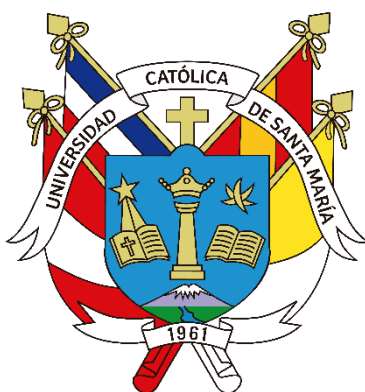


Universidad Católica de Santa María
Escuela de Postgrado
Maestría en Ingeniería de Mantenimiento



**ANÁLISIS DE LA MIGRACIÓN Y EXTENSIÓN DEL
PERIODO DE CAMBIO DEL LUBRICANTE EN EL TREN
POSTERIOR DE CAMIONES MINEROS CAT 797F**

Tesis presentada por el Bachiller:

Tapia Melgar, Eduardo Saúl

Para optar el Grado Académico de:

Maestro en Ingeniería de Mantenimiento

Asesor:

Mgter. Quispe Ccachuco, Marcelo Jaime

Arequipa - Perú

2023

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
ESCUELA DE POSTGRADO
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR DE TESIS

Arequipa, 07 de Junio del 2023

Dictamen: 007755-C-EPG-2023

Visto el borrador del expediente 007755, presentado por:

2021002741 - TAPIA MELGAR EDUARDO SAUL

Titulado:

**ANÁLISIS DE LA MIGRACIÓN Y EXTENSIÓN DEL PERIODO DE CAMBIO DEL LUBRICANTE EN EL
TREN POSTERIOR DE CAMIONES MINEROS CAT 797F**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**29388008 - TICSE VILLANUEVA EDWING JESUS
DICTAMINADOR**



**29592341 - MESTAS RAMOS SERGIO ORLANDO
DICTAMINADOR**



**29440909 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS
DICTAMINADOR**



ANÁLISIS DE LA MIGRACIÓN Y EXTENSIÓN DEL PERIODO DE CAMBIO DEL LUBRICANTE EN EL TREN POSTERIOR DE CAMIONES MINEROS CAT 797F

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%

INDICE DE SIMILITUD

20%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

noria.mx

Fuente de Internet

5%

2

repository.usta.edu.co

Fuente de Internet

3%

3

qdoc.tips

Fuente de Internet

1%

4

repositorio.unac.edu.pe

Fuente de Internet

1%

5

tesis.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

1%

6

pdfcookie.com

Fuente de Internet

1%

7

digibuo.uniovi.es

Fuente de Internet

1%

8

1library.co

Fuente de Internet

1%

9	www.scribd.com Fuente de Internet	1 %
10	www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet	1 %
11	kupdf.net Fuente de Internet	1 %
12	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	1 %
13	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	1 %
14	cmc-latam.com Fuente de Internet	1 %
15	repositorio.uni.edu.pe Fuente de Internet	1 %

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Apagado

RESUMEN

El presente trabajo de investigación nace a partir de la necesidad de mejorar el periodo de cambio del lubricante en el tren posterior a los camiones mineros CAT 797F en una empresa minera del sur del Perú, aplicando el análisis de aceite para el seguimiento de la tendencia de comportamiento del lubricante mineral en comparación con el uso de un lubricante sintético. De acuerdo a la empresa minera, los cambios de aceite deberían realizarse cada 3000 horas, pero se demuestra mediante la migración hacia el uso del lubricante sintético, muestreo regular, análisis y control de la contaminación, que estos cambios se pueden realizar cada 5000 horas.

El presente estudio tiene como finalidad demostrar el impacto positivo del análisis de lubricantes en el diagnóstico del estado de los diversos sistemas que conforman el equipo analizado, de manera que se puedan aplicar planes de mantenimiento de acuerdo a los sistemas analizados.

El tipo de investigación es experimental, descriptivo, longitudinal, ya que nos enfocamos en realizar el diagnóstico de la condición vigente del tren posterior de los camiones mineros, identificando el comportamiento fisicoquímico, y el nivel de contaminación del lubricante; luego se estudia la evolución a través de muestras continuas, observando la tendencia, que nos dará una visión aproximada del desempeño del mismo.

Haciendo uso de las gráficas para el seguimiento de los parámetros principales del lubricante, se pudo observar la tendencia de las partículas contaminantes y el desgaste incurrido en el componente.

Se concluyó que, a través del análisis de aceite y control de la contaminación, que la extensión del periodo de cambio de lubricante en el tren posterior en camiones mineros, se puede conseguir con un aumento de la disponibilidad, menores reparaciones y requerimientos de componentes nuevos, con una generación potencial de ahorros en una flota de 25 camiones de \$ 33.679.150,00 en 9 años.

Palabras clave: Extensión, monitoreo, mantenimiento, análisis, lubricante, camiones, control.

ABSTRACT

This research work arises from the need to improve the lubricant change period in the rear train of CAT 797F mining trucks in a mining company in southern Peru, applying oil analysis to monitor the trend of behavior of the mineral lubricant in comparison with the use of a synthetic lubricant. According to the mining company, oil changes should be carried out every 3,000 hours, but it is demonstrated by the migration towards the use of synthetic lubricant, regular sampling, analysis and contamination control, that these changes can be carried out every 5,000 hours.

The purpose of this study is to demonstrate the positive impact of lubricant analysis in the diagnosis of the state of the various systems that make up the equipment analyzed, so that maintenance plans can be applied according to the systems analyzed.

The type of research is experimental, descriptive, longitudinal, since we focus on making the diagnosis of the current condition of the rear end of mining trucks, identifying the physicochemical behavior, and the level of contamination of the lubricant; then the evolution is studied through continuous samples, observing the trend, which will give us an approximate vision of its performance.

Using the graphs to monitor the main parameters of the lubricant, it was possible to observe the trend of contaminating particles and the wear incurred in the component.

It was concluded that, through oil analysis and contamination control, the extension of the lubricant change period in the rear end of mining trucks can be achieved with an increase in availability, fewer repairs and new component requirements, with a potential generation of savings in a fleet of 25 trucks of \$33,679,150.00 in 9 years.

Keywords: Extension, monitoring, maintenance, analysis, lubricant, trucks, control.

ÍNDICE

RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problema de investigación.....	2
1.2. Descripción del problema.....	2
1.3. Justificación del problema	3
1.4. Hipótesis	4
1.5. Objetivos del estudio	4
1.6. Tipo de investigación	5
1.7. Variable	5
2 MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes de la Investigación	8
2.2. Tribología	10
2.3. Mantenimiento.....	12
2.4. Camión Minero CAT 797F	15
2.5. Sistema de lubricación del tren posterior	23
2.6. Lubricación.....	25
2.7. Análisis de lubricante usado	41
2.8. Lubricante usado.....	42
2.9. Muestras de lubricante usado	43
2.10. Control de la contaminación del sistema de lubricación	54
2.11. Filtración de lubricante.....	57
2.12. Tipos de filtros.....	60
3 METODOLOGÍA.....	62
3.1. Lugar de estudio	62
3.2. Proceso Productivo	62
3.3. Población y Muestra	63
3.4. Técnica e instrumento de recolección	64
3.5. Análisis y procesamiento de datos.....	65
3.6. Establecimiento de los límites aceptables	66
3.7. Indicadores de gestión	71
3.8. Estrategia actual.....	73

3.9. Especificaciones del lubricante recomendado por el OEM.....	77
3.10. Programa de muestras de aceite.....	82
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
4.1. Extensión del drenado de lubricante.....	89
4.2. Resultados del análisis de lubricante mineral en el camión CA36.....	90
4.3. Resultados del análisis de lubricante sintético en el camión CA36	92
4.4. Resultados del análisis de lubricante mineral en el camión CA37.....	94
4.5. Resultados del análisis de lubricante sintético en el camión CA37	96
4.6. Graficas de seguimiento e interpretación	98
4.7. Evaluación de la disponibilidad.....	112
4.8. Cálculos de ahorros netos debido a la migración y extensión de vida útil del lubricante	114
CONCLUSIONES.....	119
RECOMENDACIONES	121
BIBLIOGRAFIA.....	122
ANEXOS.....	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Operacionalización de Variables</i>	6
Tabla 2	<i>Matriz de Consistencia</i>	7
Tabla 3	<i>Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos</i>	64
Tabla 4	<i>Especificaciones de Lubricante Nuevo</i>	71
Tabla 5	<i>PCR de Componentes y Lubricantes</i>	73
Tabla 6	<i>Tipos de Mantenimiento</i>	74
Tabla 7	<i>Límites de Desgaste a 3000 Horas</i>	75
Tabla 8	<i>Disponibilidad Antes de la Migración</i>	77
Tabla 9	<i>Programa de Muestreo y Dializado</i>	82
Tabla 10	<i>Límites de Desgaste a 5000 Horas</i>	89
Tabla 11	<i>Resultados del Análisis - Salud del Lubricante Mineral</i>	90
Tabla 12	<i>Resultados del Análisis - Contaminación del Lubricante Mineral</i>	90
Tabla 13	<i>Resultados del Análisis - Desgaste del Lubricante Mineral</i>	91
Tabla 14	<i>Resultados del Análisis - Salud del Lubricante Sintético</i>	92
Tabla 15	<i>Resultados del Análisis - Contaminación del Lubricante Sintético</i>	92
Tabla 16	<i>Resultados del Análisis - Desgaste del Lubricante Sintético</i>	93
Tabla 17	<i>Resultados del Análisis - Salud del Lubricante Mineral</i>	94
Tabla 18	<i>Resultados del Análisis - Contaminación del Lubricante Mineral</i>	94
Tabla 19	<i>Resultados del Análisis - Desgaste del Lubricante Mineral</i>	95
Tabla 20	<i>Resultados del Análisis - Salud del Lubricante Sintético</i>	96
Tabla 21	<i>Resultados del Análisis - Contaminación del Lubricante Sintético</i>	96
Tabla 22	<i>Resultados del Análisis - Desgaste del Lubricante Sintético</i>	97
Tabla 23	<i>Costos de Lubricantes</i>	114
Tabla 24	<i>Costos de Reparaciones</i>	114
Tabla 25	<i>Costos de Componentes Nuevos</i>	115
Tabla 26	<i>Costos por Parada de Equipo</i>	115
Tabla 27	<i>Costos con Lubricante Mineral</i>	116
Tabla 28	<i>Costos con Lubricante Sintético</i>	117
Tabla 29	<i>Ahorros por un Camión Minero</i>	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Curva P-F</i>	14
Figura 2 <i>Especificaciones del Camión 797F</i>	15
Figura 3 <i>Tren de Fuerza</i>	16
Figura 4 <i>Diferencial</i>	17
Figura 5 <i>Corte del Mando Final</i>	18
Figura 6 <i>Componentes Internos del Diferencial</i>	19
Figura 7 <i>Rodamiento de Rodillo Cónico</i>	20
Figura 8 <i>Rodamiento de Rodillo Recto</i>	20
Figura 9 <i>Engranaje Recto</i>	21
Figura 10 <i>Corona Recta</i>	22
Figura 11 <i>Engranaje Planetario</i>	22
Figura 12 <i>Diferencial</i>	23
Figura 13 <i>Filtros del Sistema de Lubricación</i>	24
Figura 14 <i>Sistema de Lubricación del Tren Posterior</i>	24
Figura 15 <i>Lubricación Hidrodinámica</i>	26
Figura 16 <i>Lubricación Límite</i>	27
Figura 17 <i>Lubricación Hidrostática</i>	27
Figura 18 <i>Composición Molecular Aceite Mineral</i>	29
Figura 19 <i>Tamaño y Forma de Aceite Mineral vs. Aceite Sintético</i>	30
Figura 20 <i>Clasificación SAE</i>	33
Figura 21 <i>Clasificación ISO</i>	34
Figura 22 <i>Clasificación AGMA</i>	35
Figura 23 <i>Clasificación API Para Motores a Gasolina</i>	36
Figura 24 <i>Clasificación API para Motores Diesel</i>	37
Figura 25 <i>Muestreo en Zona Turbulenta</i>	44
Figura 26 <i>Muestreo en Línea de Retorno</i>	45
Figura 27 <i>Muestreo en Líneas Presurizadas</i>	46
Figura 28 <i>Muestreo por Vacío de Una Línea de Retorno</i>	48
Figura 29 <i>Línea de Presión o Alimentación</i>	48
Figura 30 <i>Muestreo Fuera de Línea</i>	49
Figura 31 <i>Toma de Muestra del Puerto de Drenado con Tubo Pitot</i>	50
Figura 32 <i>Muestreo Portátil Fuera de Línea</i>	51

Figura 33	<i>Muestreo por Manguera y Bomba de Vacío</i>	52
Figura 34	<i>Asignación del Código de Contaminación</i>	56
Figura 35	<i>Objetivos Generales de Limpieza y Condiciones de Operación</i>	57
Figura 36	<i>Efecto de la Tasa de Filtración (Tasa Beta) en la Limpieza del Fluido</i>	58
Figura 37	<i>Tasa Beta</i>	59
Figura 38	<i>Filtros de Cartucho Recambiable</i>	60
Figura 39	<i>Filtro Monoblock</i>	61
Figura 40	<i>Filtro Centrífugo</i>	61
Figura 41	<i>Pasos de Interpretación SACODE</i>	65
Figura 42	<i>Límites Superiores de Conteo de Partículas</i>	67
Figura 43	<i>Límites Superior e Inferior de Viscosidad</i>	67
Figura 44	<i>Límites de Desgaste CAT a 2000 Horas</i>	68
Figura 45	<i>Límites de Desgaste CAT a 4000 Horas</i>	69
Figura 46	<i>Límites Estadísticos</i>	70
Figura 47	<i>Tiempos de Mantenimiento</i>	72
Figura 48	<i>Horas de Componentes y Lubricante</i>	74
Figura 49	<i>Cambios de Lubricante Realizados por Encima del Límite</i>	76
Figura 50	<i>Especificaciones del Lubricante para Diferencial y Mandos Finales</i>	78
Figura 51	<i>Especificación Lubricante Mineral en Uso</i>	78
Figura 52	<i>Tipos de Deslizamiento en Dientes de Engranaje</i>	80
Figura 53	<i>Movimientos en el Engrane</i>	81
Figura 54	<i>Especificación de Lubricante Sintético Propuesto</i>	82
Figura 55	<i>Diagrama de Responsabilidades</i>	83
Figura 56	<i>Kit de Muestreo del Lubricante</i>	84
Figura 57	<i>Punto de Muestreo del Diferencial</i>	85
Figura 58	<i>Punto de Conexión de Mangueras</i>	86
Figura 59	<i>Punto de Conexión de Manguera</i>	87
Figura 60	<i>Flujo del Lubricante con el Dializador</i>	87
Figura 61	<i>Mirilla de Nivel</i>	88
Figura 62	<i>Comportamiento de la Viscosidad - CA36</i>	98
Figura 63	<i>Comportamiento de la Viscosidad - CA37</i>	99
Figura 64	<i>Comportamiento de la Oxidación - CA36</i>	100
Figura 65	<i>Comportamiento de la Oxidación - CA37</i>	100
Figura 66	<i>Comportamiento del Boro - CA36</i>	101

Figura 67 <i>Comportamiento del Boro - CA37</i>	102
Figura 68 <i>Comportamiento del Silicio - CA36</i>	102
Figura 69 <i>Comportamiento del Silicio - CA37</i>	103
Figura 70 <i>Comportamiento del Código ISO 4406 - CA36</i>	104
Figura 71 <i>Comportamiento del Código ISO 4406 - CA37</i>	104
Figura 72 <i>Comportamiento del Hierro - CA36</i>	105
Figura 73 <i>Comportamiento del Hierro - CA37</i>	106
Figura 74 <i>Comportamiento de la Tasa de Desgaste del Hierro - CA36</i>	107
Figura 75 <i>Comportamiento de la Tasa de Desgaste del Hierro - CA37</i>	108
Figura 76 <i>Comportamiento del Cobre - CA36</i>	108
Figura 77 <i>Comportamiento del Cobre - CA37</i>	109
Figura 78 <i>Comportamiento de la Tasa de Desgaste del Cobre - CA36</i>	110
Figura 79 <i>Comportamiento de la Tasa de Desgaste del Cobre - CA37</i>	110
Figura 80 <i>Comportamiento del Índice PQ - CA36</i>	111
Figura 81 <i>Comportamiento del Índice PQ - CA37</i>	111
Figura 82 <i>Disponibilidad - CA36</i>	112
Figura 83 <i>Disponibilidad - CA37</i>	113

1 INTRODUCCIÓN

Dentro de los sectores, industrial, transporte y minería del Perú se viene desarrollando nuevas estrategias de mantenimiento después del conocido mantenimiento programado. Uno de los caminos para conseguir esta evolución es la implementación del mantenimiento predictivo, el cual nos brinda diversas herramientas como parte de su estrategia: análisis de aceite usado, termografía y análisis de vibraciones. Estas herramientas son complementarias y se utilizan para identificar potenciales fallas, siendo el análisis de aceite usado la técnica más usada y efectiva.

El uso de lubricantes en la industria está en constante crecimiento, y con el transcurrir de los años es necesario que estos productos se desempeñen de manera óptima de acuerdo a las exigencias técnicas que permitan extender la vida útil del mismo.

En la gran minería, la lubricación de los equipos es fundamental para las operaciones, el mantenimiento preventivo y predictivo son utilizados para evitar que los componentes sufran desgastes prematuros o daños por utilizar un lubricante contaminado o degradado; un aspecto importante del lubricante es su papel regulador de temperatura, aislante y protector de desgaste, por ello, el análisis y monitoreo proporciona una mejor confiabilidad acerca de la condición real del componente para anticipar fallas y paradas no planificadas.

Mediante la utilización de pruebas fisicoquímicas se puede verificar las propiedades del lubricante, y determinar cómo se van degradando, según el entorno en el que se le está haciendo uso. Actualmente, las pruebas que se han venido realizando para determinar la condición de los lubricantes se basan en el análisis de la Salud, Contaminación y Desgaste (SACODE), así como la determinación del índice de viscosidad.

Este estudio se sitúa en evaluar la salud del lubricante y el comportamiento de sus aditivos en el tren posterior de los camiones de acarreo de una mina del sur del país, dentro de un periodo de drenado de lubricante de 5000 horas, aplicando las técnicas de mantenimiento predictivo mencionadas, para la recolección de datos, considerando un solo intervalo de mantenimiento.

Con la ayuda del monitoreo del sistema de lubricación, nos apoyamos para extender el tiempo de vida útil del lubricante, el cual representa un importante ahorro en la inversión

y un costo fijo del mantenimiento, más aún cuando los intervalos de drenado del lubricante se incrementan.

1.1. Problema de investigación

Aprovechar el máximo rendimiento del lubricante del tren posterior con menores paradas por mantenimiento de los camiones mineros CAT 797F.

a Enunciado del problema

Ejecutar una extensión de periodo de cambio del lubricante utilizando mejores productos lubricantes, apoyándonos con el análisis del lubricante para monitorear su condición y reducir el tiempo de paradas, aumentando la disponibilidad y reduciendo los costos sin tener que poner en riesgo la seguridad y el medioambiente.

1.2. Descripción del problema

Los lubricantes en general generan un residuo después de terminar con su ciclo de protección y aislamiento al desgaste, que consiste en una mezcla de compuestos orgánicos derivados de la oxidación con los metales de desgaste que conformaban la maquinaria donde tenían contacto. Comúnmente la disposición de los lubricantes usados es quemándolo para aprovechar su potencial energético residual, agravando el problema de impacto ambiental, siendo más peligrosa la polución atmosférica que la provocada con derrames en el suelo y agua. Según Massa y Cusi (2019) en su artículo de revista nos comentan que el 40 % de la contaminación de los ríos y lagos procede del lubricante desechado de los vehículos.

En los últimos años, las exploraciones y operaciones mineras han generado mayor demanda de maquinaria para la movilización de los materiales explotados, generando mayores consumos de materias primas (lubricantes y filtros) y por ende un aumento de los residuos que al no ser tratados adecuadamente aceleran la degradación del ambiente.

En la actualidad la industria minera exige un tipo de mantenimiento que genere mejores beneficios para el desarrollo de sus operaciones debido a la coyuntura de costos de producción, medioambiente y fluctuación de precios de sus productos extraídos; el mantenimiento predictivo basado en condición representa un paso más en la evolución de las estrategias de mantenimiento, basa sus decisiones en el diagnóstico de los equipos y en actuar en ellos solo si hay síntomas de que hay una degradación en un elemento que requiere una acción: limpiar, filtrar, reacondicionar, sustituir. Consiste básicamente en extender el tiempo adecuado entre los cambios rutinarios basados en la vida útil estimada por los OEM

(Original Equipment Manufacturer), generando mayor valor a la gestión, aprovechando el máximo beneficio de la vida útil del lubricante, cuidando el consumo excesivo de los lubricantes, ya que este se extrae mediante un proceso químico del petróleo, enfocándonos en generar un menor impacto a la contaminación y deforestación de la naturaleza para la extracción de la materia prima.

En los espacios estrictamente deforestados, hay un efecto de borde que hace que la extensión alterada sea mucho mayor. Esto provoca serios impactos en los animales de la selva, sobre todo animales mayores y aves que huyen del lugar, afectando la alimentación y la salud de los indígenas que viven de la caza (Bravo, 2007, p. 2)

Con el uso del mantenimiento basado en la condición y el conocimiento de mejores productos lubricantes, capacitación de procedimientos y uso de las herramientas predictivas óptimas podemos mejorar el rango de periodos de cambio del lubricante.

1.3. Justificación del problema

Hoy en día la disponibilidad, son importantes para la productividad de la gran minería, por ello se propone extender la vida útil bajo un control de carácter fisicoquímico del lubricante y apoyar en el desarrollo rentable de la empresa.

a Aspecto general

Los ahorros económicos. procedentes del monitoreo de la condición son producto de la detección temprana de fallas y de una adecuada acción de mantenimiento.

b Aspecto tecnológico

La implementación de este estudio técnico nos brinda un incremento en la eficiencia y productividad de la empresa haciendo uso de la tecnología fisicoquímica del lubricante.

c Aspecto económico

Lo que se busca es extender la vida útil del lubricante para beneficio de la empresa, asimismo como proveedor de materias primas de exportación, brindando una garantía de su labor, buscando la complacencia y la confianza de la productividad de los camiones en mención evitando esfuerzos físicos y económicos en mayor cantidad horas invertidas para su mantenimiento.

d Aspectos de cuidado del medioambiente

El efecto ambiental de la generación de lubricante usado está fuertemente vinculado con dilema colectivo generado por el potencial impacto a la tierra producto de un derrame o manipulación del mismo.

1.4. Hipótesis

Dado que detener un equipo por mantenimiento genera menos disponibilidad de producción, es factible que implementando una migración y extensión del periodo de cambio de lubricante en el tren posterior de los camiones mineros CAT 797F permita una mayor disponibilidad del equipo.

1.5. Objetivos del estudio

El propósito de investigación de esta Tesis Magistral tiene como objetivos:

a Objetivo general

Analizar la migración e implementación de extensión del periodo de cambio de lubricante en el tren posterior en camiones mineros CAT 797F.

b Objetivos específicos

- Determinar y medir los resultados fisicoquímicos del análisis de los lubricantes para extender el periodo de cambio, manteniendo una condición de salud estable dentro de sus límites.
- Determinar y medir los resultados fisicoquímicos del análisis de los lubricantes para extender el periodo de cambio, manteniendo una condición de contaminación controlada por debajo de los límites.
- Determinar y medir los resultados fisicoquímicos del análisis de los lubricantes para extender el periodo de cambio, manteniendo una condición de desgaste menor a los límites en los componentes.
- Analizar la disponibilidad desempeñada antes y después de la migración e implementación de la extensión del periodo de cambio del lubricante para generar ahorros.

1.6. Tipo de investigación

El tipo de investigación es experimental, descriptivo, longitudinal porque nos enfocamos en realizar el diagnóstico de la condición vigente del tren posterior de los camiones mineros, identificando y determinando los parámetros de degradación, el comportamiento fisicoquímico, y el nivel de contaminación del lubricante; luego se estudia la evolución a través de muestras continuas del lubricante, observando los parámetros de degradación con resultados que nos dará una visión aproximada del desempeño del mismo.

La investigación en cuestión tendrá un enfoque cuantitativo, ya que nos apoyaremos en conocimientos sustentados y comprobados que pueden ser evaluados y replicados, con el propósito de incrementar el conocimiento teórico de este tema.

1.7. Variable

De acuerdo a Paredes Nuñez (2010) “Una variable que se clasifica como dependiente en un estudio pudiera considerarse independiente en otro... la designación de una variable como independiente o dependiente es función del papel que tiene la variable en una investigación en particular” (Separata 03).

a Variable dependiente

Es el interés de esta investigación predecir la siguiente variable:

- Disponibilidad del camión minero CAT 797F.

b Variable independiente

Designamos a las variables independientes en función los atributos del lubricante a partir de la migración e implementación de extensión del periodo de drenado en el compartimiento del tren posterior del camión minero CAT 797F.

- Estado fisicoquímico del lubricante.
- Dializado del lubricante.

c Operacionalización de variables

En siguiente Tabla 1 se muestra la operacionalización de las variables aplicada a esta investigación:

Tabla 1
Operacionalización de Variables

VARIABLES	TIPO	DEFINICIÓN	DIMENSIÓN	INDICADOR	HERRAMIENTAS
Estado fisicoquímico del lubricante	Independiente	Cada cierto período de tiempo de funcionamiento del camión, generalmente coincidiendo en el mantenimiento preventivo, se toma una muestra para posteriormente evaluarla con la finalidad de determinar el estado del lubricante.	Salud	Viscosidad (mm ² /s) Oxidación (abs/0.1mm) Aditivos (mg/Kg)	Análisis fisicoquímico del lubricante en un laboratorio especializado, límites permisibles.
			Contaminación	Silicio (mg/Kg)	
			Desgaste	Fierro (mg/Kg) Cobre (mg/Kg)	
Dializado del lubricante	Independiente	El periodo del dializado asegura que todo el lubricante se mantenga limpio filtrando las partículas que generan mayor desgaste de los componentes.	Antes del dializado	Partículas por millón,	Dializador con filtros de aceite.
			Después del dializado	Código de limpieza ISO 4406.	
Disponibilidad	Dependiente	Conjunto de horas de operación disponible con respecto al mantenimiento del camión minero.	Periodo Operativo Periodo Inoperativo	Horas de Operación del Camión. Horas de Inoperancia del Camión	Ecuación de Disponibilidad $D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$

Nota. Operacionalización de dos variables independientes y una dependiente aplicada a esta investigación.

d Matriz de consistencia

En la Tabla 2 se muestra la matriz de consistencia propuesta para el desarrollo de la investigación, son definidos el problema, objetivos, justificación, hipótesis y variables:

Tabla 2

Matriz de Consistencia

ANÁLISIS DE LA MIGRACIÓN Y EXTENSIÓN DEL PERIODO DE CAMBIO DEL LUBRICANTE EN EL TREN POSTERIOR DE CAMIONES MINEROS CAT 797F				
PROBLEMA	OBJETIVO	JUSTIFICACIÓN	HIPÓTESIS	VARIABLES
En la actualidad la industria minera exige un tipo de mantenimiento que genere mejores beneficios para el desarrollo de sus operaciones debido a la coyuntura de costos de producción y fluctuación de precios de sus productos extraídos; el mantenimiento predictivo basado en condición representa un paso más en la evolución de las estrategias de mantenimiento, basa sus decisiones en el diagnóstico de los equipos y en actuar en ellos solamente si hay síntomas de que hay una degradación en un elemento que requiere una acción: limpiar, filtrar, reacondicionar, sustituir. Consiste básicamente en renunciar a pensar en cambios rutinarios basados en la vida útil estimada por los OEM sin tener la seguridad de haber aprovechado el máximo el beneficio de la vida útil del lubricante.	Objetivo general Analizar la migración e implementación de extensión del periodo de cambio de lubricante en el tren posterior en camiones mineros CAT 797F. Objetivos específicos Analizar de qué manera podemos extender la vida útil del lubricante en camiones mineros con el análisis de aceite. Analizar y medir los factores internos que determinan la salud, contaminación y desgaste de los lubricantes. Analizar de qué manera podemos obtener mayor disponibilidad de los camiones mineros. Determinar el comportamiento físicoquímico del lubricante. Extender el periodo de cambio de lubricante manteniendo una viscosidad estable.	Hoy en día la disponibilidad, son importantes para la productividad de la gran minería, por ello se propone extender la vida útil bajo un control de carácter físicoquímico del lubricante y apoyar en el desarrollo rentable de la empresa.	Dado que detener un equipo por mantenimiento genera menos disponibilidad de producción, es factible que implementando una migración y extensión del periodo de cambio de lubricante en el tren posterior de los camiones mineros CAT 797F permita una mayor disponibilidad del equipo.	Variable dependiente Disponibilidad. Variable independiente Estado físicoquímico del lubricante. Dializado del lubricante.

Nota. Definiciones del problema, objetivos, justificación, hipótesis y variables.

2 MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

El incremento de la vida útil del lubricante ya ha sido material de investigación de algunos autores como Suárez (2006) en su informe de suficiencia “Extensión de intervalos de cambio de aceites lubricantes en equipos pesados de minería e incremento de la vida útil de componentes mayores mediante monitoreo de condiciones”; comenta que con este estudio se logró disminuir los residuos de aceites utilizados, disminuyendo los consumos de estos e incrementando la confiabilidad de la máquina, lo cual logra una disminución de los costos por parada de equipo, disposición de desechos y pago por lubricantes nuevos. El análisis de aceite nos permitió determinar la tasa de desgaste de los equipos por tipo, lo que nos permitió adaptar los programas de mantenimiento a las necesidades de cada grupo de equipos.

