ANALIZAR	30	2600	\$78.000
MODIFICACION PLANES DE MANTENIMIENTO	20	0	\$0
RETROALIMENTACION Y AJUSTES	20	2600	\$52.000
CAPACITACION ANALISIS DE RESULTADOS DE ANALISIS	2	300000	\$600.000
CONFIGURACION PLATAFORMA CODDI	1	2600	\$2.600
TOTAL	623		\$1.736.200

Figura 66: Costos Actividades Administrativas Implementación

Fuente: Elaboración Propia.

ANALISIS FUNCIONAL			
	HORAS INVERTIDAS	COSTO UNITARIO	COSTO POR ACTIVIDAD
ANALISIS FUNCIONAL ANTOFAGASTA	50	2600	\$130.000
ANALISIS FUNCIONAL SAI	15	2600	\$39.000
ANALISIS FUNCIONAL NATALES	12	2600	\$31.200
ANALISIS FUNCIONAL VALPARAISO	3	2600	\$7.800
ANALISIS FUNCIONAL COQUIMBO	1	2600	\$2.600
ANALISIS FUNCIONAL CDA	3	2600	\$7.800
ANALISIS FUNCIONAL SAN VICENTE	16	2600	\$41.600
ANALISIS FUNCIONAL CHAÑARAL	13	2600	\$33.800
ANALISIS FUNCIONAL IQUIQUE	7	2600	\$18.200
ANALISIS FUNCIONAL SANTIAGO MIN	1	2600	\$2.600
ANALISIS FUNCIONAL PUERTO MONTT	4	2600	\$10.400
TOTAL	125		\$325.000

Figura 67: Costos Análisis Funcional

Fuente: Elaboración Propia.

CAPACITACION PARA TOMA DE MUESTRA			
	HORAS INVERTIDAS	COSTO UNITARIO	COSTO POR ACTIVIDAD
ANTOFAGASTA	3	0	\$0
SAI	3	0	\$0
NATALES	3	0	\$0
VALPARAISO	3	0	\$0
COQUIMBO	3	0	\$0
CDA	3	0	\$0
SAN VICENTE	3	0	\$0
CHAÑARAL	3	0	\$0
IQUIQUE	3	0	\$0
SANTIAGO MIN	3	0	\$0
PUERTO MONTT	3	0	\$0
TOTAL	33		\$0

Figura 68: Costos Capacitación Toma de Muestras

Fuente: Elaboración Propia.

FEMCA NACIONAL			
	HORAS INVERTIDAS	COSTO UNITARIO	COSTO POR ACTIVIDAD
FEMCA ANTOFAGASTA	10	2600	\$26.000
FEMCA SAI	4	2600	\$10.400
FEMCA NATALES	3	2600	\$7.800
FEMCA VALPARAISO	3	2600	\$7.800
FEMCA COQUIMBO	3	2600	\$7.800
FEMCA CDA	3	2600	\$7.800
FEMCA SAN VICENTE	3	2600	\$7.800
FEMCA CHAÑARAL	3	2600	\$7.800
FEMCA IQUIQUE	3	2600	\$7.800
FEMCA SANTIAGO MIN	3	2600	\$7.800
FEMCA PUERTO MONTT	3	2600	\$7.800
TOTAL	41		\$106.600

Figura 69: Costos Análisis FMECA Nacional

Fuente: Elaboración Propia.

HERRAMIENTAS E INSUMOS			
	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO POR ACTIVIDAD
BOMBAS EXTRACTORAS	87	6000	\$522.000
GUANTES DE NITRILLO	37	9350	\$345.950
PAÑOS DE LIMPIEZA	33	84000	\$2.772.000
TOTAL			\$3.639.950

Figura 70: Costos Herramientas e Insumos

Fuente: Elaboración Propia.