Siguiendo con las investigaciones realizadas tenemos a Taipe (2014) en su tesis “Incremento de período de cambio de aceite mediante análisis en el sistema de lubricación del motor de motoniveladora CAT-16H”; comenta que se realizó análisis por medio de muestras de lubricante en serie de equipos en funcionamiento antes del final de la vida útil de 250 horas recomendada por el fabricante del equipo. Los resultados obtenidos muestran el desgaste progresivo de las piezas de fricción y el cambio de viscosidad con el grado de contaminación del aceite durante el servicio. Esto demostró que el período inicial sugerido por el fabricante podría extenderse aún más.

Por otro lado, tenemos a Cervantes (2015) en su trabajo de grado “Caracterización de la degradación del aceite lubricante en automotores de ciclo de diésel” nos comenta que la caracterización fisicoquímica del aceite se realizó mediante pruebas estandarizadas de ASTM para determinar cómo cambian las propiedades del aceite en función del kilometraje de 0 km a 5600 km en intervalos de 1400 km. , mostró que las curvas de viscosidad y esfuerzo cortante se determinaron como una función del gradiente de velocidad. Por lo tanto, identificamos el modelo reológico correspondiente para cada muestra. Los resultados obtenidos muestran que la vida del aceite se puede alargar un 12% respecto a la muestra genuina en vehículos adaptados al ciclo diésel.

También tenemos a Guerrero (2016) en su tesis de maestría “Determinación de la degradación y contaminación del aceite de motores Otto en función del kilometraje recorrido” nos comenta que, para evaluar la contaminación y degradación del aceite de motor en función de la distancia recorrida, seleccionamos un grupo de vehículos de transporte 'taxi'

con características similares y luego realizamos un análisis de las propiedades del lubricante sobre una distancia de referencia de mil kilómetros. En base a los resultados se ha desarrollado un análisis de datos estadísticos, que permite determinar el kilometraje para el cual se recomienda mantener el aceite, en base a las propiedades aceptables de los parámetros del aceite.

Y por último tenemos artículos internacionales obtenidos del sitio web Science Direct como:

Wakiru et al. (2018) en su artículo “A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support” (Una revisión del análisis de la información de monitoreo de la condición del lubricante para apoyar la toma de decisiones de mantenimiento) nos comenta que el monitoreo de condición del lubricante no solo se utiliza como un sistema de alerta temprana sino también para el diagnóstico y pronóstico de las fallas, debido a la amplia información sobre la condición y estado que contiene un lubricante sobre el estado de la maquinaria y del mismo lubricante; donde nos recomienda como un soporte importante para la toma de decisiones, integrar gráficos de tendencias múltiples con una evaluación experta para determinar un análisis de tendencia confiable; reconociendo los patrones para el apoyo en las decisiones de mantenimiento, conjuntamente con el uso de enfoques integrados como el análisis de vibraciones, ultrasonido, termografía, proporcionarían un apoyo en una decisión sólida y confiable.

También Wolak y Zajac (2018) en su artículo “Changes in the operating characteristics of engine oils: A comparison of the results obtained with the use of two automatic devices” (Cambios en las características operativas de los aceites de motor: Una comparación de los resultados obtenidos con el uso de dos dispositivos automáticos) donde se centra en dos dispositivos de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y su papel en la evaluación de la calidad de los aceites lubricantes, donde se compara los resultados sobre la base de los cambios en las propiedades fisicoquímicas seleccionadas de los aceites de motor que se producen durante el funcionamiento, como el grado de oxidación, de nitración, contenido de carbono, TBN y el contenido porcentual de aditivos; sobre la base de gráficos concluye que los dispositivos entregan una tendencia similar y compatible entre ambos dispositivos para la búsqueda de extender la vida útil de máquina y reducir los costos de mantenimiento; el uso de los dispositivos mencionados son fáciles de usar brindando una información instantánea para predecir los cambios que ocurren en los aceites.

2.2. Tribología

a Definición

“El término tribología proviene del griego τριβω trībō, (frotar o rozar) y es utilizado por primera vez en 1966 por Peter Jost del Departamento Británico de Educación y Ciencia” (Chimeno, 2019, p. 2).

También puede definirse como:

La ciencia que involucra los conceptos de lubricación, fricción y desgaste observados en la interacción entre cuerpos en procesos dinámicos o estáticos, el cual es estudiado de acuerdo a las condiciones de operación. Este sistema está compuesto por mínimo dos cuerpos naturales o artificiales que se encuentran en contacto móvil, lo cual genera un fenómeno llamado fricción. Las variables que son tenidas en cuenta son: objeto base, cuerpo opuesto, carga, factores externos (temperatura, humedad, presión y humedad relativa), lubricante (Agua, aceite, grasa, partículas contaminantes, etc.), la carga y la dirección del movimiento. (Martínez, 2014, p. 24)

b Fricción

“La fricción es la fuerza opuesta al movimiento de un objeto al deslizarse sobre otro. Ésta se debe a las imperfecciones superficiales de los materiales... dando como consecuencia perdida de energía en forma de calor” (Chimeno, 2019, pp. 3-4).

Existen diferentes tipos de fricción como son: la fricción interna, fricción fluida y fricción sólida; las dos últimas como los más comunes. También se puede clasificar la fricción de acuerdo a la interacción de los cuerpos que están presentes en dicha fuerza, los cuales son:

- **Fricción Metal-Metal:** Este es el resultado de la falla de la capa límite o del agotamiento de los aditivos antidesgaste del lubricante. Este tipo de fricción es inevitable porque sus condiciones son impredecibles.
- **Fricción Pura:** Es la condición en la que el sistema de fricción está formado por dos cuerpos (el cuerpo primario y el cuerpo opuesto) en contacto entre sí sin partículas contaminantes. Se encuentran en coeficientes empíricos, y sus coeficientes de fricción están correlacionados de 0,8 a 10 y más.

- **Fricción Sólida:** Consiste en un sistema de tres elementos (el cuerpo principal, el cuerpo opuesto y el lubricante), en el que el lubricante se une en capas al cuerpo base (aditivo antidesgaste, una capa de óxido, suciedad, vapor, etc.) y se caracteriza por un coeficiente de fricción entre 0,2 y 0,8.
- **Fricción Fluida:** Se caracteriza por la sustitución de un lubricante sólido por uno líquido, manteniendo así el sistema tribológico de fricción.
- **Fricción Hidrodinámica:** Comprende las propiedades friccionales del fluido en unas determinadas condiciones de carga y velocidad, en las que la viscosidad característica del fluido juega un papel importante en el mantenimiento del control del coeficiente de fricción (valores de 0,001 a 0,002, valores dependiendo de la clase de lubricantes).
- **Fricción Hidrostática:** Mantiene las propiedades de fricción de los fluidos a altas cargas y bajas velocidades, ya que se debe mantener la capa lubricante por inyección antes y durante el movimiento.
- **Fricción Gaseosa:** Mantiene la estructura del sistema de rozamiento con la novedad de que el fluido lubricante está hecho de gas, y su rozamiento corresponde al funcionamiento del fluido (usualmente se usa aire), uno de los cuales es la fricción aerodinámica, donde el gas se forma con el movimiento del cuerpo primario y el cuerpo opuesto, el otro se llama fricción aerostática cuando la presión del gas fluye desde el exterior.
- **Fricción Mixta:** Este grado se utiliza en situaciones de alta carga y baja velocidad en diferentes puntos de fricción, por lo que se deben elegir lubricantes sólidos y líquidos. El coeficiente de fricción debe mantenerse entre 0,05 y 0,2, esto asegurará la calidad de las propiedades del material base y del cuerpo correspondiente.

c **Desgaste**

Una de las consecuencias dadas por el fenómeno de la fricción en un sistema tribológico es el desgaste, este fenómeno es caracterizado como la pérdida progresiva de material de la superficie del material ubicado en la superficie de la zona de contacto entre dos superficies (rugosidades) sometidas a cargas y a movimiento. (Martínez, 2014, p. 25)

El desgaste ocurre mecánica o químicamente y puede ser acelerado por el calor de la fricción. Los estudios creados para comprender este fenómeno permiten clasificar diferentes

tipos de desgaste según su mecanismo físico: abrasivos, adhesivo, fatiga, químico (corrosivo), erosión, y percusión o inducido por arcos eléctricos. Se estima que dos tercios de todos los casos de desgaste registrados en la industria se deben al desgaste adhesivo y abrasivo.

- **Desgaste Adhesivo:** Los materiales de dureza similar a menudo sufren desgaste adhesivo porque se deslizan con o sin lubricación. Este desgaste es mayor en aplicaciones de transmisión de potencia y debe minimizarse o evitarse en las condiciones en que ocurre. Cuando las superficies entran en contacto y comienzan a deslizarse, se crea un tipo de soldadura entre las superficies de la superficie, desgarrando y eliminando el material que da como resultado partículas abrasivas.
- **Desgaste Abrasivo:** Causada por partículas externas o grandes irregularidades en la superficie del material que se rompe o se cae. Cuando un material duro se desliza sobre una superficie más blanda, el material de esta última se dañará por deformación plástica y el material puede agrietarse o aflojarse.
- **Micropitting:** El micropitting o micropicadura es un fenómeno de picadura que se produce en la superficie y en las sub capas de distintos elementos rodantes, principalmente se observa en engranajes, donde tenemos rodadura y deslizamiento, pero también puede ocurrir en los rodamientos. Este tipo de desgaste provoca un cambio en el perfil original de diente y de esta manera la carga se concentra en un área menor que puede traer un incremento de vibraciones, ruido, desalineamiento, y una mayor posibilidad de falla por fatiga.
- **Corrosión:** La mayoría de los compartimentos de engranajes están protegidos de los elementos corrosivos del medio ambiente y están llenos de lubricantes anticorrosivos, por lo que es poco probable que el desgaste corrosivo provoque fallas en los engranajes. Sin embargo, si hay circunstancias en las que aparecen elementos corrosivos anormales, tales como manchas térmicas u oxidación, picaduras en la superficie y contaminación del lubricante. La corrosión forma depósitos planos en la superficie que parecen puntos de calor y no hay picaduras visibles.

2.3. Mantenimiento

“Los principales diccionarios definen mantener, como causa de continuidad o conservar en el estado actual. Esto sugiere que mantener significa preservar algo... asegurar

que los bienes físicos continúen cumpliendo las funciones que sus usuarios esperan” (Moubray, 1997, p. 11).

En cualquier industria, el mantenimiento siempre se trata de reducir los costos de producción, crear intervenciones oportunas y mantener la seguridad industrial para los miembros que trabajan directamente en el equipo.

De acuerdo con González (2005) el mantenimiento se puede llevar a cabo de dos maneras: mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo.

a Mantenimiento Correctivo

Es la intervención del equipo cuando es necesario para corregir fallas o defectos percibidos. Este tipo de intervención se divide en dos categorías:

- **Inmediato:** Esta categoría corresponde a un proceso que ocurre luego de que una falla de funcionamiento haya afectado al equipo y, por lo tanto, haya provocado la inoperatividad anticipada.
- **Retrasado o programable:** Tiene como objetivo detener el equipo después de que se observe una falla o mal funcionamiento para posteriormente intervenir y mejorar el rendimiento del dispositivo.

b Mantenimiento Preventivo

Esta categoría es parte de un conjunto de herramientas que permite la optimización de la capacidad de producción, calidad y eficiencia del equipo; y así evitar eventos imprevistos como paradas no planificadas y accidentes relacionados con la seguridad de los involucrados en el proceso. Las herramientas relacionadas con este objetivo son:

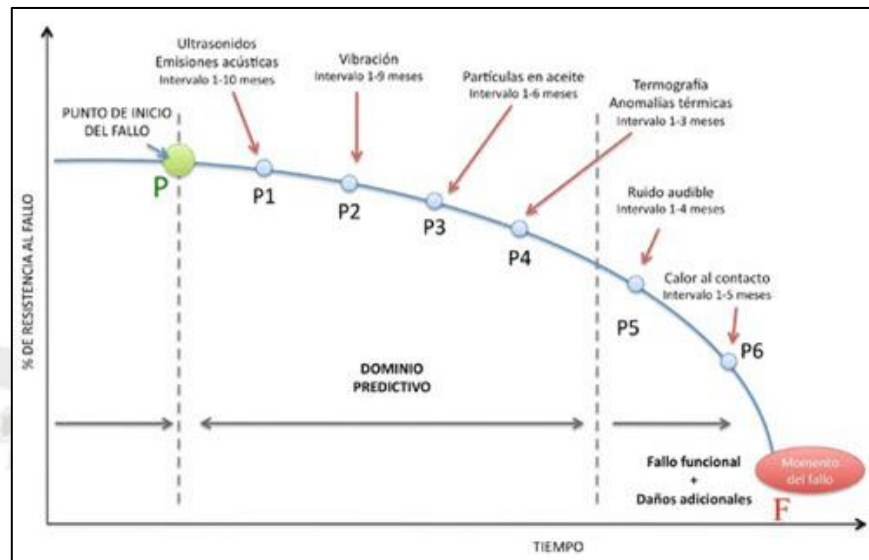
- **Cíclico:** Como su nombre lo indica, esta herramienta se basa en las horas o kilómetros activos del dispositivo, el cual contiene un plan de intervención donde se realizan una serie de pruebas e intervenciones en determinadas partes, según lo requiera el cambio para completar una vida útil.
- **Predictivo o basado en la condición:** Esta función se basa en el análisis al predecir aproximadamente dónde dejará de funcionar el equipo, donde se basa en las condiciones de funcionamiento, los cambios de fluidos, la corriente, etc.

Haciendo uso de la Figura 1 podemos observar gráficamente una curva de comportamiento de progreso de la resistencia al fallo de un equipo o componente desde que

se presenta la falla hasta su falla funcional, denominada curva P-F (Punto de inicio, Falla funcional).

Figura 1

Curva P-F



Nota. Señales que se presentan desde el punto P representando el inicio del fallo en la maquinaria antes de la falla funcional denominado punto F. Reproducida de El tratamiento del lubricante como método predictivo, La tribología y el análisis de los lubricantes industriales (parte 1), 2021, (<https://terotecnic.com/mantenimiento-predictivo/la-tribologia-y-el-analisis-de-los-lubricantes-industriales/>)

Hay una serie de técnicas que ayudan a detectar problemas que pueden detectarse mediante la observación de las condiciones en cuestión, como el seguimiento a través de:

- **Análisis de lubricante:** Este tipo de análisis se realiza a partir del estado fisicoquímico del aceite y se pueden obtener resultados del grado de salud, contaminación y desgaste, presentados en los componentes mecánicos.
- **Termografía:** Este tipo de análisis se realiza mediante equipos de alta tecnología que registran la intensidad de la radiación de calor en el dispositivo e indican el nivel de radiación emitido por el sistema mecánico para evitar el desgaste por fricción.
- **Análisis de vibraciones:** Este es el tipo de análisis más antiguo y popular en los procedimientos de mantenimiento, y estos métodos se llevan a cabo analizando el ruido o las vibraciones de un sistema mecánico, para verificar si hay fallas o mal funcionamiento del sistema. Aunque bien aceptado en las técnicas analíticas, se

requiere personal altamente capacitado para responder a diferentes tipos de ruido y vibración dependiendo del sistema en estudio.

- **Análisis de ultrasonido:** Esta técnica se utiliza para detectar anomalías utilizando un procedimiento similar al utilizado para la vibración, sin embargo, esta utiliza frecuencias superiores al límite de la técnica de vibraciones (20 kHz), esto se utiliza a menudo para probar fugas de fluidos o presiones por rotura o agrietamientos.

2.4. Camión Minero CAT 797F

El camión es un equipo ampliamente utilizado en la industria minera; las condiciones de transporte de estos equipos son duras, lo que genera desequilibrio, desgaste y deformación, entre otras condiciones, en los diversos sistemas y componentes que componen el camión volquete CAT 797F. El modelo 797F es el último modelo de la serie 797 que es fabricado y desarrollado por los ingenieros de Caterpillar, y actualmente se posiciona como el segundo camión volquete más grande del mundo, y está en el mercado desde 2009. Este gigante vehículo puede transportar 400 toneladas de carga útil.

Ya sea que acarree cobre, carbón, oro, mineral de hierro o escombros, el 797F proporciona el costo óptimo en su clase por unidad de producción. Incluidos los mejoramientos en seguridad, productividad, capacidad de servicio y comodidad, es líder de la industria en su clase. (Caterpillar Inc., 2012, p. 3)

El 797F se desarrolló y probó con varios camiones en minas de Canadá, Estados Unidos, Chile y ahora Perú. Está equipado con un motor C175 de 20 cilindros que cumple con los estándares de emisiones Tier 2 de la EPA para motores diésel en aplicaciones de movimiento de tierras, a continuación, algunas especificaciones en la Figura 2.

Figura 2

Especificaciones del Camión 797F

Motor		
Modelo del motor	Cat® C175-20	
Potencia bruta: SAE J1995	2.983 kW	4.000 hp
Potencia neta: SAE J1349	2.828 kW	3.793 hp
Pesos: aproximados		
Peso bruto de la máquina en orden de trabajo (GMW)	623.690 kg	1.375.000 lb
Especificaciones de operación		
Capacidad de carga útil nominal	363 tons métricas	400 tons EE.UU.

Nota. Especificaciones de las características principales del motor C175-20 en el camión minero CAT 797F. Reproducida de los servicios del distribuidor de los productos CAT, 2012, (Caterpillar Inc., 2012)

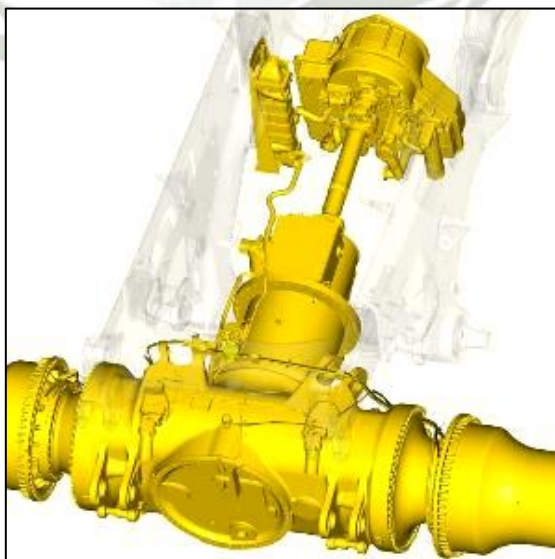
a Sistema de tracción

El tren de fuerza y la transmisión como se muestra en la Figura 3, proporcionan eficiencia y control de operación en pendientes pronunciadas, en condiciones deficientes del terreno; la transmisión planetaria de siete velocidades se acopla con el motor C175-20 para suministrar potencia constante en una amplia gama de velocidades de operación.

- **Convertidor de Par:** El primer componente del sistema de tracción es el convertidor de par. El convertidor proporciona un acoplamiento fluido que permite que el motor continúe funcionando cuando el camión está parado. En una transmisión de convertidor de par, el convertidor de par multiplica el par del motor a la transmisión. A altas velocidades de desplazamiento, se utiliza un embrague de bloqueo para proporcionar una transmisión directa.
- **Transmisión:** La potencia del convertidor de par pasa a través del eje a la transmisión. Eje de salida de la transmisión transmite la fuerza mediante engranes al diferencial. La potencia de la transmisión pasa a través del diferencial y se divide por igual entre las ruedas traseras. Se controla electrónicamente y la operación hidráulicamente. La transmisión es un diseño de engranaje planetario de cambio de potencia con siete embragues conectados hidráulicamente. La transmisión proporciona siete velocidades de avance y una de retroceso.

Figura 3

Tren de Fuerza

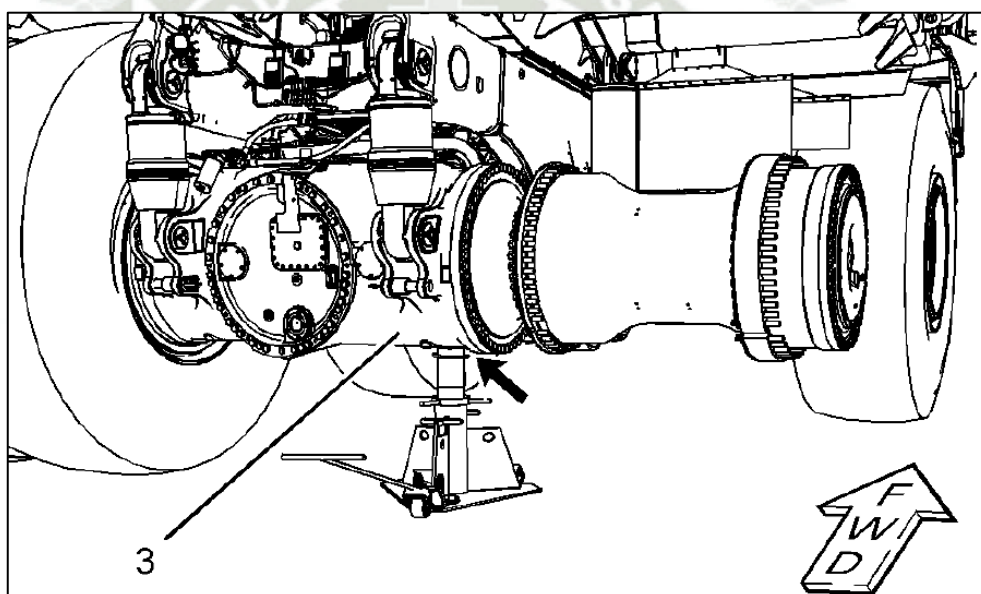


Nota. Diagrama del tren de fuerza en el camión minero CAT 797F. Reproducida de los servicios del distribuidor de los productos CAT, 2012, (Caterpillar Inc., 2012)

- **Diferencial:** El diferencial (3) está instalado en la parte posterior del vehículo como se muestra en la Figura 4. La potencia se transfiere directamente de la transmisión al diferencial. El diferencial distribuye la fuerza entre los ejes izquierdo y derecho. El par se transmite por igual desde el diferencial a través de ambos ejes hasta los mandos finales. El diferencial ajusta la velocidad de los ejes cuando el vehículo pasa por una curva, por lo que la fuerza transmitida a los ejes no se iguala en las curvas. El propósito del diferencial es dividir la potencia entre las dos ruedas motrices. El diferencial también cambia la dirección de la potencia en 90 grados, lo que permite que se transfiera a las ruedas motrices.

Figura 4

Diferencial



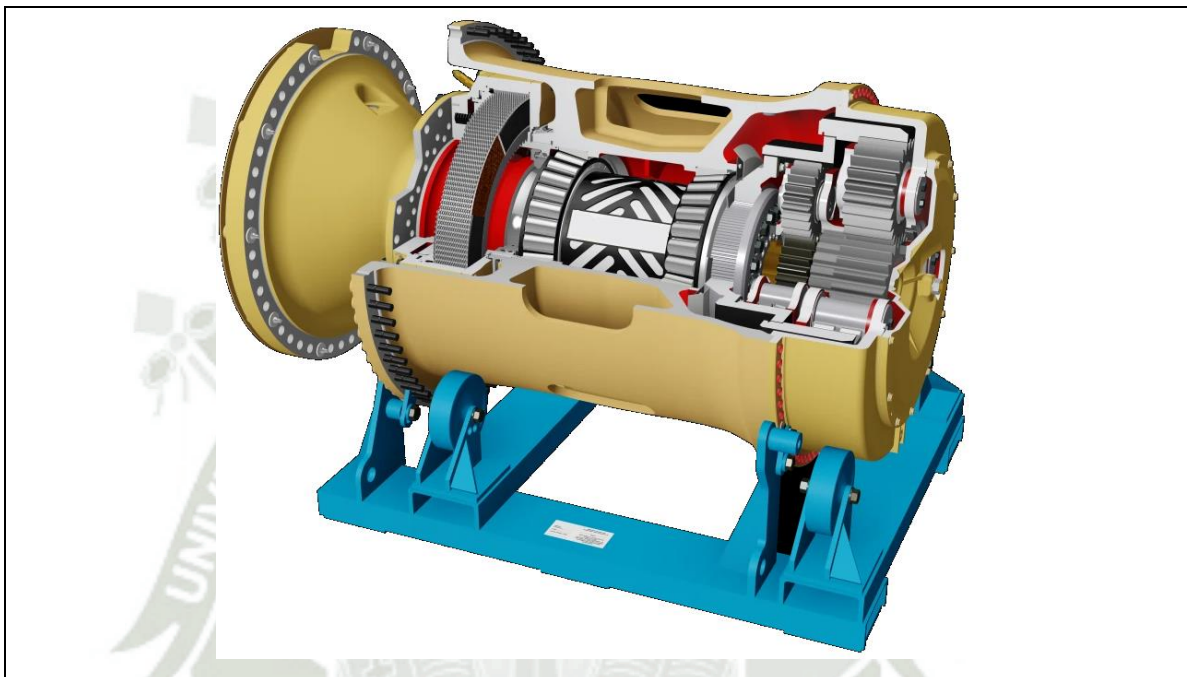
Nota. Diagrama de la vista posterior sobre la ubicación del diferencial (3) en el camión minero CAT 797F. Reproducida del manual de operación y mantenimiento del camión minero 797F, 2009, (Caterpillar Inc., 2009)

- **Mandos Finales:** El freno trasero está en la rueda trasera. El cubo del freno está conectado a la rueda trasera y gira con ella. La carcasa del freno está atornillada y sostenida en su lugar por la espiga del eje trasero. El mando final del camión es el componente final del tren motriz del camión. Su función principal es transferir la potencia generada por el motor a los neumáticos para aumentar la potencia y reducir la velocidad. Además, este componente cuenta con un sistema de frenos para servicio y estacionamiento.

El mando final consiste en un eje principal, o un eje llamado husillo por el fabricante Spindle; un paquete de frenos, doble reducción planetaria y rueda exterior o lo que el fabricante llama Wheel, como se muestra en la siguiente Figura 5.

Figura 5

Corte del Mando Final



Nota. Diagrama de la vista interior del mando final del camión minero CAT 797F. Reproducida del manual de operación y mantenimiento del camión minero 797F, 2009, (Caterpillar Inc., 2009)

La potencia se transmite mecánicamente desde el diferencial, a través del semieje, al engranaje solar en el engranaje solar de reducción. El mando final es una disposición planetaria de transmisión, por lo que la primera y la segunda corona dentada giran y se sujetan al extremo del eje mediante una maza de reacción para que no puedan girar.

La entrada de potencia al primer engranaje solar de reducción desde el semieje hace que el primer engranaje porta planetario gire al igual que los engranajes planetarios de reducción, obteniendo la salida de potencia a baja velocidad y alto torque a través del primer porta planetario de reducción. El primer porta planetario de reducción está conectado directamente por estrías con el segundo engranaje solar reductor, por lo que la potencia de salida del primer engranaje planetario de reducción es la entrada al segundo engranaje solar de reducción. La energía de entrada del segundo engranaje solar hace que el segundo porta planetario gire y el engranaje planetario de reducción.

La potencia obtenida del porta planetario es a velocidad reducida y un torque aumentado, el cual se transmite por un adaptador del mando final a la rueda, haciendo que gire la misma.

Debido a la relación de engranajes del mando final, la rueda transmite el par a los rines en una relación de 16,667 veces mayor que la entrada del semieje al mando final y la velocidad de la rueda se reduce en forma proporcional. (Caterpillar Inc., 2000, p. 60)

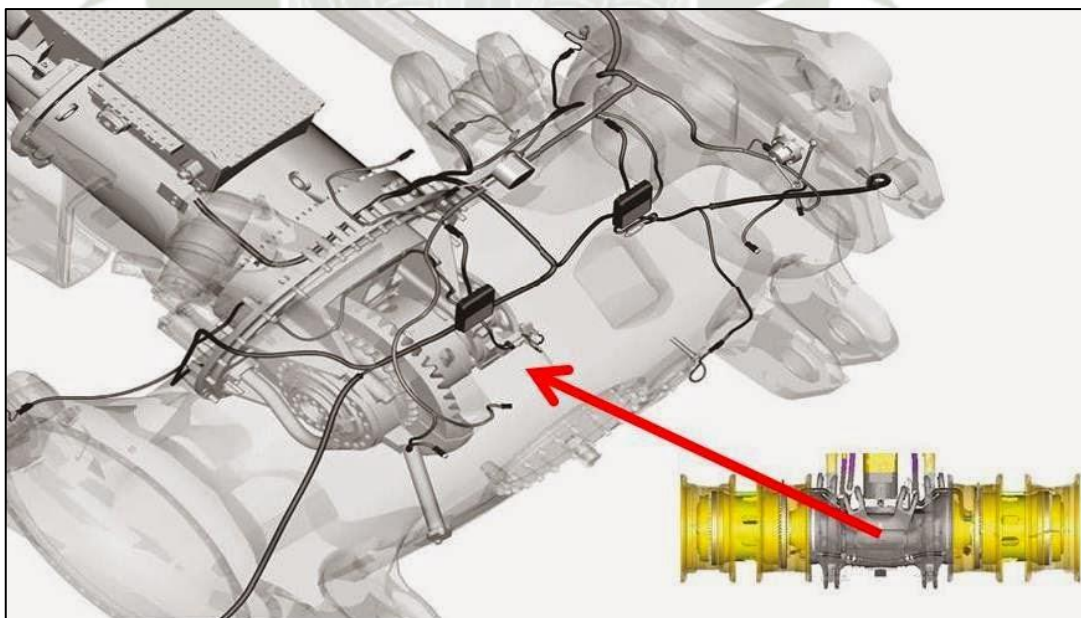
b Componentes internos del Diferencial y Mando Final

Con el fin de incrementar la vida útil del lubricante en el tren posterior (diferencial y mandos finales), es necesario entender cómo trabajan y conocer la causa de su desgaste. En la Figura 6 observamos el diferencial y los mandos finales que consisten en dos componentes básicos sometidos a desgaste:

- Rodamientos
- Engranajes

Figura 6

Componentes Internos del Diferencial



Nota. Diagrama de la vista interior del diferencial en el camión minero CAT 797F. Reproducida del manual de operación y mantenimiento del camión minero 797F, 2009, (Caterpillar Inc., 2009)

- **Rodamientos:** Los rodamientos del diferencial y mandos finales realizan tres funciones básicas:

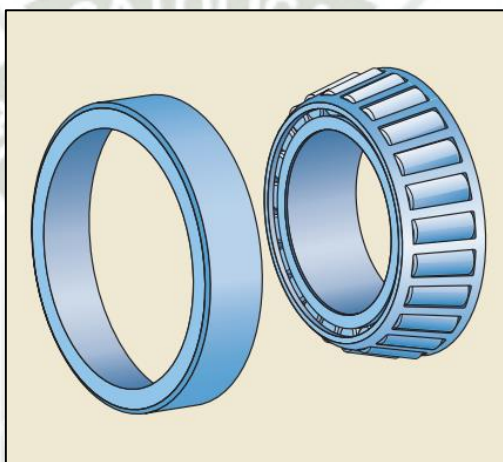
- Mantienen la posición y el alineamiento de engranajes y ejes
- Distribuyen las cargas de empuje de los engranajes y ejes
- Soportan el peso del vehículo y su carga

Se utilizan dos tipos de rodamientos usados en mandos finales y diferenciales:

- **Rodamientos de rodillos cónicos:** Por lo general, se usan para montar el piñón del diferencial y el soporte de la corona, pero también se usan en las ruedas motrices para soportar el peso del vehículo.

Figura 7

Rodamiento de Rodillo Cónico

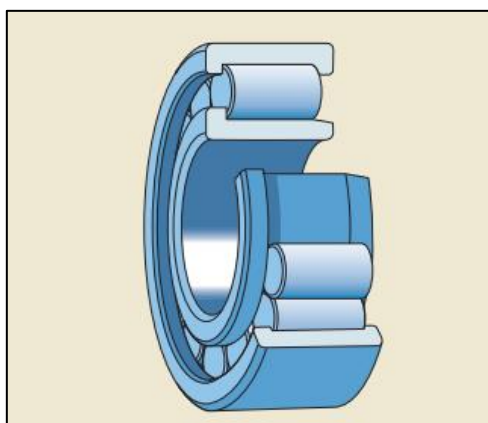


Nota. Diagrama de rodamiento. Reproducida de los rodamientos SKF México, (<https://www.skf.com/mx/products/rolling-bearings>)

- **Rodamientos de rodillos rectos:** Comúnmente utilizados para sostener los engranajes planetarios de la segunda reducción.

Figura 8

Rodamiento de Rodillo Recto



Nota. Diagrama de rodamiento. Reproducida de los rodamientos SKF México, (<https://www.skf.com/mx/products/rolling-bearings>)

- **Engranajes:** Los engranajes realizan cinco funciones básicas:
 - Transmiten fuerza.
 - Cambian la dirección o el ángulo de movimiento.
 - Cambian la velocidad rotacional.
 - Cambian el nivel de torsión.
 - Transfieren fuerza a una línea de centro de eje diferente.

Los diseños de engranajes comprenden: rectos, coronas, helicoidales y sinfín.

- **Engranajes rectos:** Tiene dientes rectos que están espaciados uniformemente y corren paralelos al agujero o al eje. Los dientes contactan entre sí linealmente paralelos al eje. Los dientes pueden estar dentro o fuera del engranaje. Teóricamente, si los engranajes engranados están correctamente alineados, no debería haber empuje axial.

Figura 9

Engranaje Recto



Nota. Imagen de engranajes. Reproducida del catálogo de productos Direct Industry, (<https://pdf.directindustry.es/pdf/wmh-srl-99689.html>)

- **Coronas rectas:** Tiene dientes afilados, uniformemente espaciados. El extremo grueso y ancho del diente se llama talón y el extremo más pequeño se llama punta.

Figura 10

Corona Recta



Nota. Imagen de engranajes. Reproducida del catálogo de productos Direct Industry, (<https://pdf.directindustry.es/pdf/wmh-srl-99689.html>)

Las coronas rectas se utilizan a menudo entre ejes a 90 grados. Generalmente, la carga máxima está en un diente a la vez.

Los dientes del engranaje también pueden sobresalir en el engranaje, lo que permite reducir la velocidad, aumentar el par y reducir el espacio entre dientes. El engranaje central que se muestra en la Figura 11 también se denomina engranaje solar, y los engranajes más pequeños que giran alrededor del engranaje central se denominan engranajes planetarios. El engranaje exterior con dientes interiores se llama corona.

Figura 11

Engranaje Planetario



Nota. Imagen de engranajes. Reproducida del catálogo de productos Direct Industry, (<https://pdf.directindustry.es/pdf/wmh-srl-99689.html>)

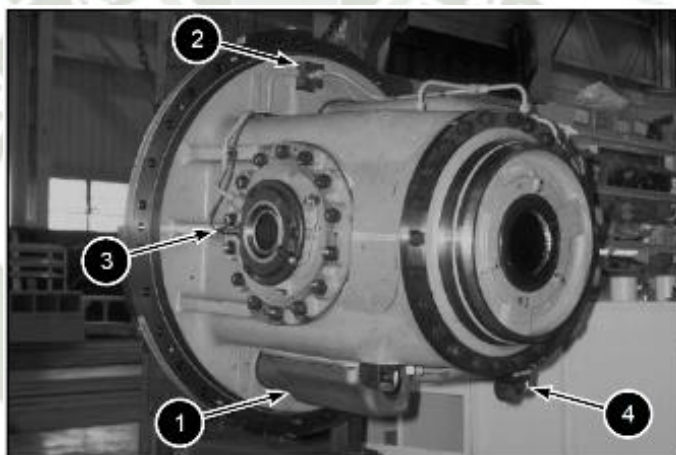
2.5. Sistema de lubricación del tren posterior

Mientras que los componentes de la transmisión final tradicionalmente se lubrican por aspersión, una bomba del eje trasero hace circular el aceite hacia los cojinetes de las ruedas y la transmisión final como se muestra en la Figura 12.

El aceite sale del diferencial a través de un colador ubicado en el cárter de aceite (1) debajo del diferencial. El aceite refrigerante y lubricante fluye desde la bomba a través de válvulas de alivio (100 psi), colectores (2) y algunos tubos de acero hasta los cojinetes del diferencial. El sensor de velocidad del eje del sistema de control de tracción (TCS) (3) está ubicado en el diferencial.

Figura 12

Diferencial

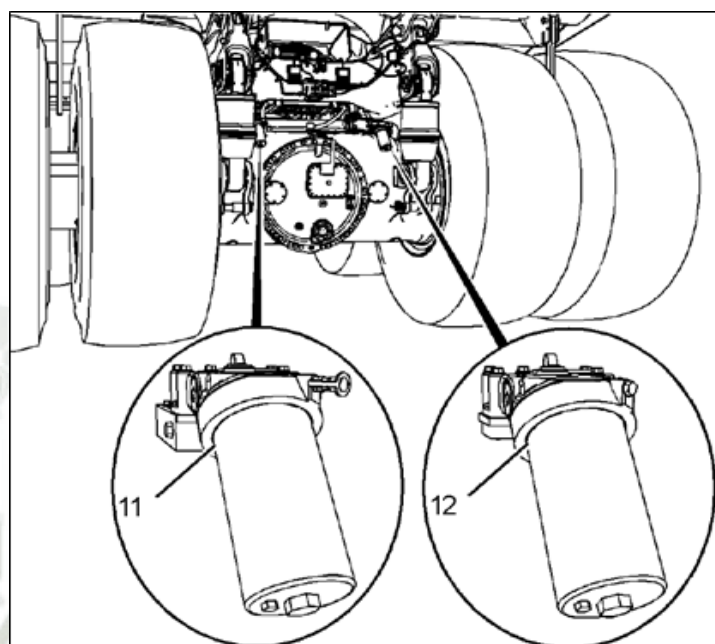


Nota. Imagen del componente diferencial en camión minero CAT 797F, colector de aceite (1), múltiple de la válvula de alivio y distribución (2), sensores de velocidad (3), rodillos de remoción e instalación (4). Reproducida de la guía de capacitación de servicio, 2000, (Caterpillar Inc., 2000)

El filtro de aceite del mando final (11) está ubicado en el costado izquierdo de la carcasa del eje trasero, el filtro del aceite del diferencial (12) está ubicado en el costado derecho de la carcasa del eje trasero como se muestra en la Figura 13.

Figura 13

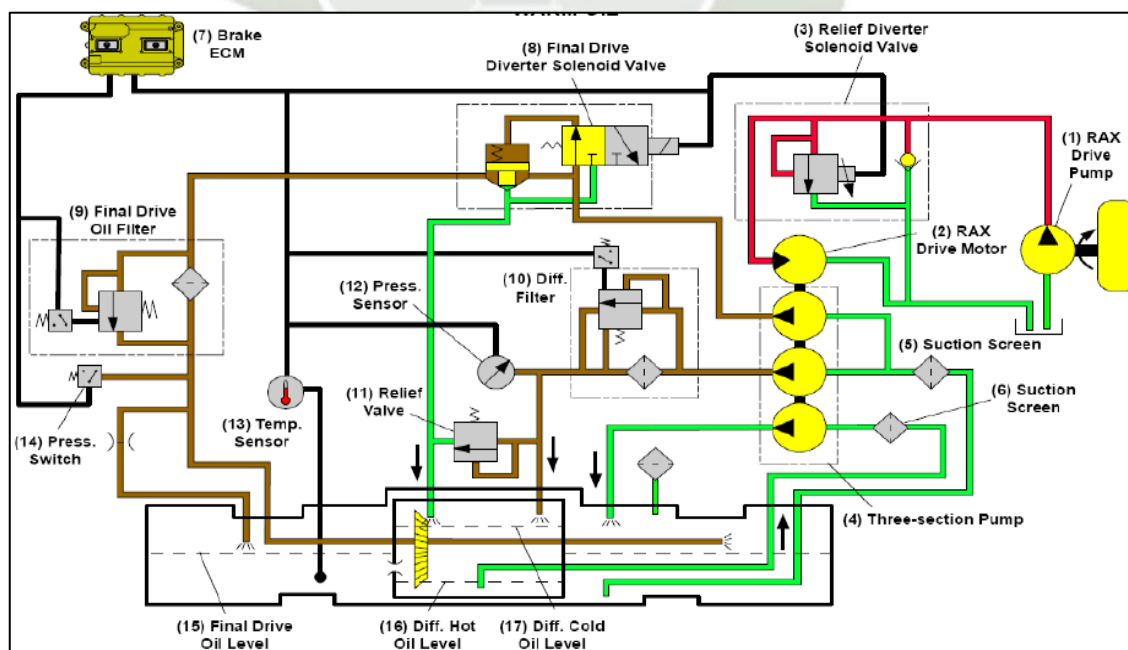
Filtros del Sistema de Lubricación



Nota. Diagrama de la vista posterior sobre la ubicación de los filtros de aceite del diferencial (11) y mandos finales (12) en el camión minero CAT 797F. Reproducida del manual de operación y mantenimiento del camión minero 797F, 2009, (Caterpillar Inc., 2009)

Figura 14

Sistema de Lubricación del Tren Posterior



Nota. Diagrama de circuito del sistema de lubricación del tren posterior en camión minero CAT 797F. Reproducida del manual de instrucción de servicio, 2007, (Finning Capacitación Ltda - material del estudiante, 2021)

De acuerdo a Finning Capacitación Ltda - material del estudiante (2021) la Figura 14 nos muestra el sistema de lubricación del tren posterior:

El sistema permite tener flujo mientras el motor de mando está funcionando, incluso si el camión no está en movimiento.

La bomba de mando para lubricación del eje trasero (1) provee de flujo de aceite al motor de mando de bombas de lubricación del eje trasero (2) una válvula solenoide de alivio y derivación controla la presión en el circuito de mando de bomba de lubricación del eje trasero.

El motor de mando de las bombas de lubricación del eje trasero, provee movimiento a tres bombas (4) proporcionada lubricación al diferencial y a los mandos finales.

Las dos secciones delanteras de la bomba tiran aceite desde la carcasa del eje trasero sacando el aceite por la rejilla de succión (5), la parte trasera de la bomba extrae el aceite a través de la rejilla de succión (6).

La cantidad de aceite suministrado para lubricación hacia el diferencial y los mandos finales es controlada a través del ECM de frenos (7).

El ECM de frenos (7) controla la válvula solenoide de alivio y derivación (3), además de la válvula de derivación de los mandos finales (8). Los solenoides se energizarán para controlar el flujo de aceite dependiendo de la temperatura de aceite del eje trasero. (pp. 41-42)

2.6. Lubricación

Es un factor muy importante dentro del sistema tribológico determinado por las características de una sustancia con el objetivo de evitar el rozamiento entre dos cuerpos en su sistema que conforman un conjunto de mecanismos transmitiendo una fuerza; la finalidad es conseguir reducir la fricción y por consiguiente su desgaste, prolongando la vida útil del mecanismo.

“La lubricación es la reducción de la fricción o desgaste que se genera en las superficies de cuerpos en contacto, que pueden encontrarse en reposo o con movimiento relativo, por la aplicación de algún elemento que se denomina lubricante” (Tello y Espinoza, 2016, p. 21).

En este lubricante las fuerzas cohesivas internas determinan la viscosidad de este, un lubricante tiene una mayor viscosidad cuando las moléculas están más firmemente unidas entre sí; el efecto que se observa con moléculas de un lubricante sobre una superficie móvil como la de un rodamiento, la fuerza de cohesión en la superficie puede no ser suficiente para superar la fuerza de cohesión de las moléculas del lubricante, esto genera una lubricación inadecuada por exceso de viscosidad; por otro lado, tenemos el caso contrario con una viscosidad muy escasa carecería de cohesión suficiente entre sus moléculas y no podría formar una película de lubricación adecuada para mantener una separación entre las superficies metálicas.

El lubricante es una sustancia utilizada para controlar y reducir, la fricción y el desgaste de las superficies en contacto. Dependiendo de su naturaleza, también pueden utilizarse para eliminar los residuos del desgaste previniendo que entren en el sistema, la refrigeración del calor producido en las partes en movimiento, la protección de la maquinaria reduciendo las vibraciones, la fatiga superficial y, por último, el sellado de gases. (Chimeno, 2019, p. 14)

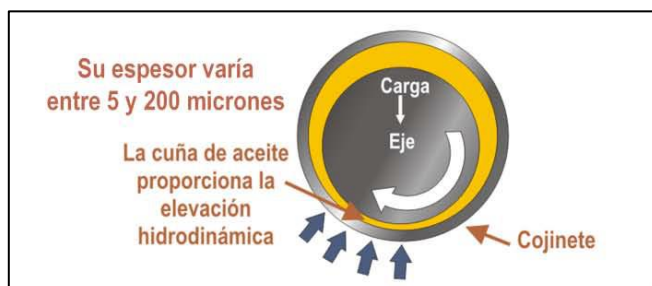
a Tipos de lubricación

De acuerdo a Cervantes (2015) en su trabajo de investigación, donde examina la degradación del lubricante, clasifica a los tipos de lubricación y lubricantes como:

- **Lubricación Hidrodinámica:** Las superficies están separadas por una película de lubricante que proporciona estabilidad. No se basa en introducir lubricante a presión, aun cuando puede hacerse, exige un caudal de aceite, la presión se genera por movimiento relativo. Se habla también de lubricación de película gruesa, fluida, completa o perfecta.

Figura 15

Lubricación Hidrodinámica

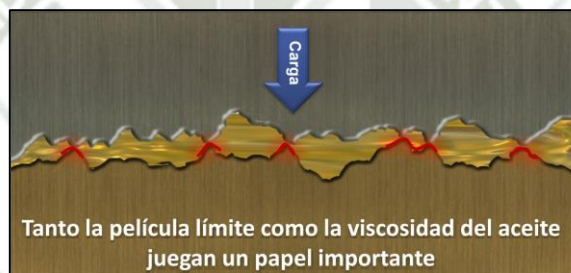


Nota. Diagrama de como el lubricante realiza su función de lubricación a través de una película hidrodinámica para evitar la fricción y desgaste entre eje y cojinete. Reproducida de Noria México, 2015, (Noria latín américa, 2015) (<https://noria.mx/lublearn/determinacion-del-flujo-de-aceite-requerido-por-los-cojinetes/>)

- **Lubricación Límite:** La película lubricante es tan delgada que existe un contacto parcial metal-metal. Una caída en la velocidad, un aumento en la carga o una disminución en el flujo de aceite pueden hacer que se pase de hidrodinámica a lubricación límite. La composición química es más importante que la viscosidad de la lubricación en este tipo de lubricación. Hay que tener en cuenta que en el arranque puede funcionar en condiciones de lubricación límite.

Figura 16

Lubricación Límite



Nota. Diagrama de película límite de lubricación donde se observa un contacto parcial entre metales por efecto de una carga. Reproducida de Noria México, 2015, (Noria latín américa, 2015) (<https://noria.mx/lublearn/determinacion-del-flujo-de-aceite-requerido-por-los-cojinetes/>)

- **Lubricación Hidrostática:** Se obtiene introduciendo a presión el lubricante en la zona de carga para crear una película de lubricante. No es necesario el movimiento relativo entre las superficies. Se emplea en cojinetes lentos con grandes cargas. Puede emplearse aire o agua como lubricante.

Figura 17

Lubricación Hidrostática



Nota. Diagrama de lubricación hidrostática donde se observa que el lubricante crea una película que evita el contacto entre metales por efecto de la viscosidad y presión. Reproducida de Noria México, 2015, (Noria latín américa, 2015) (<https://noria.mx/lublearn/determinacion-del-flujo-de-aceite-requerido-por-los-cojinetes/>)

b Tipos de lubricantes

- **Líquidos:** La base es de origen mineral o vegetal, se utilizan para la lubricación hidrodinámica. A los lubricantes líquidos se le puede destacar por algunas de sus características como pueden ser:
 - **Reducir el ruido:** La interacción mecánica al estar lubricada reduce la fricción causante del ruido anormal y gasto de energía.
 - **Refrigeración:** El lubricante ayuda a disipar el calor que se genera por la fricción, como también de cualquier agente que libere energía como la combustión; la remoción de calor es del 10 a 25 % en un componente mecánico.
 - **Eliminación de impurezas:** El lubricante recorre en la mayoría de las partes mecánicas internas de un equipo, debido a su constante circulación, el lubricante puede recolectar y transportar elementos que son parte de la máquina hasta un filtro del sistema de lubricación, limpiando el fluido para su recirculación. El desgaste se puede generar por funcionamiento normal, o por contaminantes que generan el desgaste.
 - **Anticorrosivo y antidesgaste:** Haciendo uso de los aditivos se puede reducir las consecuencias del envejecimiento normal del lubricante como también el desgaste químico por contaminaciones externas al equipo.
 - **Sellante:** En la combustión interna de un motor se desempeña como un sello entre los anillos y las camisas, llenando las superficies irregulares de algunos componentes como las válvulas, pistones, etc.
 - **Semisólidos:** Comúnmente llamadas “Grasas”, con una composición que puede ser vegetal o mineral, a estos también se le pueden agregar aditivos sólidos para mejorar el desempeño a la extrema presión que se le pueda someter al lubricante, tales como el Grafito, Molibdeno o Litio.
 - **Sólidos:** Dentro de esta categoría se encuentra también el Grafito, donde nos comenta Chimeno (2019) que:

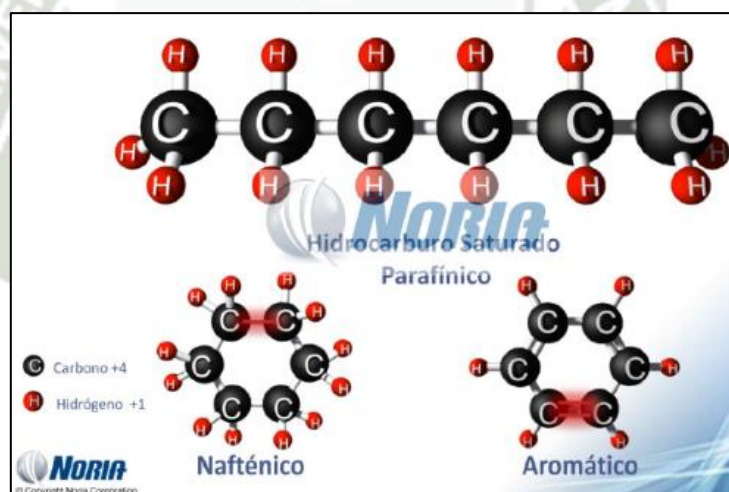
En los recubrimientos superficiales, los polímeros como el politetrafluoroetileno (PTFE), el polvo de MoS₂, los metales como Au, Pb, Zn o bronce. Estos materiales suelen ser utilizados en condiciones extremas como altas temperaturas, alta presiones o condiciones de alto vacío que no permitiría el uso de lubricantes líquidos o grasas. (p.15)

También se puede definir de acuerdo a su proceso de formulación, siguiendo la pauta de Tello y Espinoza (2016) donde mencionan:

- **Aceite Mineral:** Los aceites básicos de la refinación del petróleo crudo se utilizan para hacer aceites minerales. Según la función que realizan y los tipos de aplicaciones industriales, se pueden clasificar en tres tipos de aceites minerales: Aceites parafínicos, nafténicos y aromáticos.

Figura 18

Composición Molecular Aceite Mineral



Nota. Diagrama de la composición molecular del aceite mineral. Reproducida de manual de seminario análisis de lubricantes Noria, 2015, (Noria latín américa, 2015)

- **Aceite Sintético:** El término hidrocarburo sintetizado (SHC-Synthetic Hydrocarburates), se utiliza para representar una familia de aceites y grasas sintéticas, como aceites de circulación, aceites para engranajes, aceites hidráulicos, grasas y aceites para compresores.

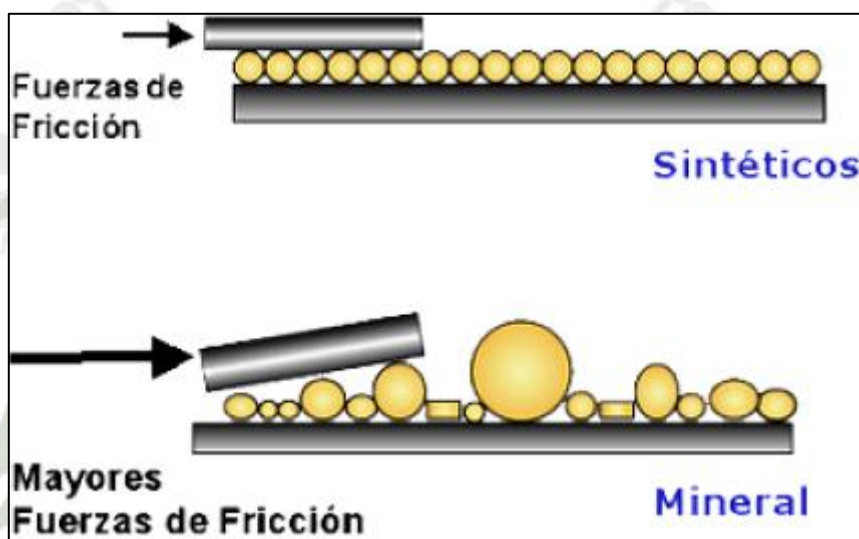
Estos lubricantes se utilizan en diversas aplicaciones industriales. Por definición, los lubricantes sintéticos son lubricantes diseñados y fabricados para servir mejor a un propósito previamente reservado para ellos.

El termino sintético se refieren a aceites base, principalmente polialfaolefinas (PAO). Además, existen otros tipos de aceites base como los poliglicoles, ésteres orgánicos, ésteres fosfatados y siliconas.

El mismo tamaño y forma que caracteriza a las moléculas del aceite sintético asegura un mayor coeficiente de tracción y menos fricción interna entre las moléculas bajo carga como se muestra en la siguiente Figura 19.

Figura 19

Tamaño y Forma de Aceite Mineral vs. Aceite Sintético



Nota. Diagrama referencial del tamaño y forma de las moléculas del aceite mineral y sintético. Reproducida de manual de seminario análisis de lubricantes Noria, 2015, (Noria latín américa, 2015)

Las propiedades únicas de los aceites sintéticos justifican el gasto adicional cuando los lubricantes a base de minerales no funcionan correctamente. El uso de aceites sintéticos está justificado desde el punto de vista económico de la aplicación.

Los aceites sintéticos generalmente duran de 5 a 10 veces más que los aceites minerales. Los aceites sintéticos cuestan alrededor de cinco veces más que los aceites minerales, por lo que el uso de aceites sintéticos a menudo no se justifica basándose únicamente en el precio y la longevidad del aceite. Asegúrese de considerar todos los factores de costo y los beneficios potenciales que ofrecen estos aceites al tomar su decisión tales como:

- Menor cantidad de repuestos usados.
- Menores costos de mano de obra.

- Menos aceite utilizado o requerido.
- Menores costos por falta de disponibilidad.
- Menores requerimientos de filtros.
- Eficiencia energética.
- Menores paradas de producción.
- Entre otras.

c **Propiedades de los lubricantes**

Se puede definir las propiedades siguiendo la pauta de Martínez (2014) donde menciona:

- **Densidad y gravedad:** La densidad y la gravedad específica se utilizan para relacionar el refinamiento de un petróleo crudo con su origen. No hay diferencia en densidad y gravedad específica para lograr un propósito específico, determinado solo por el uso en diferentes ubicaciones geográficas.
- **Punto de fluidez:** Se refiere a la temperatura más baja a la que fluirá un líquido cuando se enfríe. A medida que se enfría, se vuelve menos denso y menos móvil.
- **Punto de inflamación:** Esta es la temperatura más baja a la que el lubricante emitirá vapores que pueden encenderse inmediatamente cuando se acercan a una llama.
- **Viscosidad:** Esto se llama la capacidad de un líquido para fluir a una temperatura dada. Para los lubricantes, esta es una de las propiedades más destacadas, ya que es importante encontrar el nivel óptimo para mantenerlos en constante contacto con las partes mecánicas. Las unidades de medida consisten en Saybolt (SUS), centistokes (cSt, viscosidad cinemática) y Poise (cP, viscosidad dinámica, utilizada para el diseño de rodamientos).

$$\text{Viscosidad Cinemática} = \frac{\text{Viscosidad Dinámica}}{\text{Densidad}} \quad (1)$$

- **Bombeabilidad:** La capacidad de bombear lubricantes a diferentes temperaturas, especialmente bombear a bajas temperaturas depende de la viscosidad.
- **Lubricidad y adhesión:** La lubricidad es la capacidad de un lubricante para formar una película de espesor uniforme sobre la superficie, la cual depende de la viscosidad para tener una adhesión en los metales y proteger de la fricción que se pueda generar.

- **Rigidez dieléctrica:** Esta es la capacidad aislante del aceite y también determina la presencia de contaminantes (barro, suciedad, agua, polvo, etc.); estas sustancias permiten el paso de la electricidad a través del aceite. Esta característica cambia con la temperatura del aceite, cuanto mayor sea la temperatura del aceite, mayor será la rigidez dieléctrica.
- **Emulsibilidad y demulsibilidad:** Emulsibilidad significa que el lubricante forma una emulsión (agua y aceite). El agua es el principal contaminante de un lubricante, ya que esta sustancia disuelve los aditivos y les permite perder sus propiedades en un ambiente estable. Por lo tanto, si existe una contaminación evidente con agua, es deseable que sea inmiscible con el lubricante, que se separe el agua, esto se denomina demulsibilidad del aceite (evitar la emulsión). De esta forma, el aceite protege las partes mecánicas de la corrosión, la oxidación y el desgaste.
- **Punto de enturbiamiento:** Se define como la temperatura requerida para que las parafinas y otras sustancias en el aceite se separen y formen cristales que producen una apariencia turbia. Esta característica viene dada por el tiempo de inactividad de la máquina. Esto se debe a que no solo pueden ocurrir estas características cuando se detiene la máquina, sino que las impurezas pueden contribuir a este fenómeno y causar problemas con los filtros, obstrucciones de líneas finas y capacidad de bombeo del aceite.

d Clasificación de los lubricantes

Los lubricantes se clasifican según especificaciones o estándares que están regulados por organizaciones internacionales preocupadas por la mejora continua del medioambiente, de los productos, para los clientes o usuarios finales, en particular SAE, ISO, AGMA y API donde se han preocupado de normalizar las denominaciones y caracterización de propiedades de los lubricantes. De acuerdo a Díaz J. J. (2006) en su documento de apoyo a la gestión de mantenimiento clasifica a los lubricantes según cada organización:

- **Clasificación SAE:** Las unidades SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices) se distinguen por el hecho de que cada número contiene muchos aceites dentro de un amplio rango de viscosidad. Los aceites para automóviles se clasifican por un número al final del nombre del aceite, con el único significado de que cuanto mayor sea el número, más viscoso será el aceite. En esta categoría se incluyen los aceites para la

lubricación de motores de combustión interna, tanto diésel como de gasolina, cajas de cambios, reductores y sistemas hidráulicos descritos en la Figura 20.

Los aceites para motores de combustión interna se clasifican como aceites monogrados y multigrado y uno u otro se utiliza en el motor según las recomendaciones del fabricante del motor de combustión interna, las condiciones climáticas y los diversos programas de reducción del desgaste interno.