TOTAL		
COSTO POR ACTIVIDAD		
ANALISIS FUCIONAL	\$	325.000,00
CAPACITACION PARA TOMA DE MUESTRA	\$	-
ACTIVIDADES ADMINISTRATIVAS	\$	1.736.200,00
FEMCA NACIONAL	\$	106.600,00
HERRAMIENTAS E INSUMOS	\$	3.639.950,00
	Total	\$ 5.807.750,00

Figura 71: CAPEX TOTAL

Fuente: Elaboración Propia.

ID	LABORATORIO	PRECIO KIT	ANALISIS POR AÑO	DESCUENTOS POR CVA	COSTO DE ANALISIS	CHILEXPRESS	MANO DE OBRA	TOTAL MANO DE OBRA
1138	ESMAX	0	31	0	0	0	717	22217
1602	ESMAX	0	23	0	0	0	717	16483
1132	ESMAX	0	12	0	0	0	717	8600
1139	ESMAX	0	30	0	0	0	717	21500
1141	ESMAX	0	20	0	0	0	717	14333
7770	ESMAX	0	7	0	0	0	717	5017
1147	ESMAX	0	38	0	0	0	717	27233
1603	ESMAX	0	26	0	0	0	717	18633
1612	ESMAX	0	38	0	0	0	717	27233
1613	ESMAX	0	36	0	0	0	717	25800
1614	ESMAX	0	34	0	0	0	717	24367
1615	ESMAX	0	39	0	0	0	717	27950
1618	ESMAX	0	36	0	0	0	717	25800
2443	ESMAX	0	12	0	0	0	717	8600
1140	ESMAX	0	31	0	0	0	717	22217
2435	ESMAX	0	7	0	0	0	717	5017
2436	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
2438	ESMAX	0	10	0	0	0	717	7167
2450	ESMAX	0	15	0	0	0	717	10750
2442	ESMAX	0	12	0	0	0	717	8600
7761	ESMAX	0	1	0	0	0	717	717
7703	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
7746	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
7773	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
5915	Finning	21340	9	2	149380	17562	717	6450
6507	ESMAX	0	14	0	0	0	717	10033
5914	Finning	21340	2	0	42680	17562	717	1433
7774	ESMAX	0	1	0	0	0	717	717
7775	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
5110	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
2525	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
5912	Finning	21340	19	0	405460	17562	717	13617
5913	Finning	21340	16	0	341440	17562	717	11467
5111	Finning	21340	4	0	85360	17562	717	2867
5112	Finning	21340	17	0	362780	17562	717	12183
5113	Finning	21340	14	6	170720	17562	717	10033
6505	ESMAX	0	12	0	0	0	717	8600
6506	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
6514	ESMAX	0	15	0	0	0	717	10750
GEN002	ESMAX	0	7	0	0	0	717	5017
1562	ESMAX	0	14	0	0	0	717	10033
1556	ESMAX	0	18	0	0	0	717	12900
1605	ESMAX	0	21	0	0	0	717	15050
1606	ESMAX	0	21	0	0	0	717	15050
7772	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
7765	ESMAX	0	5	0	0	0	717	3583
7742	ESMAX	0	2	0	0	0	717	1433
1134	ESMAX	0	27	0	0	0	717	19350
1604	ESMAX	0	23	0	0	0	717	16483
1616	ESMAX	0	28	0	0	0	717	20067
1617	ESMAX	0	22	0	0	0	717	15767
1136	ESMAX	0	66	0	0	0	717	47300
1131	ESMAX	0	11	0	0	0	717	7883
1146	ESMAX	0	21	0	0	0	717	15050
2453	Finning	21340	2	0	42680	14654	717	1433
2447	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5916	Finning	21340	0	1	-21340	14654	717	0
5902	Finning	21340	1	1	0	14654	717	717
5903	Finning	21340	0	0	0	14654	717	0

Figura 72: Costos Operativos: Imagen 1A

Fuente: Elaboración Propia.