Los aceites monogrados especifican un solo grado de viscosidad, se caracterizan por un índice de viscosidad de menos de 95 y pueden ser un poco más difíciles de arrancar en frío a temperaturas ambiente bajas (menos de 5 °C). En este caso el aceite monogrados debe estar marcado con la letra W (invierno en inglés).

Los aceites multigrado, por su parte, se caracterizan por tener un índice de viscosidad superior a 120 y se recomiendan para cubrir las diversas clases de viscosidad SAE. Entonces, por ejemplo, si tiene un aceite como SAE 20W40, significa que se comporta como un aceite SAE 20W de baja viscosidad a bajas temperaturas (por encima de -15 °C) y a altas temperaturas (por encima de 100 °C) como un aceite de alta viscosidad SAE40.

Figura 20

Clasificación SAE

Norma SAE J300 Abril 2004					
GRADO VISCOSIDAD SAE	VISCOSIDADES A BAJA TEMPERATURA		VISCOSIDADES A ALTAS TEMPERATURAS		
	Viscosidad de Arranque mPa.s (cP) ASTM D5293	Viscosidad de Bombeo mPa.s (cP) ASTM D4684	Viscosidad Cinemática a 100°C mm ² /s (cSt) ASTM D445		Viscosidad de Alto Corte a 150°C mPa.s (cP) ASTM D4683
	Máx	Máx	Min	Máx	Min
0W	6,200 a -35°C	60,000 a -40°C	3.8	---	---
5W	6,600 a -30°C	60,000 a -35°C	3.8	---	---
10W	7,000 a -25°C	60,000 a -30°C	4.1	---	---
15W	7,000 a -20°C	60,000 a -25°C	5.6	---	---
20W	9,500 a -15°C	60,000 a -20°C	5.6	---	---
25W	13,000 a -10°C	60,000 a -15°C	9.3	---	---
20	---	---	5.6	<9.3	2.6
30	---	---	9.3	<12.5	2.9
40	---	---	12.5	<16.3	2.9 (0W-40, 5W-40 y 10W-40)
40	---	---	12.5	<16.3	3.7 (15W-40, 20W-40, 25W-40 y 40)
50	---	---	16.3	<21.9	3.7
60	---	---	21.9	<26.1	3.7

Nota. Imagen de la clasificación de los lubricantes por su viscosidad de acuerdo a la norma SAE (Society of Automotive Engineers). Reproducida de manual de seminario análisis de lubricantes Noria, 2015, (Noria latín américa, 2015)

- **Clasificación ISO:** Las unidades ISO (Organización Internacional de Normalización) solo clasifican la viscosidad de los aceites industriales. La viscosidad se clasifica a 40 °C en cSt. Depende únicamente de la viscosidad del aceite industrial y no tiene nada que ver con su calidad. Descritos en la Figura 21 los grados ISO aparecen al final de los nombres de aceites industriales, independientemente de la marca.

Figura 21

Clasificación ISO

Tabla de viscosidad DIN 51519				
Viscosidad ISO	Viscosidad a 40 °C [mm ² /s]	Límites de viscosidad		
Nominal	Media	Mínima	Máxima	
ISO VG 2	2.2	1.98	2.42	
ISO VG 3	3.2	2.88	3.52	
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06	
ISO VG 7	6.8	6.12	7.48	
ISO VG 10	10	9.00	11	
ISO VG 15	15	13.50	16.5	
ISO VG 22	22	19.80	24.2	
ISO VG 32	32	28.80	35.2	
ISO VG 46	46	41.40	50.6	
ISO VG 68	68	61.20	74.8	
ISO VG 100	100	90.00	110	
ISO VG 150	150	135.00	165	
ISO VG 220	220	198.00	242	
ISO VG 320	320	288.00	352	
ISO VG 460	460	414.00	506	
ISO VG 680	680	612.00	748	
ISO VG 1000	1000	900.00	1100	
ISO VG 2200	2200	1,980.00	2420	
ISO VG 3200	3200	2,880.00	3520	

Nota. Imagen de la clasificación de los lubricantes por su viscosidad de acuerdo a la norma ISO (International Standard Organization) y la norma DIN 51519. Reproducida de manual de seminario análisis de lubricantes Noria, 2015, (Noria latín américa, 2015)

- **Clasificación AGMA:** Graduación de la viscosidad del aceite para engranajes, de acuerdo a la norma AGMA (American Gear Manufacturers Association), análogo a la clasificación ISO en la Figura 22.

Figura 22
Clasificación AGMA

Aceites de engranajes inhibidos contra la Herrumbre (R) y la Oxidación (O), R&O. N° AGMA	Rango de viscosidad en cSt a 40°C (1)	Grado ISO equivalente (1)	Aceites engranajes de extrema presión. N° AGMA (2)	Aceite sintético para engranajes. N° AGMA (3)
0	28.8 a 35.2	32		0S
1	41.4 a 50.6	46		1S
2	61.2 a 74.8	68	2 EP	2S
3	90 a 110	100	3EP	3S
4	135 a 165	150	4Ep	4S
5	198 a 242	220	5EP	5S
6	288 a 352	320	6EP	6S
7 y 7 Comp (4) (7)	414 a 506	460	7EP	7S
8 y 8 Comp (4) (7)	612 a 748	680	8EP	8S
8A Comp (4) (7)	900 a 1100	1000	8AEP	-
9	1350 a 1650	1500	9EP	9S
10	2880 a 3250		10EP	10S
11	4140 a 5060		11EP	11S
12	6120 a 7480		12EP	12S
13	190 a 220 cSt a 100°C (5)		13EP	13S

N° AGMA para lubricantes residuales (6)	Rango de viscosidad cSt a 100°C
14R	428.5 a 857.0
15R	857.0 a 1714 (5)

Notas:

- 1) De acuerdo a la norma ISO 3448 Clasificación de viscosidad para lubricantes industriales líquidos.
- 2) Los aceites de engranajes de Extrema presión solo deben ser empleado cuando lo especifique el fabricante del equipo.
- 3) los aceites sintéticos de engranajes 9S a 13S están disponibles pero no son de uso frecuente.
- 4) Los aceites con la sigla Comp. están reforzados con entre un 3 a 10% de aditivos grasos naturales o sintéticos.
- 5) Las viscosidades de los lubricantes AGMA 13 en adelante se miden en cSt a 100°C
- 6) Los lubricantes residuales - con solvente, son aceites pesados conteniendo un solvente volátil no inflamable para facilitar su aplicación. Al evaporarse el solvente deja una película gruesa sobre la superficie del diente. Las viscosidades informadas corresponden a la viscosidad del lubricante sin el solvente.
- 7) Los aceites Comp se emplean normalmente para la lubricación de engranajes del tipo sinfin corona.

Nota. Imagen de la clasificación de los lubricantes por su viscosidad de acuerdo a la norma AGMA (American Gear Manufacturers Association). Reproducida de manual de seminario análisis de lubricantes Noria, 2015, (Noria latín américa, 2015)

- **Clasificación API:** Para establecer un sistema de clasificación de calidad, API (American Petroleum Institute) ha desarrollado una nomenclatura según el tipo de motor para el que se pretende aplicar el lubricante. Así se introdujo la letra 'S' de Spark, que representa el principio de encendido por chispa utilizado en los motores de gasolina, seguida de las letras 'A' a 'L', que representan alfabéticamente el desarrollo de los motores de gasolina. Los niveles de clasificación se desarrollaron continuamente y los requisitos de calidad aumentaron a medida que avanzaban las letras del alfabeto. En la siguiente Figura 23, se puede apreciar la evolución de la clasificación API de los aceites para motores a gasolina.

Figura 23
Clasificación API Para Motores a Gasolina

ESTÁNDARES PARA ACEITES DE MOTORES A GASOLINA (siga las recomendaciones del fabricante sobre los niveles de desempeño del aceite)		
Categoría	Estado	Servicio
SP	Actual	Incorporado en mayo de 2020. Diseñado para proporcionar protección contra preencendido de baja velocidad (LSPI), protección contra desgaste de la cadena de tiempo, protección mejorada del depósito de alta temperatura para pistones y turbocompresores, y control más estricto del lodo de aceite y del barniz. API SP con conservación de recursos coincide con el GF-6A del ILSAC al combinar el desempeño del SP del API con la economía de combustible mejorada, la protección del sistema de control de emisiones y la protección de motores que operan con combustibles que contienen etanol hasta E85.
SN	Actual	Para motores de automóviles modelo 2020 y anteriores
SM	Actual	Para motores de automóviles modelo 2010 y anteriores
SL	Actual	Para motores de automóviles modelo 2004 y anteriores
SJ	Actual	Para motores de automóviles modelo 2001 y anteriores
SH	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con gasolina fabricados después de 1996. Es posible que no brinde la protección adecuada contra acumulación de lodo de aceite, oxidación o desgaste.
SG	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con gasolina fabricados después de 1993. Es posible que no brinde la protección adecuada contra acumulación de lodo de aceite, oxidación o desgaste.
SF	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con gasolina fabricados después de 1988. Es posible que no brinde la protección adecuada contra acumulación de lodo de aceite.
SE	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con gasolina fabricados después de 1979.
SD	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con gasolina fabricados después de 1971. El uso en motores más modernos puede causar un desempeño insatisfactorio o daños en el equipo.
SC	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con gasolina fabricados después de 1967. El uso en motores más modernos puede causar un desempeño insatisfactorio o daños en el equipo.
SB	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con gasolina fabricados después de 1951. El uso en motores más modernos puede causar un desempeño insatisfactorio o daños en el equipo.
SA	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no contiene aditivos. No es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con gasolina fabricados después de 1930. El uso en motores modernos puede causar un desempeño insatisfactorio o daños en el equipo.

Nota. Imagen de la clasificación de los lubricantes para motores a gasolina de acuerdo a la norma API (American Petroleum Institute). Reproducida de manual de seminario análisis de lubricantes Noria, 2015, (Noria latín américa, 2015)

La nomenclatura de aceites para motores diesel utiliza la letra "C" para "compresión" en inglés y letras seriales en el alfabeto para representar la evolución de la calidad, ya que estamos hablando de aceites para motores cuyo principio de encendido es la compresión. Esta evolución se expone en la siguiente Figura 24:

Figura 24
Clasificación API para Motores Diesel

LOS MOTORES DIÉSEL (siga las recomendaciones del fabricante sobre niveles de desempeño del aceite)		
Categoría	Estado	Servicio
CK-4	Actual	La categoría de servicio CK-4 del API describe el aceite que se utiliza en motores diésel con ciclo de cuatro tiempos de alta velocidad diseñados para cumplir con los estándares de emisiones de escape del año modelo 2017 en carretera y fuera de carretera de nivel 4, así como también para los motores diésel de modelos previos. Estos aceites se formulan para ser utilizados en todas las aplicaciones con combustibles diésel, con un contenido de azufre de hasta 500 ppm (0,05 % por peso). Sin embargo, el uso de estos aceites con combustibles de azufre con más de 15 ppm (0,0015 % por peso) puede impactar en la durabilidad del sistema de tratamiento posterior de los gases de escape o en el intervalo entre cambios de aceite. Estos aceites son especialmente efectivos para mantener la durabilidad del sistema de control de emisiones, en los que se utilizan filtros de partículas y otros sistemas de tratamiento posterior avanzados. Los aceites CK-4 del API fueron diseñados para proporcionar una protección mejorada contra la oxidación del aceite, la pérdida de viscosidad debido al cizallamiento y a la aireación del aceite, además de protección contra el envenenamiento del catalizador, el bloqueo del filtro de partículas, el desgaste del motor, los depósitos en el pistón, la degradación de propiedades a baja y alta temperatura, y el aumento de la viscosidad relacionada con el hollín. Los aceites CK-4 del API superan los criterios de desempeño de las normas de los CJ-4, CI-4 con CI-4 PLUS y CH-4 del API, y pueden lubricar motores de manera efectiva respetando esas categorías de servicio del API. Cuando use un aceite CK-4 con combustible de azufre mayor que 15 ppm, consulte al fabricante del motor para conocer las recomendaciones de intervalos de mantenimiento.
CJ-4	Actual	Incorporado en 2010. Para motores diésel de ciclos de cuatro tiempos de alta velocidad diseñados para cumplir con los estándares de emisiones de escape del año modelo 2010 en carretera y fuera de carretera de nivel 4, así como también para los motores diésel de años modelo previos. Estos aceites se formulan para ser utilizados en todas las aplicaciones con combustibles diésel, con un contenido de azufre de hasta 500 ppm (0,05 % por peso). Sin embargo, el uso de estos aceites con combustibles de azufre con más de 15 ppm (0,0015 % por peso) puede impactar en la durabilidad del sistema de tratamiento posterior de los gases de escape o en el intervalo entre cambios de aceite. Los aceites CJ-4 del API superan los criterios de desempeño de los CI-4 con CI-4 PLUS, CI-4, CH-4, CG-4 y CF-4 del API, y pueden lubricar motores de manera efectiva respetando esas categorías de servicio del API. Cuando use un aceite CJ-4 con combustible de azufre mayor que 15 ppm, consulte al fabricante del motor para conocer los intervalos de mantenimiento.
CI-4	Actual	Incorporado en 2002. Para motores de cuatro tiempos y de alta velocidad diseñados para cumplir los estándares de emisión de escape 2004 implementados en 2002. Los aceites CI-4 se formularon para mantener la durabilidad del motor en el que se utiliza la recirculación de gas de escape (EGR) y que se destina a ser utilizado con combustibles diésel con un contenido de azufre con más de 0,5 % por peso. Pueden usarse en lugar de los aceites CD, CE, CF-4, CG-4 y CH-4. Algunos aceites CI-4 también pueden calificar para la designación CI-4 PLUS.
CH-4	Actual	Incorporado en 1998. Para motores de cuatro tiempos y de alta velocidad diseñados para cumplir los estándares de emisión de escape de 1998. Los aceites CH-4 se componen, específicamente, para su uso con combustibles diésel con un contenido de azufre de hasta 0,5 % por peso. Pueden usarse en lugar de los aceites CD, CE, CF-4, CG-4.
CG-4	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con diésel fabricados después de 2009.
CF-4	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con diésel fabricados después de 2009.
CF-2	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con diésel fabricados después de 2009. Los motores con ciclos de dos tiempos pueden exigir diferentes requisitos de lubricación que los motores de cuatro tiempos. Por eso, debe contactar al fabricante para conocer las recomendaciones actuales de lubricación.
CF	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con diésel fabricados después de 2009. Los aceites de categoría "C" posteriores suelen ser adecuados o preferibles para motores de automóviles diésel para los que se especificaron los aceites "CF". Los equipos más antiguos o los motores diésel de dos tiempos, especialmente aquellos que exigen productos monogrados, sin embargo, pueden requerir un aceite de categoría "CF".
CE	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con diésel fabricados después de 1994.
CD-II	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con diésel fabricados después de 1994.
CD	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con diésel fabricados después de 1994.
CC	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con diésel fabricados después de 1990.
CB	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con diésel fabricados después de 1961.
CA	Obsoleto	PRECAUCIÓN: no es adecuado para utilizar en la mayoría de los motores de automóviles impulsados con diésel fabricados después de 1959.

Nota. Imagen de la clasificación de los lubricantes para motores diesel de acuerdo a la norma API (American Petroleum Institute). Reproducida de manual de seminario análisis de lubricantes Noria, 2015, (Noria latín américa, 2015)

e Características químicas del lubricante

La química del lubricante depende de un conjunto de parámetros obtenidos durante la producción del mismo, donde se le agregan diversas sustancias (aditivos) para mejorar o cambiar algunas de sus propiedades y lograr el cumplimiento y calidad para cada operación específica. De acuerdo a Martínez (2014) las siguientes son algunas características de los aceites lubricantes:

- **Acidez:** La acidez de los lubricantes es causada por la descomposición del aceite debido a la operación a alta temperatura y los diferentes niveles de movimiento. Este índice de acidez se clasifica como una relación entre los no metales y el hidrógeno, como consecuencia de los procesos de oxidación puede verse las siguientes evidencias:
 - Generación de barros o sedimentos.
 - Presencia de corrosión.
 - Baja viscosidad.
 - Formación de carbón en las paredes metálicas.
- **Basicidad:** Al igual que con los ácidos, la basicidad resulta de la descomposición del aceite, pero en la dirección opuesta. Su función es contrarrestar los efectos de los ácidos en los lubricantes. El índice base es alto cuando el aceite es nuevo, pero disminuirá con el tiempo debido al aumento de la acidez del lubricante, el sobrecalentamiento o el aumento del contenido de azufre en el combustible. La vida del lubricante se puede determinar a partir de esta curva característica.
- **El número de neutralización:** Conocido como la cantidad requerida para neutralizar el número de base o el número de ácido de una muestra de lubricante, comúnmente se expresa en dos formas:
 - **Número de base total (TBN):** Es la cantidad en miligramos (mg) de hidróxido potásico (KOH) elemento alcalino que neutraliza los componentes ácidos de una muestra de 1 gramo de aceite.
 - **Número de ácido total (TAN):** Es la cantidad en miligramos (mg) de ácido clorhídrico (HCL) para neutralizar los alcalinos de una muestra de 1 gramo de aceite.

f Bases lubricantes

Este componente es uno de los más importantes, debido a que esta sustancia determina el índice de viscosidad del aceite y determina ciertas propiedades fisicoquímicas del aceite (aditivos). Este es un material que tarda en descomponerse mientras la máquina está funcionando. En la categoría base de los lubricantes, se pueden clasificar según su origen (animal, vegetal, sintético y mineral).

Los aceites vegetales y animales, también conocidos como aceites de sebo, se utilizan principalmente en la producción de artículos para el hogar. Los aceites sintéticos se fabrican

a partir de componentes seleccionados del petróleo crudo en la industria petroquímica, durante la conversión química optimizada (síntesis), y se caracterizan por un buen rendimiento y un alto costo. Finalmente, existen aceites minerales derivados del petróleo que se utilizan en la mayoría de los equipos mecánicos debido a su bajo costo y versatilidad en los equipos mecánicos. Según Martínez (2014) menciona como se clasifican según sus propiedades básicas y se dividen en tres grupos:

- **Parafínicas:** Estas son bases saturadas basadas en cadenas hidrocarbonadas. Algunas aplicaciones derivadas de esta base se emplean en la producción de fuel oils, lubricantes y gasolinas de bajo octanaje. Se caracterizan por su baja densidad, baja solvencia, alta fluidez y alto punto de inflamación.
- **Nafténicas:** Se considera inferior a la parafina debido al proceso de refinación. Sus propiedades incluyen bajo índice de viscosidad, inestabilidad química, bajo punto de fluidez y tendencia a la oxidación.
- **Aromáticas:** Debido a que están compuestos de cadenas insaturadas, son químicamente activos y propensos a producir ácidos orgánicos tras la oxidación. Sus propiedades más notables incluyen alta densidad, alta volatilidad e inestabilidad química.

En los aceites lubricantes de base mineral, consisten en cadenas saturadas e insaturadas, que permiten reemplazar algunas partes de la estructura por átomos de éster, como los átomos de azufre, oxígeno y nitrógeno, y sus porcentajes de concentración están determinados por el tipo de base mineral mencionado anteriormente.

g Aditivos de un lubricante

Debido a la creciente demanda de vehículos en funcionamiento y al deseo de los propietarios de vehículos de extender la vida útil de los equipos, la lubricación ha sido reconocida como un buen parámetro para ayudar a mantener los equipos, por lo que los principales fabricantes de lubricantes para motores, especialmente los motores diésel han desarrollado nuevos productos más competitivos y de mayor calidad en comparación con otras marcas, por lo que se ha mejorado el paquete de aditivos para mejorar la calidad del aceite, como la inhibición del aceite. Alguna de las propiedades de dichos aditivos nos comenta Martínez (2014) a continuación:

- **Detergentes – dispersantes:** Esta clase de aditivos está diseñado para evitar la contaminación de los mecanismos que lubrican. Además, los dispersantes evitan la acumulación de partículas extrañas manteniéndolas dispersas. Estos aditivos se agregan en combinación durante la fabricación como el Zinc, Calcio, Bario - Azufre, Cloro, Fósforo.
- **Anticorrosivos y antioxidantes:** Estos aditivos clave ayudan a proteger los componentes mecánicos de la corrosión mientras previenen la degradación del aceite por el envejecimiento y la oxidación. Los ingredientes activos como el ditiofosfato de zinc, el fosfato de etilo (base de arsénico o bismuto) son los más utilizados en este trabajo.
- **Mejoradores del índice de viscosidad:** La viscosidad es una característica definitoria importante de los lubricantes, por lo que es importante ajustar la viscosidad de acuerdo con las normas aplicables a los lubricantes, independientemente de las condiciones de temperatura. Por ello, se han utilizado soluciones de ésteres de ácido polimetacrílico y materiales plásticos que aumentan ligeramente la viscosidad para mejorar la versatilidad del aceite en diferentes condiciones. Las moléculas de estos aditivos suelen estar presentes en toda la superficie del aceite a bajas temperaturas. Estas moléculas se contraen para ocupar un pequeño volumen y formar pequeñas esferas móviles. A medida que aumenta la temperatura, estas pequeñas esferas aumentan de velocidad y se agrupan en estructuras compactas que mantienen el aceite en movimiento, mejorando así su viscosidad.
- **Mejoradores del punto de fluidez y congelación:** La contribución de los mejoradores del índice de viscosidad también está relacionada con el punto de congelación, que se ve afectado por los aceites cerosos, ya que cristalizan más a bajas temperaturas. Previene la formación de cristales tras la absorción. Otro socio es el naftaleno alquilado.
- **Antiespumantes:** Algunos cuerpos de aceite no son necesariamente sólidos o líquidos, pueden ser gaseosos. En este caso, el gas es vapor generado antes de los 100 °C y se considera un objeto extraño en la película lubricante que provoca el desgaste por cavitación. El trabajo del antiespumante es reducir el espesor de la espuma y hacer que esta reviente debido a la tensión superficial que ejerce el aceite sobre ella. El polímero de silicona es uno de los aditivos utilizados en este trabajo.

- **Mejoradores de oleosidad:** Este aditivo tiene la propiedad de adherirse a las partes mecánicas debido a la polaridad de la molécula. Este aditivo se agrega durante el refinado porque sus propiedades cambian durante el proceso de refinado. Este aditivo contiene 5-15% de productos derivados del aceite de palma.
- **Antidesgaste:** Forman una película protectora sobre las piezas mecánicas de trabajo y las protegen del desgaste. Algunos de los aditivos utilizados son: Fosfatos de alquilo de zinc y derivados del fósforo.
- **Aditivos de basicidad:** Los aceites por lo general tienden a cambiar el pH durante la etapa de descomposición. Por esta razón, se agregan aditivos para evitar la formación prematura de ácido debido a la neutralización. Algunos de los ingredientes activos básicos se utilizan como agentes de limpieza, pero en su mayoría son sales básicas.
- **Anticorrosivos:** Este aditivo está diseñado para evitar daños en las piezas de metal ferroso causados por el contacto entre los óxidos formados por el agua y el oxígeno del aire producidos durante la fase de combustión. Esto se hace formando una película protectora sobre la pieza de metal. Para ello se utilizan sales de sodio, magnesio, calcio, sulfonatos alcalinos o ácidos alquénilsuccínicos.
- **Aditivos de extrema presión:** Esta clase de aditivos se utiliza para evitar el desgaste de las piezas metálicas debido a cargas elevadas y para promover el deslizamiento del aceite y la adhesión a las piezas metálicas a través de monocapas y multicapas. Esta clase de aditivos contribuye al ahorro de energía debido a los derivados organometálicos de fósforo, azufre y molibdeno en los aditivos.

2.7. Análisis de lubricante usado

Los lubricantes de base mineral son uno de los lubricantes líquidos más importantes utilizados en la industria minera, con gastos anuales de millones de litros. Existen varias pruebas de laboratorio que se utilizan para evaluar el estado de los lubricantes usados y así determinar el final de su vida útil; generalmente de acuerdo al contenido de partículas, y la cantidad de humedad que contamina el lubricante, puede afectar el desgaste de los componentes y degradación del propio lubricante, reduciendo significativamente el rendimiento del mismo.

De acuerdo a Chimeno (2019) existen diversas normativas para su control, como la norma ISO 11171 que nos da la pauta sobre la calibración de contadores automáticos de

partículas en líquidos o la norma ISO 4406 para la determinación de los niveles de limpieza. Los códigos generados a partir de este estándar mostrarán un valor alto si el contenido de partículas es alto y un valor bajo si el aceite está limpio. La degradación del aceite generalmente se manifiesta como una mayor viscosidad y espesamiento y una mayor acidez, lo que generalmente significa una mayor corrosión de los componentes. Por lo tanto, el control normal del aceite se enfoca en verificar la viscosidad, la densidad, la acidez, el contenido de partículas y los aditivos. La sigla SACODE proviene de tres categorías establecidas en los análisis de aceite.

- SALud
- Contaminación
- DEsgaste

Al examinar los resultados del análisis, se puede obtener información suficiente para decidir si el lubricante debe cambiarse o someterse a un proceso de filtración o diálisis. Mediante este análisis, también es posible diagnosticar el estado de desgaste de los componentes.

Llacta Moscoso (2012) menciona en su informe que, a través del seguimiento de las tendencias e interpretación, nos da las bases necesarias para realizar un correcto diagnóstico de los resultados del análisis del lubricante.

- **SALUD:** Son aquellos cambios relacionados con el aceite en sí, por ejemplo: viscosidad, contenido de aditivos (P, Zn, Ca, Mg), oxidación, sulfatación, nitración, punto de inflamación, índice de viscosidad, TBN, etc.
- **CONTAMINACIÓN:** Son todos aquellos contaminantes presentes en el lubricante, tales como: partículas de tierra y polvo (Si), agua, solventes, combustibles, materiales del proceso (cemento, plástico, etc.), otros aceites lubricantes, hollín, refrigerante, etc.
- **DESGASTE:** Partículas procedentes de la maquinaria, como Fe, Cu, Sn, Al, Cr, etc.

2.8. Lubricante usado

Un lubricante normalmente está compuesto por una mezcla de base mineral o sintética con los aditivos más adecuados para la lubricación del sistema; luego de un determinado tiempo de trabajo, estos lubricantes usados son una combinación de productos muy diversos, tales como:

- Agua.
- Partículas metálicas, producto del desgaste de los componentes internos.
- Elementos organometálicos que contienen Plomo procedente de las gasolinas.
- Ácidos originados por la oxidación o el azufre del combustible
- Restos de aditivos, compuestos de Zinc, Calcio, Magnesio y Fósforo.
- También es recurrente la contaminación del medio lubricante por otras sustancias cuyo origen es repentino como:
- La tierra y el polvo del medioambiente
- Otro lubricante de distinta viscosidad

Todos estos son dañinos y conducen al desgaste prematuro, por lo que el análisis de aceite muestra esta contaminación en partes por millón (ppm) o midiendo la distribución del tamaño de las partículas con un instrumento llamado contador de partículas.

2.9. Muestras de lubricante usado

a Muestreo de aceite en retornos del sistema

Noria Latín América (2021) nos menciona que los métodos de muestreo tienen un gran impacto en los resultados de los programas de análisis de aceite. El proceso analítico comienza con el muestreo, el no hacerlo bien puede afectar los resultados y requerir un mantenimiento innecesario. Debe existir un procedimiento de muestreo formal y seguirse paso a paso.

La obtención de una muestra de aceite representativa tiene dos propósitos principales. El primer objetivo es maximizar la densidad de información. El muestreo debe hacerse de tal manera que proporcione la mayor cantidad de información posible por mililitro de aceite. Esta información se relaciona con criterios como la limpieza y sequedad del aceite, el agotamiento de los aditivos y la presencia de partículas de desgaste generadas por la máquina. Un segundo objetivo es minimizar la distorsión de la información, las muestras deben tomarse de manera que la concentración de información sea uniforme, consistente y representativa. Es importante asegurarse de que las muestras no se contaminen durante el proceso de muestreo, esto puede distorsionar o corromper los datos, lo que dificulta distinguir qué había en el aceite original y qué ingresó al aceite durante el proceso de muestreo. Para garantizar una buena densidad de datos y minimizar el desorden de datos al

tomar muestras de aceite, se debe considerar el método de muestreo, el equipo y la ubicación del muestreo. El procedimiento para obtener una muestra es muy importante para un análisis de aceite exitoso.

Hay algunos criterios para la colocación correcta de los puertos de muestreo de aceite en el sistema de circulación. Debido a diversas limitaciones en el diseño de la máquina, la aplicación y el entorno de la planta, no siempre es posible cumplir estrictamente con estos puntos, sin embargo, los consejos descritos a continuación deben seguirse lo más estrictamente posible:

- **Turbulencia:** Las mejores ubicaciones para el muestreo son áreas altamente turbulentas donde el petróleo no fluye en línea recta, sino que cambia de dirección dentro de la tubería. La colocación de la válvula de muestreo en una sección larga y recta de la tubería en ángulo recto con respecto a la ruta del flujo puede dejar pasar partículas, lo que esencialmente reduce significativamente la concentración de partículas que ingresan a la botella de muestra. Esto se puede evitar instalando válvulas de muestreo en los codos o curvas cerradas en la ruta del flujo.

Figura 25

Muestreo en Zona Turbulenta



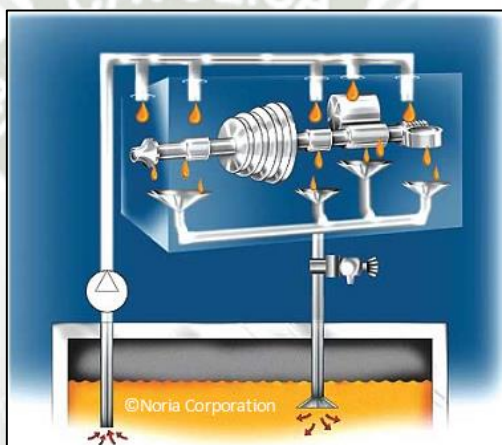
Nota. Diagrama del punto de muestreo en zona turbulenta de una línea de lubricación. Reproducida de la anatomía de una muestra de aceite representativa, 2021, (Noria Latín América, 2021)

- **Puntos de ingreso:** Siempre que sea posible, coloque el puerto de muestra aguas abajo de los componentes de desgaste y lejos de las áreas propensas a la penetración de partículas y humedad. Las líneas de retorno y drenaje que regresan al tanque proporcionan los niveles más representativos de partículas de desgaste y contaminantes. La información se diluye cuando el aceite llega al tanque.
- **Filtración:** Los filtros y separadores eliminan los contaminantes, lo que puede eliminar datos valiosos de las muestras de aceite. Las válvulas de muestreo deben colocarse aguas arriba de los filtros, separadores, deshidratadores y tanques de sedimentación, a menos que se evalúe específicamente el rendimiento del filtro.

- **Líneas de drenaje:** En las líneas de drenaje donde el lubricante se mezcla con el aire, se debe colocar una válvula de muestreo donde fluye y se acumula el aceite, en la parte inferior de los tubos horizontales. Por ejemplo, se puede instalar un cuello de cisne para concentrar el aceite en el área del puerto de muestra, posiblemente una trampa de aceite. Un sistema de circulación con una línea de retorno dedicada o una línea de drenaje de regreso al depósito es ideal para las válvulas de muestreo (Figura 26). En estos puntos se pueden tomar muestras antes de que el aceite regrese al tanque y siempre antes de que el aceite haya pasado por el filtro.

Figura 26

Muestreo en Línea de Retorno



Nota. Diagrama del punto de muestreo en una línea de retorno del lubricante. Reproducida de la anatomía de una muestra de aceite representativa, 2021, (Noria Latín América, 2021)

A medida que el aceite regresa al tanque, la información de la muestra se diluye ya que por ejemplo los sistemas hidráulicos y de lubricación pueden usar miles de galones de aceite. Además, los residuos de desgaste se acumulan en los contenedores durante semanas y meses y es posible que no reflejen con precisión el estado actual de la máquina.

b Muestreo de aceite en zona viva de sistemas circulantes

De acuerdo con Noria Latinoamérica (2021), si se toma una muestra de una línea de circulación, se le llama muestra de zona viva. Durante el proceso de muestreo, se pueden tomar medidas para mejorar la calidad y la eficiencia del muestreo de aceite de las zonas vivas. Esto incluye el muestreo de zonas turbulentas en sistemas donde el fluido se mueve y el aceite está bien mezclado. Sondee aguas abajo del dispositivo después de que haya realizado su función principal de lubricar cojinetes o engranajes o después de pasar por

bombas o actuadores hidráulicos. Muestree en condiciones de trabajo típicas en la planta de fabricación y uso normal, así como el uso de puntos de muestreo secundarios según sea necesario para identificar problemas más específicos.

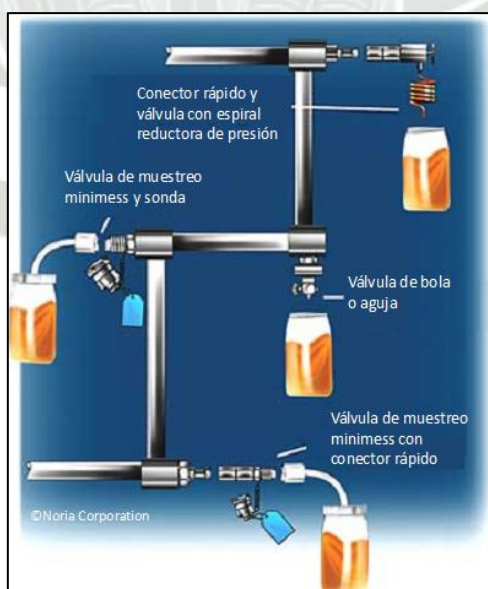
Así como hay factores que mejoran la calidad de la muestra, también hay factores que pueden afectar la calidad de la muestra y deben evitarse. Por ejemplo, es importante no tomar muestras de tuberías, extremos de mangueras y tuberías verticales donde el líquido no se mueve ni fluye. No tome muestras después de una línea de filtros o separadores, después de cambiar aceite o filtros, o cuando el fluido no esté en condiciones de trabajo normal. No tome muestras cuando el motor esté frío, parado o al ralentí. Además, las muestras no deben tomarse de zonas de flujo laminar donde no hay turbulencia de fluidos.

c Muestreo de líneas presurizadas

El método de muestreo es más simple cuando necesita tomar muestras de líneas de suministro presurizadas en cojinetes, engranajes, compresores, pistones, etc. La Figura 27 muestra cuatro configuraciones diferentes de acuerdo a Noria Latín América (2021)

Figura 27

Muestreo en Líneas Presurizadas



Nota. Diagrama del punto de muestreo con válvulas adecuadas para líneas presurizadas. Reproducida de la anatomía de una muestra de aceite representativa, 2021, (Noria Latín América, 2021)

- **Conector rápido y válvula con espiral reductora de presión:** Instale una válvula de bola o una válvula de aguja con un conector rápido y conecte un tubo de bobina

de acero inoxidable a la salida. El propósito de la tubería es reducir la presión del líquido a un nivel seguro antes de que ingrese a la botella de muestra. Se puede obtener un efecto similar con una pequeña válvula reductora de presión manual.

- **Válvula de muestreo minimess y sonda:** Esta alternativa requiere la instalación de una válvula minimess, preferentemente en el codo. La botella de muestra tiene un tubo con una sonda que sobresale de la tapa. La sonda está unida a la conexión minimess para que el aceite pueda fluir hacia la botella. La tapa de la botella de muestra tiene un respiradero a través del cual puede escapar el aire si entra líquido dentro de la botella. Este método de muestreo en particular requiere presiones más bajas (menos de 500 psi) por razones de seguridad.
- **Muestreo por válvula de bola:** Esta configuración requiere la instalación de una válvula de bola en el codo. Al tomar muestras, las válvulas deben abrirse para un lavado suficiente. Se requiere un lavado adicional si la extensión de salida de la válvula no está obstruida. Después del lavado, se retira la tapa de la botella de muestreo y se toma una muestra de flujo antes de cerrar la válvula. Tenga cuidado al quitar la tapa de la botella para evitar que entren contaminantes. Esta tecnología no es adecuada para aplicaciones de alta presión.
- **Muestreo por conector rápido y válvula minimess con sonda:** Esta opción requiere que la válvula minimess se conecte a un conector rápido hembra estándar. Este conjunto es portátil. Un conector rápido macho se conecta permanentemente a la línea de presión de la máquina en el punto de muestreo deseado. Para la toma de muestras, conecte el conector rápido con la válvula minimess (según el tipo de adaptador) al conector rápido de la máquina. Cuando el adaptador de la sonda se enrosca en la válvula minimess, el flujo se activa a través de la válvula hacia la botella de muestra. En muchos casos, estos acoplamientos rápidos ya están presentes en la máquina. Para líneas de alta presión, se debe usar un serpentín en espiral o una válvula reductora de presión como se indicó anteriormente.

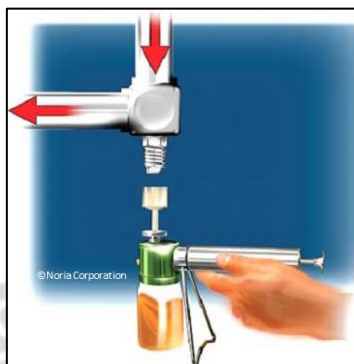
d Muestreo de líneas de circulación de baja presión

En algunos casos, es posible que las líneas de drenaje, entrada o retorno no estén lo suficientemente presurizadas para recolectar la muestra. En tales casos, el muestreo requiere la ayuda de una bomba de vacío con un adaptador especial que se puede conectar

temporalmente a una válvula como la válvula minimess. Enrosque el adaptador en la válvula minimess y el líquido será succionado en la botella.

Figura 28

Muestreo por Vacío de Una Línea de Retorno



Nota. Diagrama del punto de muestreo por vacío en una línea de retorno del lubricante. Reproducida de la anatomía de una muestra de aceite representativa, 2021, (Noria Latín América, 2021)

e Muestreo de depósitos húmedos

A menudo hay aplicaciones en las que las líneas de drenaje o retorno son inaccesibles o no existen. Estos se conocen comúnmente como sistemas de tanque húmedo, así como motores diesel, transmisiones y compresores de circulación. Estas aplicaciones no tienen líneas de retorno, por lo que se deben tomar muestras de fluidos de las líneas de suministro presurizado a los engranajes y cojinetes (Figura 29). Si es necesario, se deben tomar muestras antes del filtrado.

Figura 29

Línea de Presión o Alimentación



Nota. Diagrama del punto de muestreo con válvula adecuada para la línea presurizada. Reproducida de la anatomía de una muestra de aceite representativa, 2021, (Noria Latín América, 2021)

Se debe instalar una válvula de muestreo entre la bomba y el filtro. Esta ubicación de muestreo es mejor que tomar muestras con un accesorio de drenaje o usar una bomba de

vacío con una manguera insertada en el tubo de la varilla medidora. Muchos modelos de motores más nuevos tienen una válvula de muestreo correctamente instalada en la cabeza del filtro.

Figura 30

Muestreo Fuera de Línea



Nota. Diagrama del punto de muestreo fuera de línea en el cabezal del filtro. Reproducida de la anatomía de una muestra de aceite representativa, 2021, (Noria Latín América, 2021)

Otro ejemplo de un depósito húmedo con circulación se muestra en la Figura 30. Aquí hay una circulación externa a menudo denominada filtro de dializado. Este sistema de circulación fuera de línea proporciona una ubicación ideal para instalar una válvula de muestreo entre la bomba y el filtro. Una válvula de bola o válvula minimess permite que el líquido presurizado fluya suavemente hacia la botella de muestra sin afectar el funcionamiento de la máquina o el sistema de filtración.

f Muestreo de sistemas no circulantes

Noria Latinoamérica (2021) afirma que existen numerosos ejemplos donde no se proporciona circulación forzada y se deben tomar muestras del reservorio o casing del sistema. En muchos casos, esto debe hacerse mientras el equipo está en funcionamiento o en servicio.

Los ejemplos típicos de estos sistemas son los rodamientos lubricados con anillo o brida y los engranajes lubricados por salpicadura. Todas estas circunstancias hacen aún más difícil obtener una muestra representativa. La forma más fácil de tomar muestras de un sumidero de este tipo es quitar el tapón de drenaje de la parte inferior del sumidero y permitir que el líquido fluya hacia la botella de muestra. Este no es el método de muestreo o la ubicación ideal por una variedad de razones.

Lo más importante es el hecho de que los sedimentos del fondo, las partículas de desgaste y varios contaminantes (incluida el agua) ingresan a la botella en concentraciones que no son representativas de las que ocurren en o cerca de los puntos de lubricación con aceite. Siempre que sea posible, se deben evitar los métodos de muestreo con tapón de drenaje. El muestreo en el puerto de drenaje se puede mejorar mucho utilizando un tubo corto que se extienda hasta la zona de migración activa del depósito. Este conjunto de válvula de bola y tubo, que se muestra en la Figura 31, a menudo se puede enroscar en un puerto de drenaje y se puede quitar fácilmente para drenar fácilmente el aceite.

Figura 31

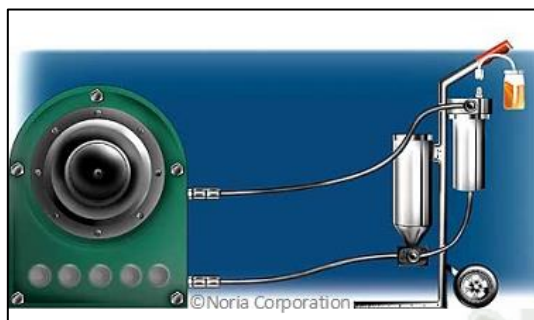
Toma de Muestra del Puerto de Drenado con Tubo Pitot



Nota. Diagrama del punto de muestreo haciendo uso de un tubo pitot. Reproducida de la anatomía de una muestra de aceite representativa, 2021, (Noria Latín América, 2021)

Idealmente, la punta del tubo del que se toma la muestra de aceite debe estar a la mitad de la superficie del aceite, a 2 pulgadas de la pared y al menos a 2 pulgadas del elemento giratorio dentro del recipiente de retorno del aceite.

Una tercera opción es el muestreo de vacío en el puerto de drenaje. En este método, la válvula minimess se instala como se describió anteriormente, pero el líquido no se introduce por gravedad en la botella de muestra, sino con la ayuda de una bomba de vacío. Esto es especialmente útil cuando el aceite es viscoso y difícil de extraer del tubo estrecho. Otra forma de tomar muestras de una caja de engranajes o caja de cojinetes es con un sistema portátil de circulación de aceite, como un carro de dializado. En este caso, el dializador se conecta al contenedor como se muestra en la Figura 32.

Figura 32
Muestreo Portátil Fuera de Línea


Nota. Diagrama del punto de muestreo haciendo uso de un sistema portátil de filtración. Reproducida de la anatomía de una muestra de aceite representativa, 2021, (Noria Latín América, 2021)

En este momento, el dializador hace circular el lubricante desde el fondo del contenedor para pasar por los filtros y regresarlo. Para evitar filtrar el aceite antes del muestreo, se debe usar la válvula de control direccional para desviar el filtro. Según el tamaño de la unidad, la cantidad de líquido en la unidad y la velocidad de flujo del dializador, el lubricante debe circular durante aproximadamente 5 a 15 minutos para limpiar el aceite. Una vez que se logra una mezcla suficiente, se puede tomar una muestra a través de la válvula de muestreo del carro del filtro (ubicada entre la bomba y el filtro).

g Muestreo por inserción de manguera y bomba de vacío

Uno de los métodos más comunes de muestreo de un baño húmedo o un recipiente de lubricación por salpicadura es con una bomba de vacío y un método de muestreo de inserción de manguera. Se inserta una manguera en el puerto de llenado o purga y se baja a la cavidad del depósito, generalmente hasta la mitad del nivel de aceite. Este método de muestreo tiene muchos inconvenientes y debe evitarse si en su lugar se pueden utilizar los métodos de muestreo anteriores.

Según Noria Latín América (2021) algunos de los principales riesgos y problemas asociados con este método de muestreo son:

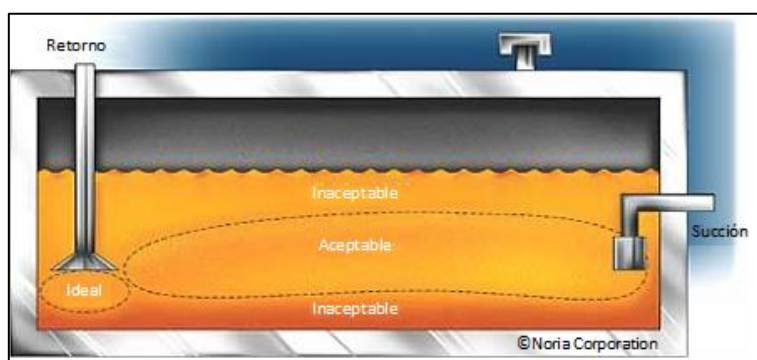
- **Ubicación de la manguera:** Las mangueras insertadas en los puertos de llenado, purga o varilla medidora son muy difíciles de controlar. Es difícil predecir dónde aterrizará el extremo de la manguera descrito en la Figura 33, lo que da como resultado que se tome una muestra diferente cada vez. También existe el peligro de

que la manguera llegue al fondo del tanque donde se acumularán partículas de desgaste y lodos.

- **Contaminación de la manguera:** Existe una gran preocupación de que el tubo recoja partículas de las paredes del contenedor cuando se inserta. Además, el propio tubo puede contaminarse debido a un control deficiente de la limpieza durante la fabricación o el almacenamiento.
- **Gran volumen de purga:** El método de inserción del tubo aumenta considerablemente la cantidad de lubricante que debe purgarse para obtener una muestra representativa. Para algunos sistemas de sumidero pequeños, esto es esencialmente el equivalente a un cambio de aceite. Además, si no se repone el aceite muestreado, puede arrancar con una cantidad de aceite lubricante insuficiente.
- **Asentamiento de partículas:** En la mayoría de los sistemas, el equipo debe estar apagado para usar este método. Esto significa que la producción para tomar muestras de aceite puede verse afectada. Además, las partículas comienzan a depositarse inmediatamente después de la parada, estratificándose según su tamaño y densidad, afectando la calidad de la muestra.
- **Intrusión en la máquina:** Debe ingresar a la máquina para tomar una muestra, esta intrusión presenta un riesgo de contaminación y siempre existe la preocupación de que la máquina no se restaure a las condiciones de funcionamiento adecuadas antes de la puesta en servicio. Cuando se utilicen bombas de vacío y muestreo con inserción de manguera, debe considerarse como último recurso. Sin embargo, existen otras situaciones en las que no se dispone de un método de muestreo práctico. Si un sistema circulatorio requiere el uso de este método de muestreo, la ubicación óptima de muestreo es entre las líneas de retorno y succión.

Figura 33

Muestreo por Manguera y Bomba de Vacío



Nota. Diagrama zonas de muestreo ideales para la utilización de una manguera y bomba de vacío. Reproducida de la anatomía de una muestra de aceite representativa, 2021, (Noria Latin América, 2021)

h Botellas y equipo para muestreo de aceite

Según Noria Latin America (2015), un factor clave para obtener muestras representativas es asegurarse de que el equipo de muestreo se limpie a fondo antes de la recolección de muestras. Esto generalmente se logra mediante el uso de una botella adicional para recoger el aceite purgado. Es importante extraer de 5 a 10 veces el volumen muerto antes del muestreo. Todos los elementos en contacto con el aceite se consideran espacios muertos y deben lavarse, incluidos:

- Tuberías sin flujo de lubricante del sistema.
- Puertos de muestreo, válvulas y adaptadores.
- Tuberías de dispositivos de muestreo.
- Adaptadores para usar con bombas de extracción de muestreo al vacío.
- No reutilice las mangueras de plástico utilizadas con las bombas de vacío para evitar la contaminación cruzada entre aceites.

Hay una variedad de botellas de muestra comúnmente utilizadas en el análisis de aceite. Debe elegir una botella que sea adecuada para su uso y prueba planeados. Se deben considerar varias características, como el tamaño, el material y la limpieza, al elegir una botella de muestreo. Varias botellas de muestra de varios tamaños están disponibles. Las capacidades van desde 50 ml (aproximadamente 2 onzas líquidas) hasta las botellas más comunes de 100-120 ml. Se recomiendan botellas más grandes si se requieren pruebas como el conteo de partículas o el análisis de viscosidad. Es posible que se requiera una botella de 200 ml (o dos botellas de 100 ml) si se requieren muchas pruebas diferentes. Es importante coordinar con el laboratorio para seleccionar un tamaño de botella que proporcione suficiente capacidad para ejecutar todas las pruebas requeridas, y que deje espacio adicional para el almacenamiento en caso de que la prueba deba realizarse nuevamente.

Otra consideración al elegir un tamaño de botella es evitar llenar todo el volumen de la botella con aceite durante el muestreo. Solo llene la botella parcialmente. El volumen sin llenar, llamado espacio de cabeza, es necesario para que los laboratorios agiten adecuadamente los líquidos y logren una distribución uniforme de las partículas suspendidas

y el agua en la muestra. Los lineamientos generales para el embotellado según Noria Latinoamérica (2015) son:

- Baja viscosidad (ISO VG 32 e inferior): use hasta aproximadamente 3/4 del volumen total.
- Viscosidad media (ISO VG 32 a ISO VG 100): Llene hasta aproximadamente 2/3 del volumen total.
- Viscosidad alta (ISO VG 100 y superior): Aproximadamente la mitad del volumen total.

Existen una variedad de materiales. El polietileno es uno de los más comunes, este es un material opaco similar a las botellas de plástico de leche o jugo. Este tipo de botella de muestra tiene la desventaja de que el aceite no se puede inspeccionar visualmente después del muestreo. Varias propiedades importantes de los aceites, como la sedimentación, el espesor, el brillo, la claridad y el color, se pueden observar fácilmente mediante inspección visual. Otro material es el plástico PET, es un material completamente transparente similar al vidrio y viene en una botella de tamaño estándar. Este plástico es compatible con la mayoría de los tipos de lubricantes y fluidos hidráulicos, incluidos los plásticos. Por supuesto, también tenemos botellas de vidrio, estas botellas tienden a ser costosas, pesadas y corren el riesgo de romperse durante el proceso de muestreo. La ventaja de las botellas de vidrio es que se pueden lavar y reutilizar. La limpieza de las botellas de vidrio a menudo supera a la de las botellas de plástico. Uno de los aspectos más importantes de la selección de botellas de muestreo es asegurarse de que estén razonablemente limpias.

2.10. Control de la contaminación del sistema de lubricación

En el contexto actual, cada industria tiene que administrar adecuadamente sus funciones, es decir, debe actuar para lograr la óptima utilización de los recursos para conseguir los máximos resultados de producción, minimizando el consumo de los mismos.

La lubricación es una de las tareas que tradicionalmente se mantiene solo como acción preventiva, donde las tareas de lubricación a menudo se definen como simples controles de nivel, lubricación y cambios de aceite; esta metodología de trabajo puede ocasionar elevados costos. De acuerdo con Abejaro Soto (2019) se tiene algunos datos al respecto:

“Alrededor del 60 % de las fallas mecánicas se deben a una mala lubricación o contaminación del fluido lubricante con agua o partículas” (K. Bannister “Lubrication for Industries”, 2005).

“Las pérdidas debidas a prácticas de lubricación deficientes representan el 1,6 % del PIB mundial” (Instituto Yost, Gobierno del Reino Unido, 2012).

“La presencia de partículas en los sistemas hidráulicos supone hasta el 80 % de los errores” (Vickers, fabricante de sistemas hidráulicos industriales).

“Los componentes mecánicos pierden el 70 % de su funcionalidad debido a la degradación de la superficie debido a una mala lubricación” (E. Rabinowicz, Ph.D., MIT, American Society of Lubrication Engineers, 1981).

Un estudio realizado por la Dra. PB Macpherson centrándose en las cajas de cambios de los helicópteros militares, demostró que el mayor impacto de la filtración y el control de la contaminación se produce cuando se eliminan las partículas menores de 3 micras.

Con los datos anteriores podemos definir que la contaminación del aceite lubricante a lo largo de su uso, vale decir, desde la compra hasta el uso y la lubricación, provoca más del 80 % del desgaste de los sistemas de lubricación, por lo que el diseño de un programa de control de contaminación del sistema de lubricación puede extender la vida útil del lubricante bajo las siguientes condiciones:

- Eliminando las partículas correspondientes al tamaño de la película lubricante que por lo general se encuentran de 0,5 a 20 micras (limpio).
- El lubricante de permanecer a una temperatura adecuada de funcionamiento (fresco).
- Evitar la presencia de humedad (seco).
- Supervisar el estado del lubricante mediante el análisis de aceite.

a Código ISO de contaminación

La contaminación del lubricante se mide con un Contador de Partículas, que detecta y cuenta partículas de hasta 100 micras de tamaño, sin considerar el elemento químico al que pertenezcan; identifica las partículas por su tamaño y proporciona los resultados de su conteo independientemente de si están compuestas por diferentes elementos, como hierro, silicio, cobre o incluso cabello humano.

Según Dominguez Soto (2018) el código ISO abrevia la cantidad de partículas por mililitro de líquido con un solo número. Utiliza tres canales de medición de 4, 6 y 14 micras y cuenta partículas de hasta 100 micras.

- El canal de 4 μm cuenta partículas de 4 a 100 μm .
- El canal de 6 μm cuenta partículas de 6 a 100 μm .
- El canal de 14 μm cuenta partículas de 14 a 100 μm .

La norma ISO 4406 especifica cómo reportar estos resultados ejemplificado en la Figura 34. Este estándar contiene una tabla con códigos que representan la cantidad de partículas en 1 ml de muestra, asignados a varios rangos. Los resultados de la medición se clasifican de acuerdo con los rangos especificados; es común utilizar los rangos de 6 micras o más y el de 14 micras o más, estos tamaños determinan el código como R6/R14 de solo dos dígitos. También puede especificarse completamente cuando el código contiene el rango R4 como tercer dígito para mayor detalle de partículas más pequeñas las cuales corresponde a la cantidad acumulada de partículas de tamaño superior a 4 micrones resultando un código de tres dígitos R4/R6/R14.

Figura 34

Asignación del Código de Contaminación

En este ejemplo, puede observar cómo se le asigna un código de contaminación sólida a la cantidad de partículas de un tamaño determinado, basado en donde cae el valor en la tabla. En este caso, el código de contaminación sólida es 20/17/13

Más de (part/ml)	Hasta e inclusive (part/ml)	Código ISO
80,000	160,000	24
40,000	80,000	23
20,000	40,000	22
10,000	20,000	21
5,000	10,000	20
2,500	5,000	19
1,300	2,500	18
640	1,300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2.5	5	9
1.3	2.5	8

Tamaño	Partículas/ml	Código ISO
> 4 micrones	9,721	20
> 6 micrones	1,254	17
> 10 micrones	326	
> 14 micrones	73	13
> 21 micrones	12	
> 38 micrones	5	
> 70 micrones	0	
> 100 micrones	0	

Nota. Imagen de la asignación del código de contaminación solida a la cantidad de partículas de un tamaño determinado. Reproducida de la importancia del código de contaminación solida ISO 4406 (Noria Latín América, 2021)

Como nos comenta Trujillo Corona (2012) los límites por objetivos aplicados al control de contaminación tienen como premio conseguir la extensión de la vida de la máquina; en la siguiente Figura 35 se presenta como una referencia en la que se puede identificar niveles de limpieza para diferentes configuraciones de operación.

Figura 35

Objetivos Generales de Limpieza y Condiciones de Operación

Componente	Presión de operación		
	< 100 bar	100 – 175 bar	> 175 bar
Servoválvulas	16/14/12	15/13/11	14/12/10
Válvulas proporcionales	17/15/12	16/14/12	15/13/11
Bombas de flujo variable	17/16/13	17/15/12	16/14/12
Válvulas de cartucho	18/16/14	17/16/13	17/15/12
Bombas de pistones	18/16/14	17/16/13	17/15/12
Bombas de paletas	19/17/14	18/16/14	17/16/13
Válvulas de control presión/flujo	19/17/14	18/16/14	17/16/13
Válvulas solenoide	19/17/14	18/16/14	18/16/14
Bombas de engranes	19/17/14	18/16/14	18/16/14

Nota. Imagen de la clasificación de objetivos generales de limpieza a través de la asignación del código de contaminación. Reproducida de la importancia del código de contaminación solida ISO 4406 (Trujillo Corona, 2012)

2.11. Filtración de lubricante

De acuerdo a Cedillo Salinas y Jaramillo León (2014) debido a los diversos contaminantes que están presentes en el aceite lubricante, aire y combustible, la necesidad de filtración se hace imprescindible, se puede decir que la finalidad del filtro es retener en estos líquidos la mayor cantidad posible de partículas abrasivas e impurezas de cierto tamaño. Estos pueden causar fallas en el producto, mal funcionamiento o desgaste excesivo de los elementos interiores en contacto. El criterio más importante para el diseño de un filtro son las exigencias respecto a su función:

- Exigencias de filtrado más fino como consecuencia de la disminución de las holguras de los elementos o mayores rangos de funcionamiento con elevado rendimiento.
- Los intervalos de servicio tienden a ser largos, lo que aumenta el tiempo de servicio del filtro.
- Mayor demanda de acceso y mantenimiento de filtros.

- Un paso de aceite a través del filtro que puede pasar sin una gran caída de presión.
- Obstrucción. Representa el tiempo que tarda el filtro en obstruirse.

Otro criterio importante a tener en cuenta al considerar los filtros es su rendimiento general. Indica cuántos contaminantes se pueden retener en la filtración de aceite, aire o combustible, independientemente del tamaño de las partículas retenidas. Sin embargo, cuando es importante saber el tamaño de una partícula, estamos hablando de una salida fraccionaria que puede clasificar partículas dentro de un rango de tamaño en función de su diámetro, que se mide en micras (um).

a Tasa Beta

De acuerdo a Wright (2016) La mejor clasificación más utilizada en la industria de filtros es la tasa beta. Se deriva de un método de varios pasos (ISO 16889) para evaluar el rendimiento de filtración de filtros finos, a continuación, en la Figura 36.