5903	Finning	21340	0	0	0	14654	717	0
5904	Finning	21340	1	1	0	14654	717	717
5917	Finning	21340	31	0	661540	14654	717	22217
5918	Finning	21340	37	0	789580	14654	717	26517
5919	Finning	21340	14	0	298760	14654	717	10033
5920	Finning	21340	20	0	426800	14654	717	14333
5921	Finning	21340	3	0	64020	14654	717	2150
5922	Finning	21340	14	0	298760	14654	717	10033
5923	Finning	21340	20	0	426800	14654	717	14333
5925	Finning	21340	2	1	21340	14654	717	1433
5926	Finning	21340	0	0	0	14654	717	0
5927	Finning	21340	8	2	128040	14654	717	5733
5928	Finning	21340	11	4	149380	14654	717	7883
2434	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
2439	ESMAX	0	6	0	0	0	717	4300
2440	ESMAX	0	12	0	0	0	717	8600
2441	ESMAX	0	14	0	0	0	717	10033
7767	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
5104	ESMAX	0	14	0	0	0	717	10033
5901	Finning	21340	6	2	85360	8261	717	4300
5909	Finning	21340	14	4	213400	8261	717	10033
5910	Finning	21340	13	3	213400	8261	717	9317
4795	ESMAX	0	1	0	0	0	717	717
5115A	ESMAX	0	14	0	0	0	717	10033
4796	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
4797	ESMAX	0	5	0	0	0	717	3583
2516	ESMAX	0	5	0	0	0	717	3583
2456	ESMAX	0	13	0	0	0	717	9317
2457	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
2458	ESMAX	0	13	0	0	0	717	9317
2459	ESMAX	0	9	0	0	0	717	6450
2460	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
2461	ESMAX	0	9	0	0	0	717	6450
2462	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
2464	ESMAX	0	4	0	0	0	717	2867
7747	ESMAX	0	2	0	0	0	717	1433
2465	ESMAX	0	3	0	0	0	717	2150
7762	ESMAX	0	2	0	0	0	717	1433
7763	ESMAX	0	2	0	0	0	717	1433
7764	ESMAX	0	5	0	0	0	717	3583
7766	ESMAX	0	3	0	0	0	717	2150
7768	ESMAX	0	5	0	0	0	717	3583
7769	ESMAX	0	7	0	0	0	717	5017
7771	ESMAX	0	7	0	0	0	717	5017
2466	ESMAX	0	3	0	0	0	717	2150
1142	ESMAX	0	7	0	0	0	717	5017
1133	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
1137	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
2446	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
2448	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
6502	Finning	21340	21	6	320100	7798	717	15050
6503	Finning	21340	21	6	320100	7798	717	15050
5908	Finning	21340	35	7	597520	7798	717	25083
5108	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5929	Finning	21340	35	7	597520	7798	717	25083
5930	Finning	21340	35	7	597520	7798	717	25083
5931	Finning	21340	35	7	597520	7798	717	25083
5932	Finning	21340	35	7	597520	7798	717	25083
5933	Finning	21340	35	7	597520	7798	717	25083
5934	ESMAX	0	35	0	0	0	717	25083

Figura 73: Costos Operativos: Imagen 1B

Fuente: Elaboración Propia.