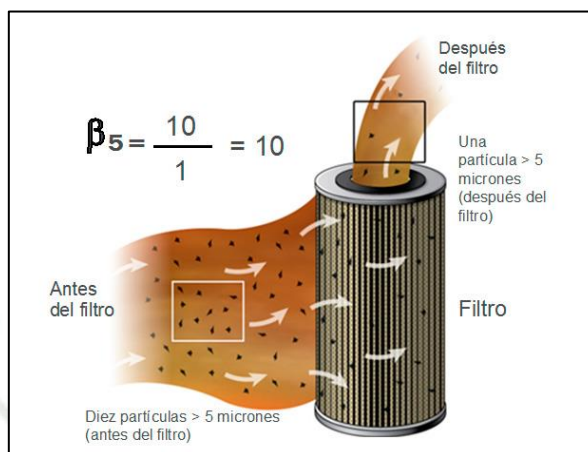
Figura 36

Efecto de la Tasa de Filtración (Tasa Beta) en la Limpieza del Fluido

Contaminación en el fluido a filtrar (partículas/ml)	Contaminación en el fluido después del filtro (partículas/ml)	Tasa Beta	Porcentaje de eficiencia
1,000,000	500,000	2	50
	50,000	20	95
	13,000	75	98.7
	5,000	200	99.5
	1,000	1,000	99.9

Nota. Eficiencia de filtración antes y después de pasar por el filtro de acuerdo a tasa beta determinado. Reproducida del congreso de mantenimiento y confiabilidad, Comprendiendo la eficiencia del filtro y la tasa beta, 2016, (Wright, 2016)

Para probar un filtro, se utilizan contadores de partículas que miden con precisión el tamaño y cantidad de partículas en un volumen conocido de fluido antes del filtro, así como el tamaño y cantidad de partículas después de pasar por el filtro. La tasa Beta se define como la cantidad de partículas antes del filtro dividido entre las partículas después del filtro, a un tamaño de partícula determinado. En la Figura 37, un filtro de cinco micrones con una tasa beta de 10 ($\beta_5=10$), tendrá en promedio 10 partículas mayores o iguales a cinco micrones antes de ingresar al filtro por cada partícula mayor o igual a cinco micrones después del filtro.

Figura 37
Tasa Beta


Nota. Eficiencia de filtración antes y después de pasar por el filtro de acuerdo a tasa beta determinado. Reproducida del congreso de mantenimiento y confiabilidad, Comprendiendo la eficiencia del filtro y la tasa beta, 2016, (Wright, 2016)

El tamaño de los poros es un factor importante para una buena filtración. Sin embargo, si el material del filtro es demasiado efectivo, puede retener importantes aditivos lubricantes y afectar su función. Las características generales de un filtro de aceite están determinadas por muchos factores, entre ellos:

- El tipo de líquido a filtrar y sus condiciones (viscosidad, temperatura y presión).
- Contaminantes que necesitan ser retenidos, es decir naturaleza química, granulometría, carga eléctrica, concentración, etc.
- Límite inferior de diámetro de partículas a retener.
- Caída de presión admisible del sistema de filtración.
- Vida del filtro, frecuencia de mantenimiento para filtros con vida útil limitada u otro tipo de filtros.
- Requerimientos físicos y químicos de filtración, esto está relacionado esencialmente con la conservación de los aditivos de detergentes y otros aditivos utilizados en los lubricantes.
- Posibilidad de colmatación u obstrucción del filtro.

2.12. Tipos de filtros

a Con cartucho recambiable

Consiste en un armazón metálico en la que se encuentra el elemento filtrante y un cartucho de material poroso. El aceite ingresa al filtro a través de la tubería, llena el depósito que rodea el cartucho, luego fluye a través del filtro y sale por la tubería de salida hacia el circuito de lubricación. Hay impurezas en el exterior del cartucho, que caen al fondo de la carcasa y se eliminan al cambiar el elemento filtrante.

Figura 38

Filtros de Cartucho Recambiable



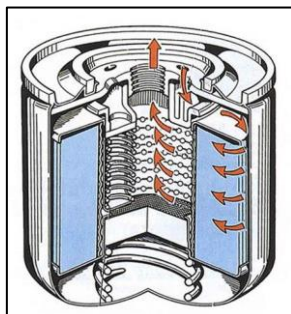
Nota. Imagen de las características físicas de un filtro de cartucho recargable. Reproducida del catálogo de productos filtros Parker

b Monoblock

En este tipo de filtro, el elemento filtrante y la carcasa forman un solo cuerpo, como se muestra en la Figura 39; el aceite ingresa por los orificios alrededor del orificio central roscado hasta rodear el filtro, como lo indican las flechas. Cuando el líquido pasa por el filtro, va hacia el interior y las impurezas contenidas en el aceite quedan en la superficie exterior. Luego, el aceite se drena a través de la línea central del filtro en la dirección de la línea de lubricación.

Figura 39

Filtro Monoblock



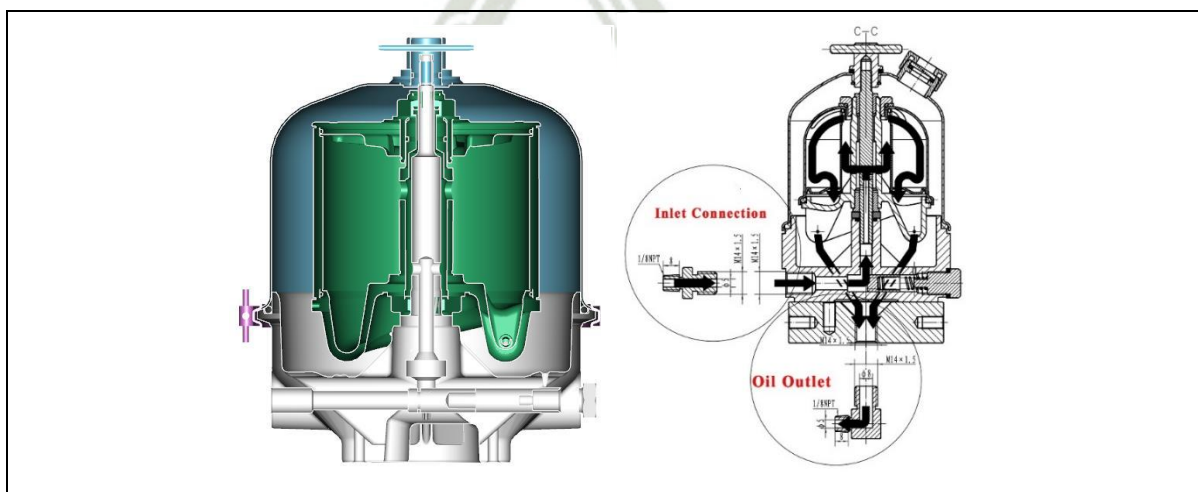
Nota. Diagrama de la composición interna de un filtro monoblock. Reproducida del estudio de la incidencia del uso de filtros de aceite alternos en el envejecimiento prematuro del aceite de motor de combustión interna, 2014, (Cedillo Salinas & Jaramillo León, 2014)

c Centrifugo

Este tipo de filtro utiliza la fuerza centrífuga para separar las impurezas. La Figura 40 muestra uno de estos filtros. El aceite ingresa a presión desde una bomba, viaja a un tubo central colocado verticalmente y de allí sale a través de dos boquillas hacia la cámara. La cámara no es más que un tambor sellado dispuesto para girar alrededor de 6000 rpm a 8000 rpm donde produce una fuerza de gravedad 200 veces mayor, arrojando las partículas contra las paredes del filtro y las recoge en la placa inferior del rotor que puede eliminarse en intervalos regulares de mantenimiento. Finalmente, el lubricante sale del circuito de lubricación por la parte inferior.

Figura 40

Filtro Centrífugo



Nota. Diagrama de la composición interna del filtro centrífugo. Reproducida de manual de mantenimiento equipos Caterpillar, 2015, (Ferreyros, 2015)

3 METODOLOGÍA

3.1. Lugar de estudio

Actualmente, en el Perú las empresas mineras se especializan en la explotación de minerales especialmente concentrados de cobre y molibdeno, donde existen muchos tipos de máquinas y equipos que realizan diferentes funciones respectivas para la extracción, movilización y procesamiento de los minerales mencionados.

Esta investigación involucra a dos empresas, una minera de cobre en sur del país y un socio estratégico como proveedor y desarrollador de mejoras en el mantenimiento de la flota 797F, objeto de estudio; en cuanto a la descripción de la zona donde se realizan las operaciones el yacimiento minero se encuentra ubicado a una altura de más de 4000 msnm en su parte más alta.

De acuerdo a Tiempo Minero (2021), con los esfuerzos de minado y procesamiento, se estimó que la producción de mineral se encuentra alrededor de 180,000 toneladas el 2021, en su mejor momento, la mina produjo hasta 220,000 toneladas.

Elegimos el sistema de transmisión como uno de los sistemas más importantes en camiones mineros CAT 797F, por lo que cabe señalar que para este tipo de maquinaria su importancia radica en el transporte de materias primas, ya que el material que transporta implica un recorrido aproximado de 8 km en un lapso de 28 veces por día, el cual se transformará posteriormente en una serie de pasos en el concentrado de cobre.

3.2. Proceso Productivo

De acuerdo a la minera, la producción está dividida en varias etapas:

a Mina

- **Perforación y Disparo:** La operación se realiza para llegar al mineral, del cual se extrae la roca del yacimiento, perforando la tierra y colocando un explosivo. Cuando la roca se fractura, el material se determina si se debe llevar a la concentradora, reduciendo su tamaño en una chancadora o si este material se envía a un botadero dependiendo de la ley que se tenga en la zona de explotación.
- **Carguío y Acarreo:** Las minas a cielo abierto tienen forma cónica, por lo que para llegar al mineral se deben construir niveles en forma de escalones gigantes de 15

metros de altura, conectados por rampas o caminos irregulares. El mineral extraído con una ley superior al 0,3 % se carga en palas y se carga en camiones que transportan este material para moverlo y alimentar la chancadora, para posteriormente ser transportado a la planta concentradora por medio de fajas.

b Concentradora

- **Chancado o Trituración:** La primera etapa de la planta es triturar el mineral aproximadamente a media pulgada de tamaño. El proceso de concentración comienza aquí, con la separación de los minerales.
- **Molienda:** Luego, los materiales triturados se transfieren a los molinos, donde se pulveriza. En esta etapa del proceso se utiliza agua, lo que permite liberar partículas de cobre.
- **Flotación:** La flotación es un proceso muy utilizado en la recuperación de los minerales sulfurados de cobre debido a la hidrofobicidad natural que tienen, dando como resultado el concentrado, partículas del mineral de cobre.
- **Filtrado y secado:** El concentrado de cobre se deshidrata mediante filtración a alta presión o usando calor, es aquí donde culmina la actividad minera; luego el concentrado obtenido es transportado por medio de tractocamiones con carretas encapsuladas para su exportación.

3.3. Población y Muestra

Galbiati Riesco (2015) definió que:

- **Población o población objetivo:** Es el conjunto de todos los valores del fenómeno característico que queremos observar. El nombre de la variable también se utiliza para identificar este conjunto. Por ejemplo, la edad de los estudiantes de secundaria en un país, las preferencias de marcas de jabón expresadas por grupos de consumidores, el diámetro de las muestras de prueba de objetos mecanizados, etc.
- **Muestra:** Es esa porción de la población que se mide efectivamente para proporcionar información sobre la población en su conjunto. Las muestras se seleccionan mediante un proceso que asegura un alto grado de representatividad de la población. El método de selección de la muestra se describe a continuación.

La población es de 25 camiones CAT 797F, para lo cual se tomó una muestra no probabilística de 2 camiones con los siguientes criterios:

- Equipos con componentes que hayan pasado su periodo de asentamiento con un cambio de lubricante realizado.
- Equipos que no cuenten con elevado desgaste o se acerquen a una reparación del componente.
- Equipos que no cuenten con antecedentes de fallas operativas que afecten el desempeño del componente.
- Equipos con condiciones de operación, recorrido y tiempo de vida útil similares.

3.4. Técnica e instrumento de recolección

Para la investigación se utilizó las siguientes técnicas e instrumentos para la recolección de datos como se describe en la Tabla 3:

Tabla 3

Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

TÉCNICA	INSTRUMENTO
DOCUMENTAL	Manual de operación y mantenimiento del camión CAT 797F.
	Ficha Técnica del lubricante.
	Reporte de análisis de aceite.
	Bomba de vacío.
EMPÍRICA	Frasco.
	Manguera.
	Dializador de lubricante.
	Odómetro.

Nota. Instrumentos para la recolección de datos.

3.5. Análisis y procesamiento de datos

Seguimos las recomendaciones del OEM (Manual de lubricantes CAT) y las hojas de datos técnicos del lubricante al seleccionar los lubricantes para luego realizar el procesamiento de acuerdo a la Figura 41.

Las muestras de lubricante obtenidas mediante la técnica de extracción al vacío fueron procesadas por un laboratorio perteneciente al proveedor del lubricante denominado SmartLab para su análisis, que de acuerdo al brochure obtenido de su página web permite obtener reportes de precisión de cambios de aceite y compararlos con las frecuencias óptimas de cambio establecida por el fabricante o los responsables de mantenimiento.

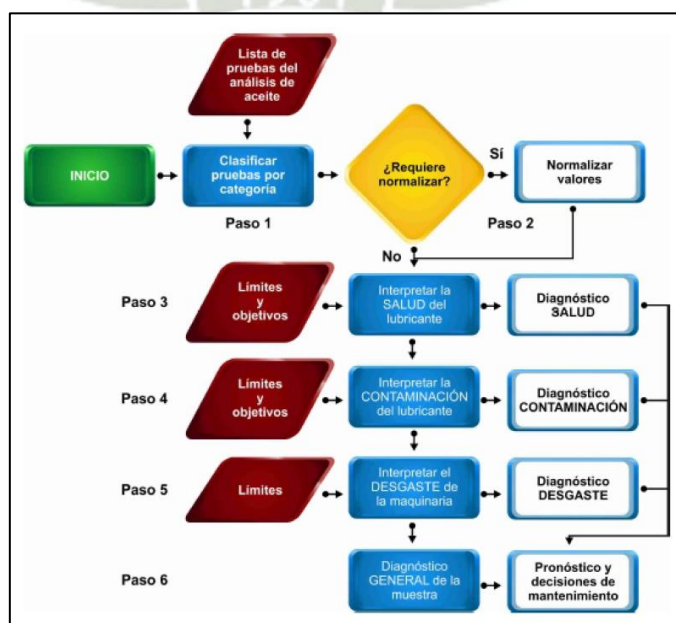
La interpretación de los resultados del análisis de aceite se realizó utilizando la tecnología SACODE, siglas que hacen referencia a:

- SALud del lubricante
- CONtaminación
- DEsgaste

Luego de realizar una interpretación del análisis de aceite, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos y los límites establecidos para poder realizar un diagnóstico final del estado de los componentes traseros del equipo.

Figura 41

Pasos de Interpretación SACODE



Nota. Pasos para efectuar el diagnóstico de manera ordenada. Reproducida de la guía de diagnóstico y pronóstico para la toma de decisiones sustentadas. Capítulo 5 Interpretación de análisis de lubricantes, 2012, (Trujillo Corona, 2012)

a Normalización de datos

De acuerdo a Trujillo Corona (2012), nos comenta que algunos de los resultados del análisis de lubricante son influenciados por el tiempo que el lubricante ha estado trabajando en la máquina y por la cantidad de aceite que se repone al sistema; en el caso de que la frecuencia de la toma de muestra no se ajuste al intervalo de frecuencia estándar (+-10 %), será necesario normalizar la información a las horas estándar de toma de muestra.

Los resultados como la viscosidad, contaminación por partículas, agua, tierra, glicol, combustible no deben normalizarse, ya que son procedentes del ingreso de elementos que no están relacionados con el desgaste de los elementos de la maquinaria; para la normalización de datos se deberá utilizar la siguiente fórmula (2):

$$V_n = \frac{V}{t} * T \quad (2)$$

Donde:

- V: Resultado original del reporte de laboratorio.
- t: Periodo que el aceite ha estado en uso. (km, horas, meses, etc.)
- T: Parámetro para normalizar V a un tiempo estándar.

El régimen de drenado ideal es un valor recomendado para usar como “T”, esto para el caso de equipos donde la toma de muestra se realiza previamente a la acción del drenado; para el caso donde se tomen varias muestras entre cada drenado es recomendable utilizar un periodo estándar ideal con las mismas unidades de “t”.

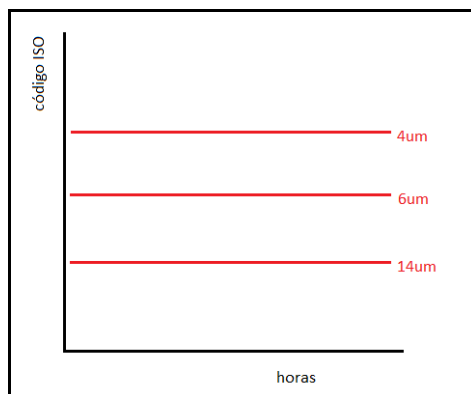
3.6. Establecimiento de los límites aceptables

Al establecer alarmas o límites de tolerancia, puede identificar cuándo una máquina presenta síntomas de falla. Con base en los resultados del análisis de aceite, identificamos la causa del daño e implementamos el mantenimiento adecuado.

- **Límites de cantidad de partículas:** El control de partículas de suciedad se utiliza para prolongar la vida útil del lubricante.

Figura 42

Límites Superiores de Conteo de Partículas



Nota. Diagrama representativo de límites superiores para una operación confiable de la maquinaria.

- **Límites de envejecimiento:** El límite de envejecimiento está relacionado con la degradación del lubricante donde se pierden la viscosidad y las propiedades aditivas.

Figura 43

Límites Superior e Inferior de Viscosidad



Nota. Diagrama representativo de límites superiores e inferiores para una operación confiable de la maquinaria.

- **Límites del fabricante original de la máquina (OEM):** Estos límites miden el aumento o la variación de las partículas de desgaste mecánico durante la vida útil del lubricante recomendado por el fabricante.

Figura 44
Límites de Desgaste CAT a 2000 Horas

Created	31 May 2013		
Manufacturer	CATERPILLAR		
Family	All		
Model	797F		
Product ID Prefix	LAJ		
Compartment	DIFFERENTIAL REAR		
Valid Equipment	98		
Valid Samples	1653		
Valid Fluid Hours	2000		
Element	No Action Required	Monitor	Action Required
Copper	0 to 67	68 to 86	Over 86
Iron	0 to 35	36 to 42	Over 42
Chromium	0 to 2	3 to 4	Over 4
Aluminum	0 to 2	3 to 4	Over 4
Lead	0 to 8	9 to 11	Over 11
Silicon	0 to 10	11 to 13	Over 13
Tin	0 to 3	4 to 5	Over 5

Created	31 May 2013		
Manufacturer	CATERPILLAR		
Family	All		
Model	797F		
Product ID Prefix	LAJ		
Compartment	FINAL DRIVE REAR RIGHT, FINAL DRIVE REAR LEFT		
Valid Equipment	88		
Valid Samples	3176		
Valid Fluid Hours	2000		
Element	No Action Required	Monitor	Action Required
Copper	0 to 50	51 to 68	Over 68
Iron	0 to 28	29 to 35	Over 35
Chromium	0 to 2	3 to 4	Over 4
Aluminum	0 to 2	3 to 4	Over 4
Lead	0 to 5	6 to 7	Over 7
Silicon	0 to 10	11 to 13	Over 13
Tin	0 to 2	3 to 4	Over 4

Nota. Imagen de los límites establecidos por el fabricante en partículas por millón (ppm) del camión minero CAT 797F, arriba, establece límites para 2000 horas de operación del lubricante en el componente diferencial, abajo, establece límites para los mandos finales derecho e izquierdo. Reproducidas de las tablas de desgaste S.O.S. CAT, 2013, (Caterpillar Inc., 2013)

Figura 45
Límites de Desgaste CAT a 4000 Horas

Created	31 May 2013		
Manufacturer	CATERPILLAR		
Family	All		
Model	797F		
Product ID Prefix	LAJ		
Compartment	DIFFERENTIAL REAR		
Valid Equipment	98		
Valid Samples	1653		
Valid Fluid Hours	4000		
Element	No Action Required	Monitor	Action Required
Copper	0 to 89	90 to 109	Over 109
Iron	0 to 48	49 to 55	Over 55
Chromium	0 to 2	3 to 4	Over 4
Aluminum	0 to 2	3 to 4	Over 4
Lead	0 to 11	12 to 14	Over 14
Silicon	0 to 9	10 to 12	Over 12
Tin	0 to 4	5 to 6	Over 6



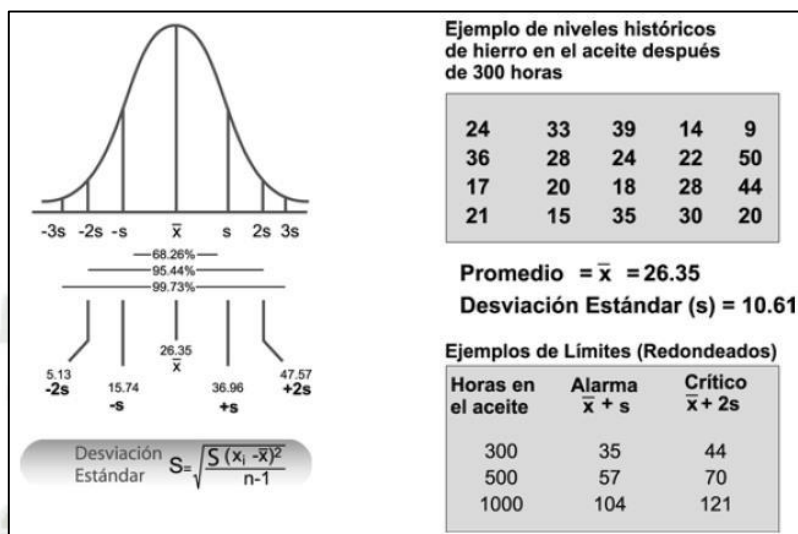
Created	31 May 2013		
Manufacturer	CATERPILLAR		
Family	All		
Model	797F		
Product ID Prefix	LAJ		
Compartment	FINAL DRIVE REAR RIGHT, FINAL DRIVE REAR LEFT		
Valid Equipment	88		
Valid Samples	3176		
Valid Fluid Hours	4000		
Element	No Action Required	Monitor	Action Required
Copper	0 to 59	60 to 76	Over 76
Iron	0 to 35	36 to 42	Over 42
Chromium	0 to 2	3 to 4	Over 4
Aluminum	0 to 2	3 to 4	Over 4
Lead	0 to 6	7 to 8	Over 8
Silicon	0 to 10	11 to 12	Over 12
Tin	0 to 2	3 to 4	Over 4

Nota. Imagen de los límites establecidos por el fabricante en partículas por millón (ppm) del camión minero CAT 797F, arriba, establece límites para 4000 horas de operación del lubricante en el componente diferencial, abajo, establece límites para los mandos finales derecho e izquierdo. Reproducidas de las tablas de desgaste S.O.S. CAT, 2013, (Caterpillar Inc., 2013)

- **Límites estadísticos:** Los límites estadísticos se aplican cuando existe un historial de resultados de análisis de aceite de equipos monitoreados y deben reflejar la condición o condición real del equipo.

Figura 46

Límites Estadísticos



Nota. Imagen de un ejemplo del cálculo estadísticos para hallar la desviación estándar. Reproducida de la tesis de mantenimiento predictivo basado en análisis de aceite para mejorar la disponibilidad de los remolcadores con motor cummins isx en una empresa de transporte de carga, 2019, (Portocarrero Servan y Rabanal Delgado, 2019)

- **Tasa de desgaste:** Este valor se calcula a partir de la división del resultado del análisis del lubricante del elemento químico a evaluar que por lo general es de naturaleza metálica y el número de horas de operación de lubricante en uso; el objetivo de este valor es determinar alguna variación significativa en la tendencia de los diferentes resultados que se obtienen a lo largo de la vida útil del lubricante en la maquinaria, ya que si se observa una tendencia de incremento sería un claro indicativo de un comportamiento de desgaste acelerado; por el contrario, si se observa una tendencia de disminución el comportamiento de desgaste se reduce.

a Línea Base

Estas son las especificaciones originales de los lubricantes nuevos como la Viscosidad, conteo de partículas, contenido de aditivos, P, Zn, Ca, Mg, B, Si; el Silicio puede ser un aditivo antiespumante a base de Metilsilicona o pueden ser contaminante del polvo.

Conocer el lubricante que se tiene en el equipo que se analiza es importante para poder tener una referencia de inicio de control de los elementos e identificar la degradación de sus aditivos y la aparición de elementos ajenos para su correcta interpretación de los resultados del análisis de aceite.

Además de conocer la marca del lubricante, el tipo específico y su grado de viscosidad, se debe conocer los valores correspondientes a la acidez o basicidad (TAN o TBN), los aditivos metálicos y sus concentraciones, la resistencia a la oxidación inicial y en ocasiones algunos de los valores de desempeño específico, como se describe en la Tabla 4.

Tabla 4
Especificaciones de Lubricante Nuevo

	Especificaciones y Aprobaciones	Mobiltrans HD 60™	Mobil Delvac 1 FDAO™
Base Caterpillar		Mineral TO-4	Sintético FD-1
Propiedades:			
Grado		SAE 60	ISO 320
Densidad 15.6 °C, kg/l	ASTM D4052	0.91	0.8573
Viscosidad Cinemática @ 100 °C. cSt	ASTM D445	25.2	31.6
Viscosidad Cinemática @ 40 °C. cSt	ASTM D445	340	320
Índice de Viscosidad	ASTM D2270	96	138
Punto mínimo de fluidez, °C	ASTM D97	-12	-45
Punto de inflamación, °C	ASTM D92	244	246
Temperatura ambiente, °C		-10 a 50 °C	-25 a 50 °C
Boro, ppm		-	95
Calcio, ppm		3000	270
Fósforo, ppm		1100	300
Zinc, ppm		1270	<25
TAN		0.59	0.67

Nota. Especificaciones del fabricante de dos tipos de lubricantes nuevos, mineral y sintético.

Reproducida de las fichas técnicas de lubricantes Mobil™, 2020, (Mobil™, 2020)

3.7. Indicadores de gestión

Beltrán Jaramillo (2013) nos comenta que medir es comparar una magnitud con un patrón preestablecido con el fin de eliminar la incertidumbre o por lo menos reducirla a su mínima expresión, donde la clave consiste en elegir las variables críticas para el éxito del

proceso; por lo que podemos definir que un indicador es la relación entre las variables cuantitativas o cualitativas, que permiten observar la situación y las tendencias de cambio generadas en el objeto o fenómeno observado, respecto de objetivos y metas previstos e influencias esperadas. Estos indicadores pueden ser valores, unidades, índices, series estadísticas, etc.

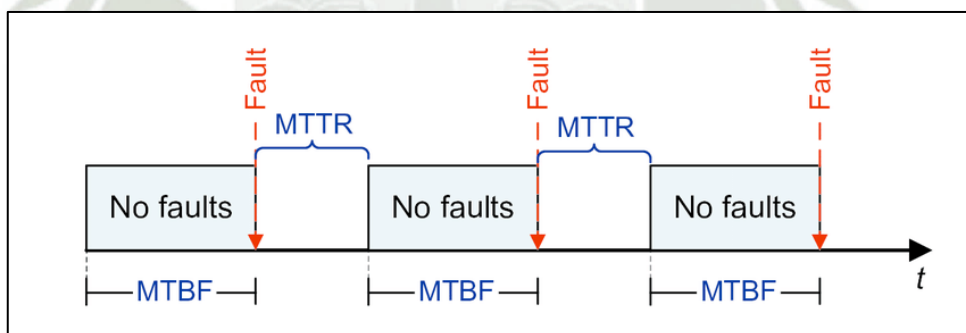
Para efecto de este trabajo de investigación utilizaremos la disponibilidad como el indicador más apropiado a medir.

a Disponibilidad

Acuña Acuña (2003) define que: “Disponibilidad es la probabilidad de que un producto funcione normalmente en cualquier momento del tiempo, cuando es operado bajo condiciones especificadas” (p 21). Corresponde al tiempo que un equipo o sistema, esté listo para cumplir una función esperada bajo ciertas condiciones como se describe en la Figura 47.

Figura 47

Tiempos de Mantenimiento



Nota. Diagrama donde se representa los tiempos MTBF y MTTR a lo largo de un tiempo “t”. Reproducida del trabajo de maestría en gestión estratégica y logística en mantenimiento, (Palza Bernuy, 2021)

También puede estar definida por el cociente entre las horas trabajadas y las horas utilizadas en reparar por un periodo determinado:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{Horas trabajadas} + \text{Horas en reparación}} \quad (3)$$

Para el caso de que ocurriera una falla, esta debe ser reparada en un tiempo menor al máximo permitido en función del MTBF y MTTR.

- **Tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures - MTBF):** Es el tiempo medio transcurrido entre fallas sucesivas de un producto reparable.

$$MTBF = \frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{Número de paradas}} \quad (4)$$

- **Tiempo medio para reparar (Mean Time to Repair - MTTR):** Es el tiempo medio transcurrido para la reparación o intervención de la maquinaria.

$$MTTR = \frac{\text{Horas en reparación}}{\text{Número de paradas}} \quad (5)$$

Si reemplazamos las horas trabajadas y las horas en reparación en la primera ecuación por los indicadores MTBF y MTTR, obtenemos lo siguiente:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (6)$$

3.8. Estrategia actual

Actualmente, se cuenta con 25 camiones 797F en operación, se realiza un mantenimiento programado en 6 etapas cada 500 horas, además se realiza un procedimiento de cambio de componentes según PCR (Planificación y Reparación de Componentes) de 18000 horas fijado por fábrica. En cuanto a seguimiento de componentes mayores, se realiza monitoreo de condiciones a través del análisis de lubricante.