6528	ESMAX	0	16	0	0	0	717	11467
6529	ESMAX	0	16	0	0	0	717	11467
6530	ESMAX	0	16	0	0	0	717	11467
1608	ESMAX	0	3	0	0	0	717	2150
1611	ESMAX	0	7	0	0	0	717	5017
5924	Finning	21340	13	0	277420	7798	717	9317
5905	Finning	21340	21	6	320100	7798	717	15050
5907	Finning	21340	21	6	320100	7798	717	15050
5911	ESMAX	0	19	0	0	0	717	13617
2467	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
5018	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
5105	ESMAX	0	15	0	0	0	717	10750
2429	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
4919	ESMAX	0	26	0	0	0	717	18633
2428	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
2430	ESMAX	0	5	0	0	0	717	3583
2519	ESMAX	0	4	0	0	0	717	2867
2520	ESMAX	0	7	0	0	0	717	5017
2521	ESMAX	0	3	0	0	0	717	2150
5106	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5107	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
2449	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
2454	ESMAX	0	12	0	0	0	717	8600
2455	ESMAX	0	12	0	0	0	717	8600
4916	ESMAX	0	6	0	0	0	717	4300
4917	ESMAX	0	6	0	0	0	717	4300
4918	ESMAX	0	10	0	0	0	717	7167
6520	ESMAX	0	4	0	0	0	717	2867
5006	ESMAX	0	9	0	0	0	717	6450
5007	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5008	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5009	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5010	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5011	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5012	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5013	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5014	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5015	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5016	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5017	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5019	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5020	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5021	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5022	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5023	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5024	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5025	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
5026	ESMAX	0	8	0	0	0	717	5733
6526	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
6527	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
4920	ESMAX	0	26	0	0	0	717	18633
6515	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
6516	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
6517	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
6518	ESMAX	0	2	0	0	0	717	1433
6519	ESMAX	0	5	0	0	0	717	3583
6522	ESMAX	0	1	0	0	0	717	717
6521	ESMAX	0	0	0	0	0	717	0
6523	ESMAX	0	12	0	0	0	717	8600
5109	ESMAX	0	12	0	0	0	717	8600
		0	2065	93	\$10.499.280			\$1.479.917

Figura 74: Costos Operativos: Imagen 1C

Fuente: Elaboración Propia.

	CANTIDAD PAÑOS DE IMPIEZA (ROLLO)	PRECIO PAÑOS DE LIMPIEZA	SALDO POR AÑO	GUANTES DE NITRILO (CAJA)	PRECIO GUANTES DE NITRILO	SALDO POR AÑO
61_SAN ANTONIO	2	84000	168000	3	9350	28050
81_PUERTO MONTT	1	84000	84000	1	9350	9350
92_NATALES	3	84000	252000	3	9350	28050
51_VALPARAÍSO	1	84000	84000	1	9350	9350
31_COQUIMBO	1	84000	84000	1	9350	9350
91_PUNTA ARENAS	1	84000	84000	1	9350	9350
54_CDA	1,5	84000	126000	2	9350	18700
71_SAN VICENTE	1	84000	84000	1	9350	9350
71_SAN VICENTE	1	84000	84000	1	9350	9350
71_SAN VICENTE	1	84000	84000	1	9350	9350
71_SAN VICENTE	1	84000	84000	1	9350	9350
71_SAN VICENTE	1	84000	84000	1	9350	9350
25_CHAÑARAL	2	84000	168000	2	9350	18700
11_IQUIQUE	1	84000	84000	1	9350	9350
21_ANTOFAGASTA	1	84000	84000	1	9350	9350
21_ANTOFAGASTA	1	84000	84000	1	9350	9350
21_ANTOFAGASTA	1	84000	84000	1	9350	9350
21_ANTOFAGASTA	1	84000	84000	1	9350	9350
21_ANTOFAGASTA	1	84000	84000	1	9350	9350
21_ANTOFAGASTA	1	84000	84000	1	9350	9350
21_ANTOFAGASTA	2	84000	168000	2	9350	18700
21_ANTOFAGASTA	3	84000	252000	3	9350	28050
21_ANTOFAGASTA	1	84000	84000	1	9350	9350
21_ANTOFAGASTA	1	84000	84000	1	9350	9350
21_ANTOFAGASTA	1	84000	84000	1	9350	9350
21_ANTOFAGASTA	1	84000	84000	1	9350	9350
54_MIN	0,5	84000	42000	1	9350	9350
	35		\$2.940.000	37		\$345.950

Figura 75: Costos Operativos: Imagen 2

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 76: Prototipo de Carta Gantt para Implementación de Mantenimiento Predictivo Basado en Análisis Tribológicos

Fuente: Elaboración Propia.