Tabla 5

PCR de Componentes y Lubricantes

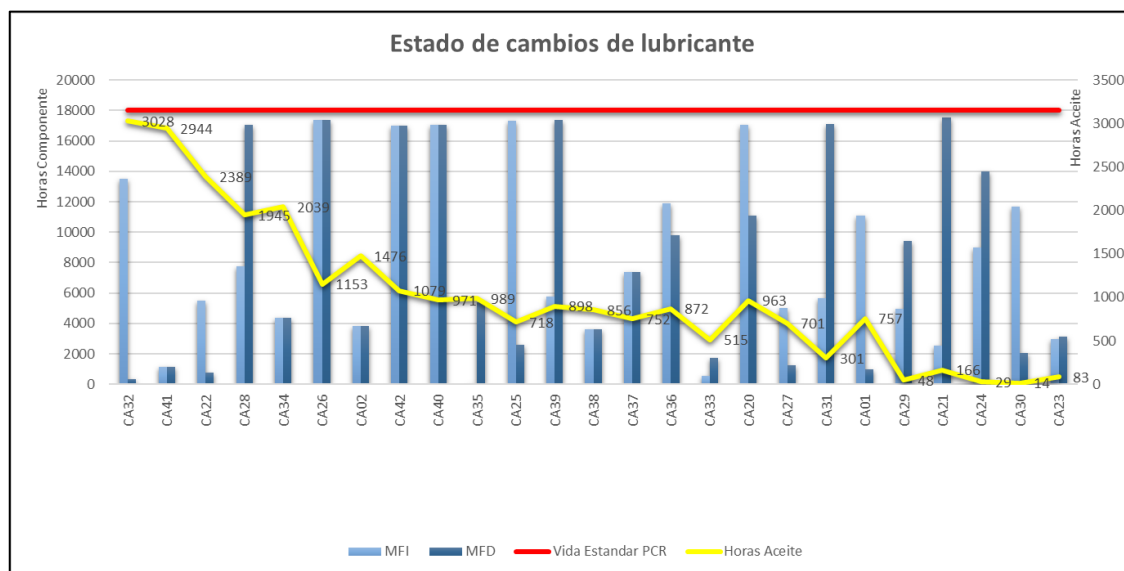
	<i>Diferencial y Mando Finales (Hrs)</i>	<i>Cambio de lubricante (Hrs)</i>	<i>Tipo de lubricante</i>	<i>Cantidad (Gal)</i>
Diferencial	18000	3000	Mobiltrans HD60™	310,7
Mando Final Izq.	18000	3000	Mobiltrans HD60™	48,6
Mando Final Der.	18000	3000	Mobiltrans HD60™	48,6

Nota. Estrategia actual de la minera para realizar los cambios de componentes y lubricante. Basado en la planificación y reparación de componentes CAT (Caterpillar Inc., 2009)

Actualmente, la frecuencia de cambio de aceites y el tipo de aceite utilizado es como se muestra en la Tabla 5 y el estado de cambios de lubricante se grafica en la Figura 48.

Figura 48

Horas de Componentes y Lubricante



Nota. Diagrama de barras representativo de las horas actuales de los componentes mando final izquierdo (MFI) y mando final derecho (MFD), horas de lubricante y límite PCR.

a Tipo y Frecuencias de mantenimiento

Tabla 6

Tipos de Mantenimiento

<i>Tipo de Mantenimiento</i>	<i>Frecuencia (Hrs)</i>	<i>Componente</i>
PM1	500	Motor
PM2	1000	Convertidor y Transmisión
PM3	3000	Diferencial y Mandos Finales

Nota. Estrategia actual de la minera para realizar los mantenimientos preventivos programados de los principales componentes del camión minero CAT 797F. Basado en la planificación y reparación de componentes CAT (Caterpillar Inc., 2009)

b Límites establecidos

Basándose en las recomendaciones del fabricante, la minera estableció como límites de acción de cambio de lubricante los considerados en las tablas de desgaste de fábrica para

un ciclo de trabajo del lubricante de 2000 horas, utilizáramos los valores de la columna que recomienda una acción de monitoreo, ya que así establecemos valores límite más conservadores para una frecuencia de cambio de 3000 horas (PM3); meta de intervención establecida por la minera a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7

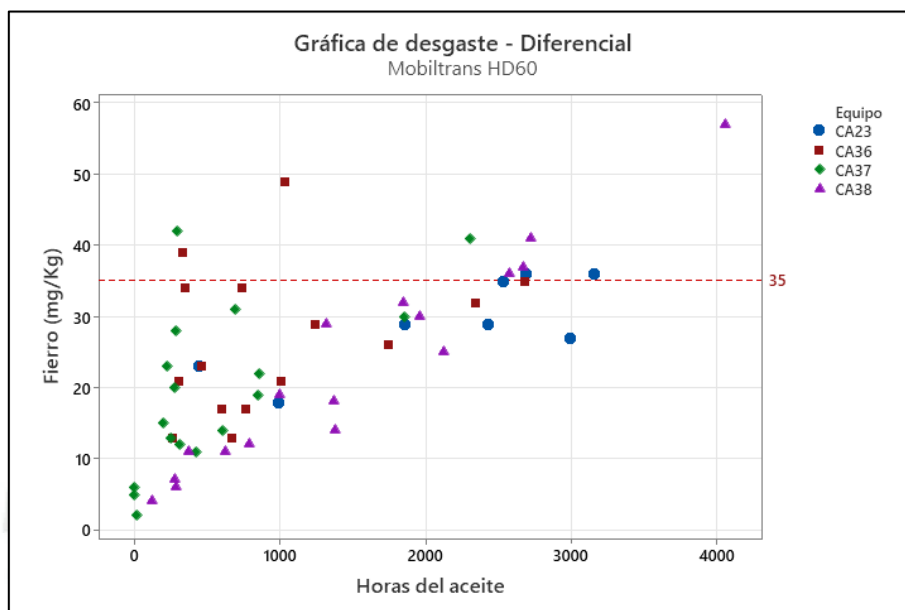
Límites de Desgaste a 3000 Horas

<i>Elemento</i>	<i>Límites (ppm)</i>
Cobre	67
Fierro	35
Cromo	2
Aluminio	2
Plomo	8
Silicio	10
Titanio	3

Nota. Límites establecidos por la minera para 3000 horas de operación del lubricante en partículas por millón (ppm) en el diferencial del camión minero CAT 797F. Basado en los límites del fabricante para 2000 horas de operación del lubricante Figura 44.

c Disponibilidad antes de aplicar el plan

En el diagrama de la Figura 49 podemos observar el comportamiento de desgaste del fierro, con el lubricante en uso (Mobiltrans HD60TM) se realizaron cambios del lubricante en cuatro equipos de la flota al llegar y sobrepasar el límite establecido de 35 ppm, estos cambios no llegaron a alcanzar las 3000 horas de operación necesarias para su intervención en un PM3.

Figura 49
Cambios de Lubricante Realizados por Encima del Límite


Nota. Grafica de desgaste del hierro del componente diferencial (ppm) donde se observan resultados de cuatro camiones mineros CAT 797F que sobrepasan el límite establecido haciendo uso del lubricante mineral Mobiltrans HD 60™.

Por tanto, hace que el lubricante se drene a menor tiempo de lo planificado y no a la frecuencia que estableció la minera, esto causa que se tenga mayores paradas y la disponibilidad sea baja.

Para asegurar el éxito de la extensión y migración del lubricante deben seleccionarse equipos representativos de la operación, que operen continua y preferiblemente al 100 % con componentes que ya hayan pasado su periodo de asentamiento, con un tiempo de vida útil de los componentes a un tercio de avance en sus horas de operación antes de su PCR (Planificación y Reparación de Componentes) o que tengan por lo menos un cambio del lubricante, no se recomienda seleccionar equipos que presenten síntomas de desgaste o que se acerquen a una reparación. Se prefieren equipos en los que se garantice una adecuada documentación de las condiciones de operación y desempeño con los lubricantes actuales, por lo que se determinó probar en dos equipos CAT 797F que encajarían con las recomendaciones, denominados CA36 y CA37.

Tabla 8
Disponibilidad Antes de la Migración

<i>Mes</i>	<i>Equipo</i>	<i>Disponibilidad</i>	<i>Mes</i>	<i>Equipo</i>	<i>Disponibilidad</i>
1	CA36	83,15 %	1	CA37	88,67 %
2	CA36	73,14 %	2	CA37	89,46 %
3	CA36	86,81 %	3	CA37	71,84 %
4	CA36	83,73 %	4	CA37	88,86 %
5	CA36	84,72 %	5	CA37	81,57 %
6	CA36	85,36 %	6	CA37	46,67 %
7	CA36	83,06 %	7	CA37	84,27 %
8	CA36	81,54 %	8	CA37	61,73 %
9	CA36	82,45 %	9	CA37	85,59 %
10	CA36	67,99%	10	CA37	83,90 %
11	CA36	82,19%	11	CA37	83,40 %
12	CA36	77,31%	12	CA37	74,26%

Nota. Cuadro de disponibilidad mensual de los camiones mineros CAT 797F CA36 y CA37 establecidos para realizar la prueba de migración y extensión de vida útil del lubricante

De la Tabla 8 podemos observar que antes de realizar la migración y extensión de vida útil del lubricante, presentaba una disponibilidad promedio de los dos camiones a estudiar de 80,95 % y 78,35 % respectivamente.

3.9. Especificaciones del lubricante recomendado por el OEM

Las especificaciones que el fabricante original proporciona en base de los requisitos necesarios para su lubricación y mantenimiento son CAT TO-4 o la actualización de la especificación CAT FD-1 como se muestran en la siguiente Figura 50.

Figura 50
Especificaciones del Lubricante para Diferencial y Mandos Finales

Recomendaciones de viscosidades de lubricantes a temperaturas ambiente (exteriores) para camiones de obras						
Compartimiento o sistema	Tipo y clasificación del aceite	Viscosidades del aceite	°C		°F	
			Min	Máx	Min	Máx.
Diferencial, ruedas delanteras y mandos finales	FDAO Cat ⁽¹²⁾ FDAO SYN ⁽¹²⁾ Cat FD-1 comercial ⁽¹³⁾	SAE 50 ⁽¹⁴⁾	(14)	32	(14)	90
		SAE 60 ⁽¹⁴⁾	(14)	50	(14)	122
		FDAO SYN ⁽¹⁴⁾ Cat	(14)	50	(14)	122

(12) FDAO Cat, FDAO SYN (aceite para ejes y mandos finales) Cat (excede los requisitos de la especificación FD-1 Cat)

(13) Puede usarse TDTO Cat o un aceite comercial CAT TO-4 como tercera opción en lugar de los recomendados FDAO Cat, FDAO SYN Cat o aceite comercial CAT FD-1.

(14) FDAO SYN Cat, SAE 60 FDAO Cat o aceite comercial FD-1, son aceites los recomendados en la mayoría de las aplicaciones, especialmente en aplicaciones continuas. Si la temperatura ambiente es inferior a -10 °C (14 °F), caliente el aceite antes de la operación. Hay que mantener el aceite a una temperatura superior a los -10 °C (14 °F) durante la operación. Si la temperatura ambiente está por debajo de -10 °C (14 °F), siga los procedimientos indicados en el Manual de Operación y Mantenimiento, "Calentamiento y asentamiento del diferencial" antes de la operación. Si la temperatura ambiente es inferior a -25 °C (-13 °F) (por debajo de -35 °C (-31 °F) para el FDAO SYN Cat), pida instrucciones a su distribuidor Caterpillar. Si no se calienta el aceite antes de operar la máquina, se pueden causar daños en la misma.

Nota. Especificaciones del lubricante recomendadas por el fabricante para camiones mineros CAT 797F. Reproducida del manual de operación y mantenimiento, Recomendaciones de viscosidades de lubricantes a temperaturas ambiente (exteriores) para camiones de obras, (Caterpillar Inc., 2009)

Como se puede observar en la Figura 51, el lubricante que se viene utilizando de base mineral Mobiltrans HD60TM cumple con las especificaciones requeridas, pero no se consigue una extensión de vida útil del lubricante a la frecuencia de mantenimiento establecida.

Figura 51
Especificación Lubricante Mineral en Uso

Mobiltrans HD Series atiende o excede los requerimientos de:	10W	30	50	60
Caterpillar TO-4	X	X	X	X

Nota. Especificación del fabricante de la familia de lubricantes minerales Mobiltrans TM. Reproducida de la ficha técnica de lubricantes Mobil TM, (Mobil TM, 2017)

a Selección del lubricante según recomendación del OEM

La transmisión final de este tipo de equipos todoterreno está expuesta a cargas elevadas y diversos tipos de contaminación (agua y tierra), incluso en carreteras en mal

estado con pendientes muy pronunciadas (10° o más) que ejercen una gran presión sobre los engranajes.

Uno de los principales propósitos del mantenimiento es extender la vida útil de estos costosos componentes. Por lo tanto, todos sabemos que el reemplazo de estos componentes no tiene que ocurrir con mucha frecuencia. La especificación tradicional mencionada para los mandos finales es CAT TO-4, que requiere que el aceite contenga aditivos de alta calidad para lograrlo. También cabe mencionar que estos aceites son comercializados por varios fabricantes con viscosidades de la clase SAE 50 y con el tiempo esta viscosidad ha demostrado no ser suficiente para soportar cargas elevadas.

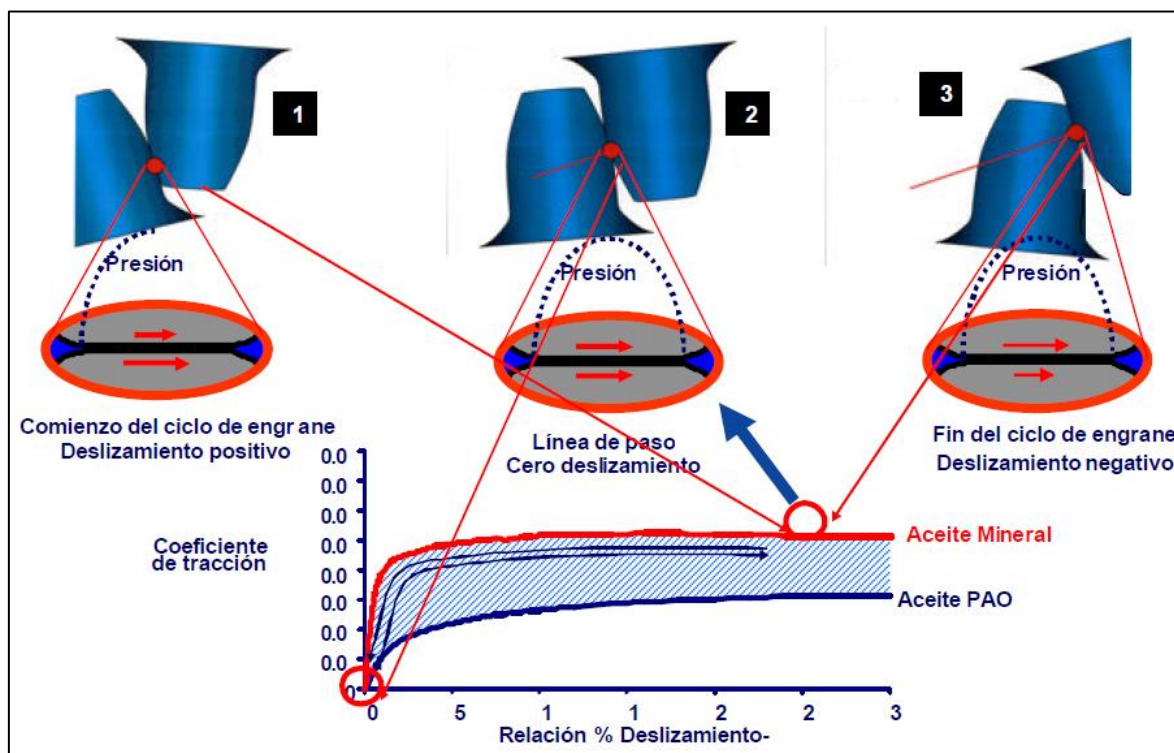
La absorción de carga está relacionada con los aditivos, pero desde que el fabricante de lubricantes MobilTM introdujo los aceites para mandos finales en el mercado local hace muchos años, las películas lubricantes han mejorado la absorción de carga y han reducido el desgaste de los componentes. La clase de viscosidad SAE 60 (Mobiltrans HD 60TM) también es de calidad TO-4 y cumple las funciones anteriores.

Sin embargo, las demandas de los proyectos mineros siguen siendo muy altas, lo que requiere el desarrollo de nuevas formulaciones de aceite que excedan las especificaciones anteriores para lograr el objetivo de extender la vida útil de los componentes y así satisfacer un mercado cada vez más exigente, por lo que se han desarrollado nuevos lubricantes que van más allá de las especificaciones TO-4:

- Mayor protección al micropitting de los engranajes.
- Mayor vida útil de los rodamientos.
- Mayor protección de las piezas.
- Mayor resistencia a la herrumbre.
- Mayor soporte de carga que la especificación TO-4.

Se trata de aceites base sintéticos (PAO - polialfaolefina) que cumplen la nueva especificación CAT FD-1. Cuando use este lubricante, no lo use en mandos finales que contengan materiales de fricción, cámaras de embrague o frenos húmedos.

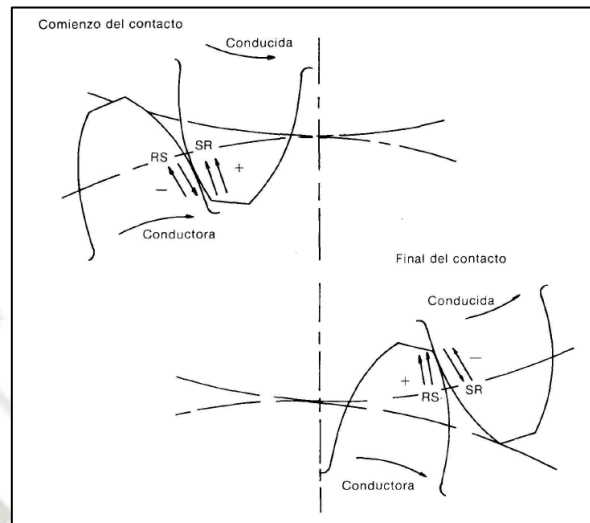
Estos lubricantes son compatibles con los aceites clasificados TO-4 y están recomendados hasta 6.000 horas de uso según fichas técnicas. Recuerde también que dializar el aceite minimiza la contaminación por desgaste.

Figura 52
Tipos de Deslizamiento en Dientes de Engranaje


Nota. Diagrama representativo del deslizamiento en el ciclo de engrane de los dientes en los engranajes y el gráfico del coeficiente de fricción del lubricante mineral y sintético. Reproducida de los consejos Mobil TM.

Como podemos observar en la Figura 52 y Figura 53, los engranajes tienen una gran cantidad de deslizamiento (deslizamiento positivo) al comienzo del contacto de los dientes, y la relación de deslizamiento disminuye gradualmente hasta que alcanza la línea de paso y se vuelve cero. El deslizamiento aumenta de nuevo a medida que avanza el acoplamiento y, finalmente, alcanza el deslizamiento máximo (deslizamiento negativo) cuando los dientes se separan.

El deslizamiento siempre está fuera de la línea de paso de cualquier impulsor o diente impulsor. En otras palabras, la dirección de movimiento del diente conducido o del diente impulsor está siempre fuera de la línea de paso (RS-) de dicho diente. Por el contrario, el arrastre sobre el diente conducido o la superficie del diente conducido o la dirección de movimiento del diente conducido es siempre en la dirección de la línea de paso del diente conducido o del diente impulsor (SR-).

Figura 53
Movimientos en el Engrane


Nota. Diagrama representativo de la dirección del deslizamiento al comienzo y final del contacto entre dientes de un engranaje. Reproducida del informe sobre fallas en los engranajes, (Benitez Hernandez)

Por otro lado, el estado de rotación permanece constante desde el principio hasta el final del engranaje, y los dientes del impulsor o impulsor siempre giran en la misma dirección. Es decir, desde la punta hasta la raíz de la superficie del cuerpo conducido o conducida. dientes. (SR+). Por el contrario, los dientes del engranaje de salida o conducido siempre giran desde la raíz hasta la punta (RS+) en el piñón de entrada o en los flancos de los dientes del piñón de entrada.

La dirección de deslizamiento y rodadura no debe confundirse con la dirección de desplazamiento del contacto. La línea de contacto es siempre desde la raíz hasta la punta del diente impulsor o impulsor y desde la punta hasta la raíz del diente impulsor o impulsor. Cuando dos dientes engranan, se forma una película lubricante al rodar y deslizarse.

Los aceites sintéticos poseen una excelente capacidad de trabajo a muy altas y bajas temperaturas, con una resistencia a la oxidación sobresaliente, así como su protección contra el desgaste; con dichas características mencionadas podemos contar con el Mobil Delvac 1 FDAO, este tipo de lubricante sintético puede tener un mejor desempeño en condiciones de trabajo exigentes, el cual cumple con las especificaciones del fabricante CAT FD-1 como se muestra en la siguiente Figura 54.

Figura 54
Especificación de Lubricante Sintético Propuesto

Aceite Sintético Mobil Delvac™ para Transmisiones Finales y Ejes
CAT FD-1

Nota. Especificación del lubricante recomendado por el fabricante para camiones mineros CAT 797F. Reproducida de la ficha técnica de lubricantes Mobil™, 2020, (Mobil™, 2020)

3.10. Programa de muestras de aceite

Tabla 9
Programa de Muestreo y Dializado

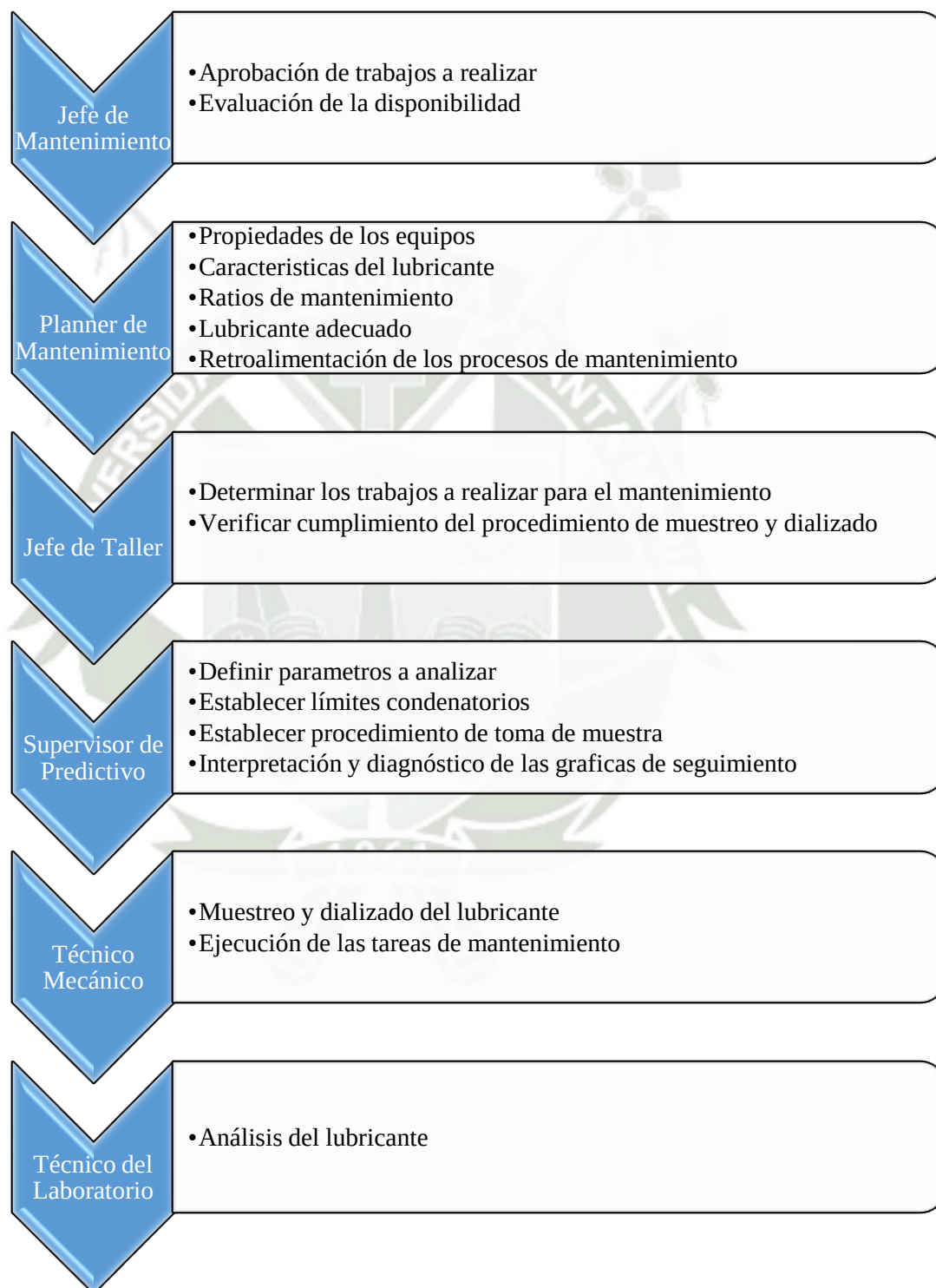
<i>Horas del aceite</i>	<i>Tareas de seguimiento</i>	<i>Horas del aceite</i>	<i>Tareas de seguimiento</i>
250	Muestreo	2750	Muestreo
500	Muestreo y Dializado	3000	Muestreo y Dializado
750	Muestreo	3250	Muestreo
1000	Muestreo y Dializado	3500	Muestreo y Dializado
1250	Muestreo	3750	Muestreo
1500	Muestreo y Dializado	4000	Muestreo y Dializado
1750	Muestreo	4250	Muestreo
2000	Muestreo y Dializado	4500	Muestreo y Dializado
2250	Muestreo	4750	Muestreo
2500	Muestreo y Dializado	5000	Muestreo y Dializado

Nota. Programa de muestreo y dializado establecido de acuerdo a las horas de operación del lubricante en el componente desde las 250 horas hasta las 5000 horas.

a Diagrama de responsabilidades

Figura 55

Diagrama de Responsabilidades



Nota. Diagrama de flujo sobre las responsabilidades de cada posición laboral dentro de las actividades de mantenimiento.

b Procedimiento de muestreo y dializado del lubricante

Es importante elegir el método de muestreo del lubricante y la herramienta utilizada para recolectar la muestra. Estos deben tomarse del mismo lugar y usar el mismo procedimiento para reflejar la condición actual del lubricante y los componentes. Como se mencionó anteriormente, la obtención de muestras de aceite representativas tiene dos propósitos principales de acuerdo a Noria Latín América (2021).

El primer objetivo es maximizar la densidad de información. El muestreo debe hacerse de tal manera que proporcione la mayor cantidad de información posible por mililitro de aceite.

Un segundo objetivo es minimizar la distorsión de la información. Las muestras deben tomarse de manera que la concentración de información sea uniforme, consistente y representativa. Es importante asegurarse de que las muestras no se contaminen durante el proceso de muestreo.

Para garantizar una buena densidad de datos y minimizar el desorden de datos al tomar muestras de aceite, se debe considerar el método de muestreo, el equipo de muestreo y la ubicación del muestreo.

Se seleccionó para la investigación un método de muestreo de la línea de circulación de baja presión antes del filtro diferencial. Este es el método utilizado cuando el componente está lubricado a presión y tiene una válvula de muestreo. Este método utiliza los siguientes elementos: bomba de vacío, manguera de Ø 3/16 de pulgada con acoplamiento rápido, botella de PVC, etiqueta de identificación.

Figura 56

Kit de Muestreo del Lubricante



Nota. Kit de muestreo compuesta por una bomba de vacío, manguera, toma rápida de conexión y frasco de recepción de muestra. Reproducida del manual de operación y mantenimiento, (Caterpillar Inc., 2009)

Como referencia para nuestra investigación se tomó los procedimientos para la toma de muestra de lubricantes del manual de operación y mantenimiento de Caterpillar Inc. (2009) para los componentes investigados, así como los procedimientos para el adecuado dializado del lubricante, cuidando la limpieza de las muestras. A continuación, se muestra los procedimientos para la toma de muestra del diferencial:

- **Muestra de lubricante del diferencial**



ADVERTENCIA

El aceite caliente y los componentes calientes pueden producir lesiones personales. No permita que el aceite o los componentes calientes toquen la piel.

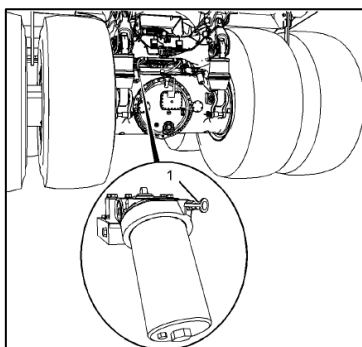
Nota: Para tener acceso a la válvula de muestreo del aceite de diferencial y del mando final, es posible que sea necesario utilizar un sistema de acceso portátil (escalerilla, conjunto de escaleras, elevador u otro sistema de acceso portátil) que sea adecuado y que cumpla con las regulaciones locales.

Obtenga las muestras lo más cerca posible del intervalo de muestreo recomendado. Para aprovechar todas las ventajas del análisis, se debe establecer una tendencia de datos coherente para establecer un historial de datos significativo, tome muestras uniformes y en intervalos regulares.

1. Prepare la máquina para el mantenimiento.
2. Obtenga la muestra de aceite del diferencial a través de la válvula de muestreo (1) ubicada en la base del filtro de aceite. Tome la muestra de aceite cuando la bomba de lubricación del eje trasero esté operando como se observa en la Figura 57.
3. Envíe la muestra para hacer el análisis en el laboratorio local.

Figura 57

Punto de Muestreo del Diferencial



Nota. Diagrama de ubicación del punto de muestreo del diferencial. Reproducida del manual de operación y mantenimiento, (Caterpillar Inc., 2009)

- **Dializado de lubricante del diferencial**



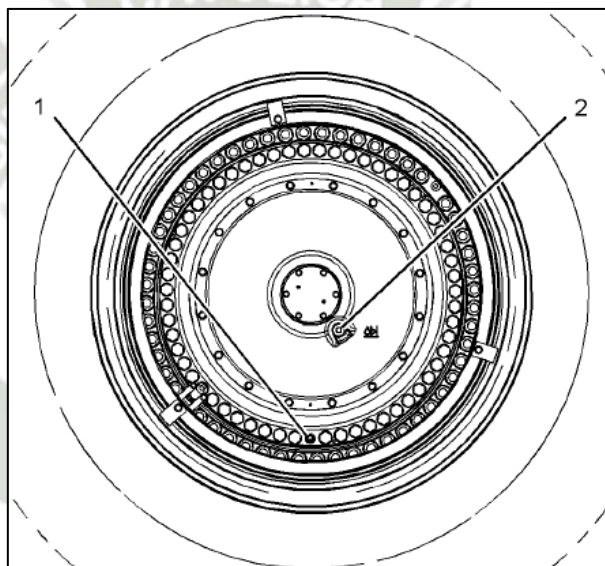
ADVERTENCIA

*El aceite caliente y los componentes calientes pueden producir lesiones personales.
No permita que el aceite o los componentes calientes toquen la piel.*

1. Gire las ruedas de modo que el tapón del drenaje (1) esté en la posición más baja en la rueda trasera como se observa en la Figura 58.

Figura 58

Punto de Conexión de Mangueras



Nota. Diagrama de ubicación del punto de conexión de las mangueras del dializador. Reproducida del manual de operación y mantenimiento, (Caterpillar Inc., 2009)

Nota: Cerciórese de que se contengan los fluidos durante la inspección, mantenimiento, pruebas, ajustes y reparación del producto. Esté preparado para recoger el fluido en un recipiente adecuado antes de abrir un compartimiento o desarmar un componente que contenga fluidos.

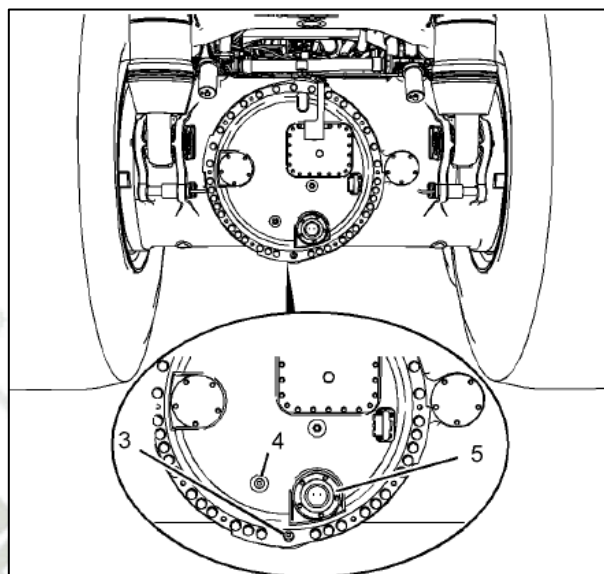
2. Quite el tapón magnético de drenaje (1) del mando final. Controle el aceite que pueda derramarse en un recipiente adecuado e instale la manguera de alimentación del dializador.

3. Inspeccione el tapón de drenaje magnético del mando final. Sí, se encuentran partículas anormales.

4. Limpie el área alrededor del tapón del drenaje, así como el tapón de drenaje.

Figura 59

Punto de Conexión de Manguera

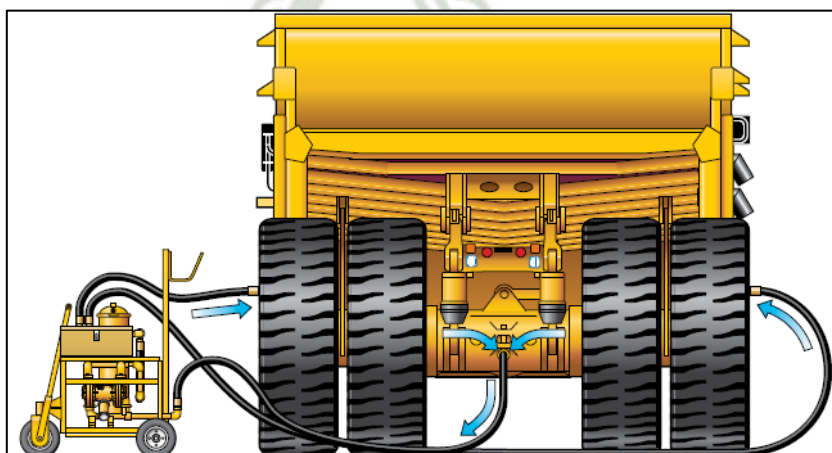


Nota. Diagrama de ubicación del punto de conexión de las mangueras del dializador. Reproducida del manual de operación y mantenimiento, (Caterpillar Inc., 2009)

5. Saque el tapón magnético de drenaje (3) ubicada en la Figura 59 y controle el aceite del diferencial que pueda derramarse en un recipiente adecuado e instale la manguera de succión del dializador.
6. Revise el tapón de drenaje magnético y el tapón magnético (4) del diferencial. Sí, se encuentran partículas anormales.
7. Limpie el área alrededor del tapón del drenaje, así como el tapón de drenaje.

Figura 60

Flujo del Lubricante con el Dializador



Nota. Diagrama del flujo del lubricante a través del dializador. Reproducida del manual de operación y mantenimiento, (Ferreyros, 2015)

8. Verificar el correcto sentido de flujo del lubricante, así como la temperatura adecuada para la circulación del mismo.

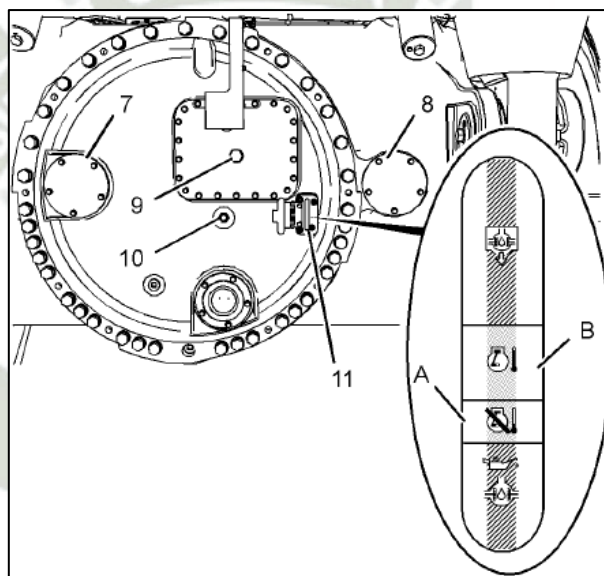
Nota: El dializador no operará cuando la temperatura del aceite esté por debajo de -4°C (25°F).

9. Energizar el dializador por un periodo de 3 horas para realizar la limpieza de lubricante por medio de los filtros instalados en el dializador de 3 y 6 μm .

10. Desinstalar mangueras conectadas y colocar los tapones correspondientes, luego verificar nivel del lubricante como se observa en la Figura 61 en el nivel B.

Figura 61

Mirilla de Nivel



Nota. Diagrama de ubicación de la mirilla del nivel de lubricante en el diferencial. Reproducida del manual de operación y mantenimiento, (Caterpillar Inc., 2009)

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Extensión del drenado de lubricante

La extensión de los periodos de drenado de lubricante se recomienda siempre y cuando los valores del lubricante estén dentro de los límites permisibles, el nivel de desgaste se mantenga constante y no genere variación de tasa de desgaste, los contaminantes no excedan los máximos permisibles y los aditivos no se hayan degradado en el tiempo establecido por la minera, para verificar el estado de desempeño del lubricante, se utilizará los límites establecidos a 5000 horas descritos en la Tabla 10, tomando como referencia los límites recomendados por el OEM a 4000 horas, con el siguiente proceso:

- Toma de la muestra
- Se documenta la muestra y anota los detalles más relevantes de la unidad
- Se envía la muestra a laboratorio
- Se realiza el análisis
- Se interpreta los resultados
- Se emite un diagnóstico
- Se toma acciones de acuerdo a los resultados

Tabla 10

Límites de Desgaste a 5000 Horas

<i>Elemento</i>	<i>Límites (ppm)</i>
Cobre	109
Fierro	55
Cromo	4
Aluminio	4
Plomo	14
Silicio	12
Titanio	6

Nota. Límites establecidos por la minera para 5000 horas de operación del lubricante en partículas por millón (ppm) en el diferencial del camión minero CAT 797F. Basado en los límites del fabricante para 4000 horas de operación del lubricante Figura 45.

4.2. Resultados del análisis de lubricante mineral en el camión CA36

Tabla 11

Resultados del Análisis - Salud del Lubricante Mineral

Producto Usado	Mobiltrans HD60™														
Nro. de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Horas del aceite	668	461	1245	1748	2341	2684	740	1031	310	331	347	264	603	763	1009
Viscosidad a 100 °C (mm ² /s)	25,2	24,67	26,33	26,36	27,38	28,01	25,98	26,56	26,22	26,08	22,57	22,75	24,58	23,78	23,94
Oxidación (abs/0,1 mm)	0	2,6	4,1	3,5	5,5	6,5	3,7	3,7	0,1	0,2	0	0	0	0	0
Boro (mg/kg)	2	3	2	1	2	2	1	1	0	1	0	0	1	1	2
Magnesio (mg/kg)	10	11	11	12	11	16	11	12	10	10	11	12	11	10	11
Calcio (mg/kg)	1958	2257	2133	2713	2139	2493	2317	2552	2303	2111	2493	2539	2196	1982	2205
Zinc (mg/kg)	1022	1097	1047	1217	1062	1157	1209	1114	1131	1334	1165	1192	1209	1240	1101
Fósforo (mg/kg)	776	932	795	320	1049	718	852	863	737	849	967	806	820	835	890

Nota. Se tomaron 15 muestras como parámetro de comparación antes de la migración. Equivalencias de las unidades expresadas mm²/s = cSt, mg/Kg = ppm.

Tabla 12

Resultados del Análisis - Contaminación del Lubricante Mineral

Producto Usado	Mobiltrans HD60™														
N° de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Horas del aceite	668	461	1245	1748	2341	2684	740	1031	310	331	347	264	603	763	1009

Agua (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	22	19	8	13	25	0	0	0	0
Potasio (mg/Kg)	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1
Silicio (mg/Kg)	8	10	7	6	6	5	5	6	6	8	7	5	7	5	6
Sodio (mg/Kg)	2	3	3	4	4	4	3	4	2	2	3	3	3	3	3
ISO 4406 > 4 um	18	24	24	23	24	20	19	23	24	25	24	22	23	21	24
ISO 4406 > 6 um	13	22	21	20	21	18	14	20	21	23	21	20	20	17	21
ISO 4406 > 14 um	12	18	14	12	17	14	12	12	14	12	17	11	12	12	12

Nota. Se tomaron 15 muestras como parámetro de comparación antes de la migración. Equivalencias de las unidades expresadas mm^2/s = cSt, mg/Kg = ppm.

Tabla 13

Resultados del Análisis - Desgaste del Lubricante Mineral

Producto Usado	Mobiltrans HD60™														
Nº de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Horas del aceite	668	461	1245	1748	2341	2684	740	1031	310	331	347	264	603	763	1009
Fierro (mg/Kg)	13	23	29	26	32	35	34	49	21	39	34	13	17	17	21
Cromo (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Plomo (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3
Cobre (mg/Kg)	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	7	13	29
Estaño (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
Aluminio (mg/Kg)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Índice PQ	0	22,4	23,2	20,4	15,6	21	14,2	23	13	35,6	19,6	4,4	6	5,4	9,4
Tasa de desgaste Fierro	0,01946	0,04989	0,02329	0,01487	0,01367	0,01304	0,04595	0,04753	0,06774	0,11782	0,09798	0,04924	0,02819	0,02228	0,02081
Tasa de desgaste Cobre	0,00150	0,00217	0,00000	0,00057	0,00043	0,00037	0,00135	0,00097	0,00000	0,00000	0,00288	0,00379	0,01161	0,01704	0,02874

Nota. Se tomaron 15 muestras como parámetro de comparación antes de la migración. Equivalencias de las unidades expresadas mm^2/s = cSt, mg/Kg = ppm.

4.3. Resultados del análisis de lubricante sintético en el camión CA36

Tabla 14

Resultados del Análisis - Salud del Lubricante Sintético

Producto Usado	Mobil Delvac 1 FDAO™																				
Nro. de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Horas del aceite	202	249	432	642	765	937	1054	1257	1642	1747	2002	2277	2334	2571	2915	3138	3632	3862	4582	4622	4825
Viscosidad a 100 °C (mm ² /s)	31,12	31,3	30,76	30,69	29,59	30,13	30,12	30,47	30,85	30,23	30,08	30,96	30,87	30,62	30,18	29,82	30,76	30,98	30,85	30,22	31,07
Oxidación (abs/0,1 mm)	2,8	2,8	3	3,1	3,1	3,2	3,5	3,3	3,7	3,8	4	4	4,2	4,3	4,5	5,2	6,1	6,2	7,1	7,1	7,4
Boro (mg/kg)	56	56	60	59	63	52	57	49	47	53	56	45	59	54	54	61	60	57	60	66	61
Magnesio (mg/kg)	4	4	5	4	4	4	4	3	4	5	4	3	4	4	4	4	4	4	4	5	4
Calcio (mg/kg)	426	407	475	565	488	522	468	454	469	482	440	445	751	549	463	449	494	673	491	512	443
Zinc (mg/kg)	230	227	235	241	245	222	220	225	223	220	224	218	244	232	231	223	240	239	218	228	213
Fósforo (mg/kg)	341	352	327	382	368	324	386	273	267	393	546	223	371	382	279	413	372	342	376	361	365

Nota. Se tomaron 21 muestras como parámetro de control después de la migración. Equivalencias de las unidades expresadas mm²/s = cSt, mg/Kg = ppm.

Tabla 15

Resultados del Análisis - Contaminación del Lubricante Sintético

Producto Usado	Mobil Delvac 1 FDAO™																				
Nº de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Horas del aceite	202	249	432	642	765	937	1054	1257	1642	1747	2002	2277	2334	2571	2915	3138	3632	3862	4582	4622	4825
Agua (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Potasio (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Silicio (mg/Kg)	2	3	3	3	3	2	2	2	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4

Sodio (mg/Kg)	3	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3	4	4	3	3	3	4	4	4	3
ISO 4406 > 4 um	21	21	20	21	23	19	17	21	22	20	17	18	19	16	19	20	15	17	20	16	20
ISO 4406 > 6 um	16	17	14	15	21	13	14	17	21	17	15	15	18	12	13	17	13	15	16	13	17
ISO 4406 > 14 um	12	12	9	10	17	12	10	12	17	12	10	10	14	9	12	13	12	10	12	9	14

Nota. Se tomaron 21 muestras como parámetro de control después de la migración. Equivalencias de las unidades expresadas mm^2/s = cSt, mg/Kg = ppm.

Tabla 16

Resultados del Análisis - Desgaste del Lubricante Sintético

Producto Usado	Mobil Delvac 1 FDAO™																				
N° de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Horas del aceite	202	249	432	642	765	937	1054	1257	1642	1747	2002	2277	2334	2571	2915	3138	3632	3862	4582	4622	4825
Fierro (mg/Kg)	6	6	10	11	12	11	12	12	14	17	21	19	24	24	28	33	40	41	47	55	55
Cromo (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plomo (mg/Kg)	0	0	1	1	1	1	1	3	3	4	3	2	4	4	0	2	6	6	6	6	5
Cobre (mg/Kg)	10	11	15	18	18	19	21	22	28	30	32	33	39	37	41	44	48	48	50	56	50
Estaño (mg/Kg)	2	2	3	2	2	2	3	2	1	2	2	1	5	3	4	4	4	4	4	6	5
Aluminio (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Índice PQ	2,8	1,8	1,2	5,6	7,4	4,2	5,4	6,4	8,6	7,2	7,4	10,6	9,2	10,8	10,6	11,6	12,2	12,6	15,4	15,4	15,4
Tasa de desgaste Fierro	0,0297	0,0241	0,0231	0,0171	0,0156	0,0117	0,0113	0,0095	0,0085	0,0097	0,0104	0,0083	0,0102	0,0093	0,0096	0,0105	0,0110	0,0106	0,0102	0,0118	0,0114
Tasa de desgaste Cobre	0,0495	0,0441	0,0347	0,0280	0,0235	0,0202	0,0199	0,0175	0,0170	0,0171	0,0159	0,0144	0,0167	0,0143	0,0140	0,0140	0,0132	0,0124	0,0109	0,0121	0,0103

Nota. Se tomaron 21 muestras como parámetro de control después de la migración. Equivalencias de las unidades expresadas mm^2/s = cSt, mg/Kg = ppm.

4.4. Resultados del análisis de lubricante mineral en el camión CA37

Tabla 17

Resultados del Análisis - Salud del Lubricante Mineral

Producto Usado	Mobiltrans HD60™																
Nro. de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Horas del aceite	229	692	199	277	289	293	1	4	22	253	422	847	861	1855	2305	314	607
Viscosidad a 100 °C (mm ² /s)	25,04	25,35	27,31	27,52	27,12	27	26,01	26,63	27,07	26,13	26,11	25,89	25,87	25,64	26,11	25,54	25,94
Oxidación (abs/0,1 mm)	1,5	2,7	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	1,5	1,5	0	0
Boro (mg/kg)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Magnesio (mg/kg)	10	9	11	10	10	6	9	9	9	9	9	9	9	9	9	15	16
Calcio (mg/kg)	2780	2354	2191	2408	2516	161	1489	1416	1459	2426	2056	2250	2243	2419	2073	2120	2136
Zinc (mg/kg)	1274	1024	1154	1164	1127	0	835	821	829	1128	1101	1210	1215	1137	1124	1265	1264
Fósforo (mg/kg)	827	866	739	779	852	991	911	840	810	1008	579	866	874	728	767	897	891

Nota. Se tomaron 17 muestras como parámetro de comparación antes de la migración. Equivalencias de las unidades expresadas mm²/s = cSt, mg/Kg = ppm.

Tabla 18

Resultados del Análisis - Contaminación del Lubricante Mineral

Producto Usado	Mobiltrans HD60™																
Nº de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Horas del aceite	229	692	199	277	289	293	1	4	22	253	422	847	861	1855	2305	314	607
Agua (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0
Potasio (mg/Kg)	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Silicio (mg/Kg)	6	6	8	7	7	3	9	8	8	12	8	12	13	10	10	8	7

Sodio (mg/Kg)	2	2	2	2	2	0	3	3	2	3	2	3	3	3	3	3	
ISO 4406 > 4 um	21	21	24	25	26	27	24	21	18	21	22	22	23	19	20	18	22
ISO 4406 > 6 um	20	17	21	23	24	25	21	18	16	15	19	20	17	17	17	15	20
ISO 4406 > 14 um	16	12	11	17	17	18	14	9	12	12	14	16	12	15	12	10	16

Nota. Se tomaron 17 muestras como parámetro de comparación antes de la migración. Equivalencias de las unidades expresadas mm²/s = cSt, mg/Kg = ppm.

Tabla 19

Resultados del Análisis - Desgaste del Lubricante Mineral

Producto Usado	Mobiltrans HD60™																
N° de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Horas del aceite	229	692	199	277	289	293	1	4	22	253	422	847	861	1855	2305	314	607
Fierro (mg/Kg)	23	31	15	20	28	42	6	5	2	13	11	19	22	30	41	12	14
Cromo (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plomo (mg/Kg)	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
Cobre (mg/Kg)	1	2	1	2	2	1	0	0	0	0	1	1	1	2	2	1	1
Estaño (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aluminio (mg/Kg)	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Índice PQ	15,8	24,2	13,2	56,8	59	145,6	7,2	5,2	3,2	9,8	14,2	10,8	12,2	0	21,4	6,4	15,2
Tasa de desgaste Fierro	0,10044	0,04480	0,07538	0,07220	0,09689	0,14334	6,00000	1,25000	0,09091	0,05138	0,02607	0,02243	0,02555	0,01617	0,01779	0,03822	0,02306
Tasa de desgaste Cobre	0,00437	0,00289	0,00503	0,00722	0,00692	0,00341	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00237	0,00118	0,00116	0,00108	0,00087	0,00318	0,00165

Nota. Se tomaron 17 muestras como parámetro de comparación antes de la migración. Equivalencias de las unidades expresadas mm²/s = cSt, mg/Kg = ppm.

4.5. Resultados del análisis de lubricante sintético en el camión CA37

Tabla 20

Resultados del Análisis - Salud del Lubricante Sintético

Producto Usado	Mobil Delvac 1 FDAO™																								
N° de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Horas del aceite	92	262	437	632	750	903	1048	1215	1478	1781	1805	2013	2309	2642	2954	3104	3125	3551	3676	3951	4561	4683	4750	5038	5193
Viscosidad a 100 °C (mm ² /s)	32,11	30,8	31,55	29,41	29,86	31,83	31,14	31,12	31,45	30,19	31,22	31,05	31,39	29,46	30,6	29,16	30,62	30,87	30,76	30,49	30,62	30,25	30,35	30,53	29,81
Oxidación (abs/0,1mm)	3	3,2	3,2	3,4	3,5	3,5	3,3	3,5	3,6	3,9	3,9	3,8	3,9	4,1	4,2	4,4	4,4	4,7	4,7	5	5,5	5,6	5,6	5,8	4,9
Boro (mg/Kg)	66	62	67	67	67	59	55	60	50	55	59	58	57	61	60	60	60	62	62	59	50	60	67	62	66
Magnesio (mg/Kg)	5	5	4	5	5	4	5	4	4	4	4	5	5	4	4	4	4	5	4	4	4	5	5	4	4
Calcio (mg/Kg)	320	333	414	416	419	363	416	429	405	451	468	441	753	432	415	424	388	450	417	445	410	442	485	428	459
Zinc (mg/Kg)	171	174	170	179	169	201	180	194	173	180	216	212	225	198	207	202	186	200	191	196	185	191	200	198	190
Fosforo (mg/Kg)	316	329	286	323	364	237	294	311	251	319	265	385	356	374	347	397	391	394	372	295	214	310	317	289	335

Nota. Se tomaron 25 muestras como parámetro de control después de la migración. Equivalencias de las unidades expresadas mm²/s = cSt, mg/Kg = ppm.

Tabla 21

Resultados del Análisis - Contaminación del Lubricante Sintético

Producto Usado	Mobil Delvac 1 FDAO™																								
N° de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Horas del aceite	92	262	437	632	750	903	1048	1215	1478	1781	1805	2013	2309	2642	2954	3104	3125	3551	3676	3951	4561	4683	4750	5038	5193
Agua (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Potasio (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Silicio (mg/Kg)	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	5
Sodio (mg/Kg)	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	3	4	4	4	3	4	4	3	3	3	3	3	4	3	4
ISO 4406 > 4 um	18	19	19	20	19	22	19	21	18	20	20	18	21	18	21	21	21	18	17	18	19	18	25	20	22
ISO 4406 > 6 um	15	17	17	17	17	21	14	18	17	17	18	14	19	16	19	18	19	11	9	16	17	12	23	17	19
ISO 4406 > 14 um	10	12	10	11	13	16	11	11	13	12	11	12	15	12	15	11	15	10	5	12	13	11	16	11	13

Nota. Se tomaron 25 muestras como parámetro de control después de la migración. Equivalencias de las unidades expresadas mm²/s = cSt, mg/Kg = ppm.

Tabla 22

Resultados del Análisis - Desgaste del Lubricante Sintético

Producto Usado	Mobil Delvac 1 FDAO™																								
N° de Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Horas del aceite	92	262	437	632	750	903	1048	1215	1478	1781	1805	2013	2309	2642	2954	3104	3125	3551	3676	3951	4561	4683	4750	5038	5193
Fierro (mg/Kg)	4	5	9	8	10	11	10	13	12	16	18	20	23	27	29	30	26	33	34	36	37	44	49	47	50
Cromo (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plomo (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Cobre (mg/Kg)	0	0	1	1	1	1	1	3	3	3	6	6	6	6	7	6	6	6	6	7	9	12	12	12	12
Estaño (mg/Kg)	2	1	2	2	1	1	1	1	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	1	2	3	2
Aluminio (mg/Kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Índice PQ	2	3	3,6	5,8	5	5,2	5,2	4,8	5,4	6	8,2	7,8	7	8,6	9,2	11	9,6	14,2	12,2	10,6	18,6	17	16	14	18,6
Tasa de desgaste Fierro	0,0434	0,0190	0,0205	0,0126	0,0133	0,0121	0,0095	0,0107	0,0081	0,0089	0,0099	0,0099	0,0099	0,0102	0,0098	0,0096	0,0083	0,0092	0,0092	0,0091	0,0081	0,0093	0,0103	0,0093	0,0096
Tasa de desgaste Cobre	0,0000	0,0000	0,0022	0,0015	0,0013	0,0011	0,0009	0,0024	0,0020	0,0016	0,0033	0,0029	0,0026	0,0022	0,0023	0,0019	0,0019	0,0016	0,0016	0,0017	0,0019	0,0025	0,0025	0,0023	0,0023

Nota. Se tomaron 25 muestras como parámetro de control después de la migración. Equivalencias de las unidades expresadas mm²/s = cSt, mg/Kg = ppm.

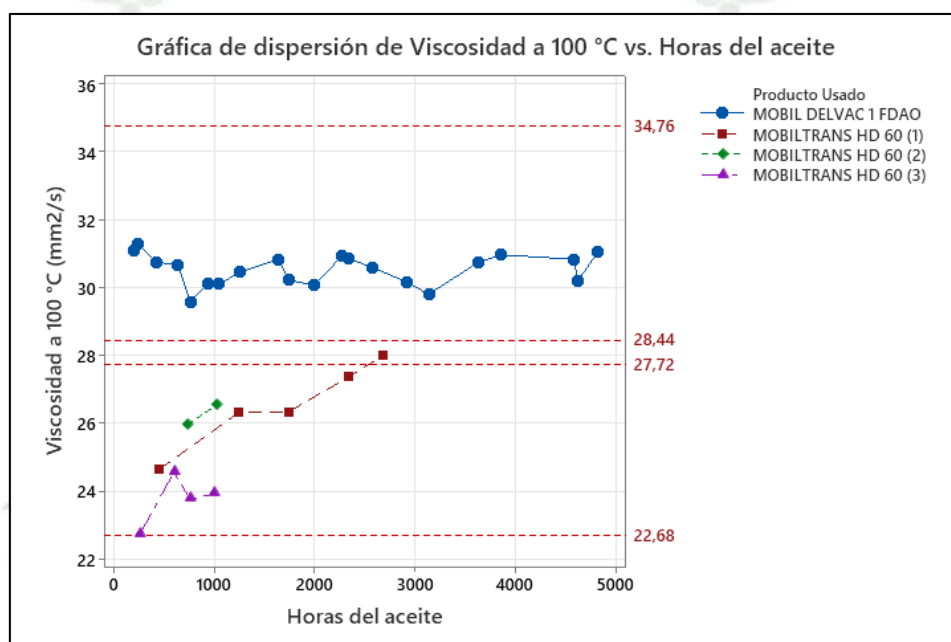
4.6. Graficas de seguimiento e interpretación

Los resultados del análisis de lubricantes se convierten en gráficos que monitorean la salud, la contaminación y el desgaste para que se pueda observar tendencias en los resultados y establecer límites de tolerancia.

a Salud

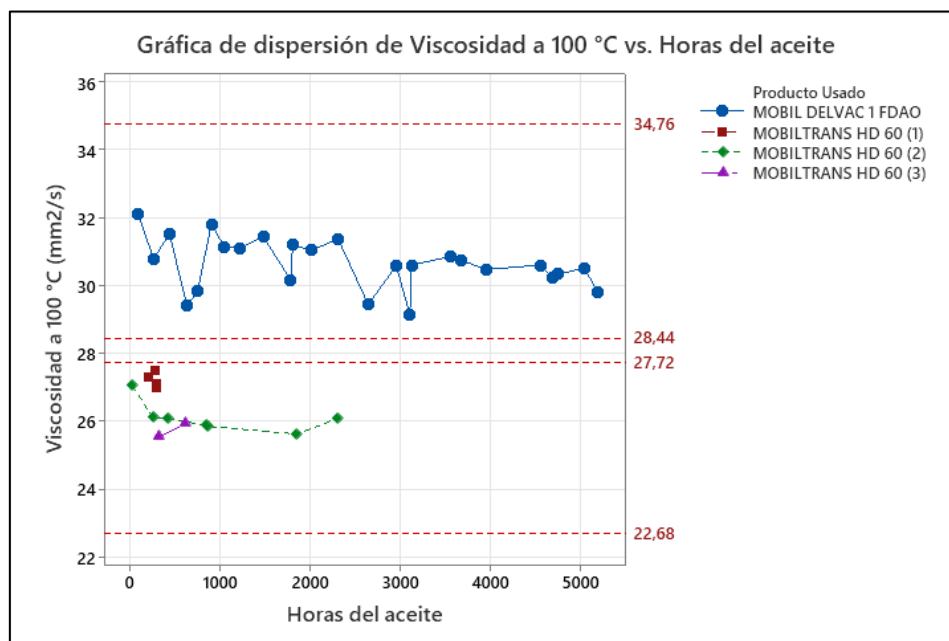
Figura 62

Comportamiento de la Viscosidad - CA36



Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAO™ (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60™ (lubricante mineral); los límites se establecen en un rango de $\pm 10\%$ de la línea base (lubricante nuevo), para el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

En la Figura 62 se puede observar el desempeño de los dos productos lubricantes; con el lubricante mineral Mobiltrans HD60™ (1) se presenta una variación de la viscosidad elevada debido a la contaminación prematura que se presenta en el sistema del lubricante a medida que va aumentando el número de hora de operación, esto trae como consecuencia un desgaste acelerado de las superficies metálicas. El límite superior de control corresponde a 27,72 cSt y el límite inferior de control 22,68 cSt.

Figura 63
Comportamiento de la Viscosidad - CA37


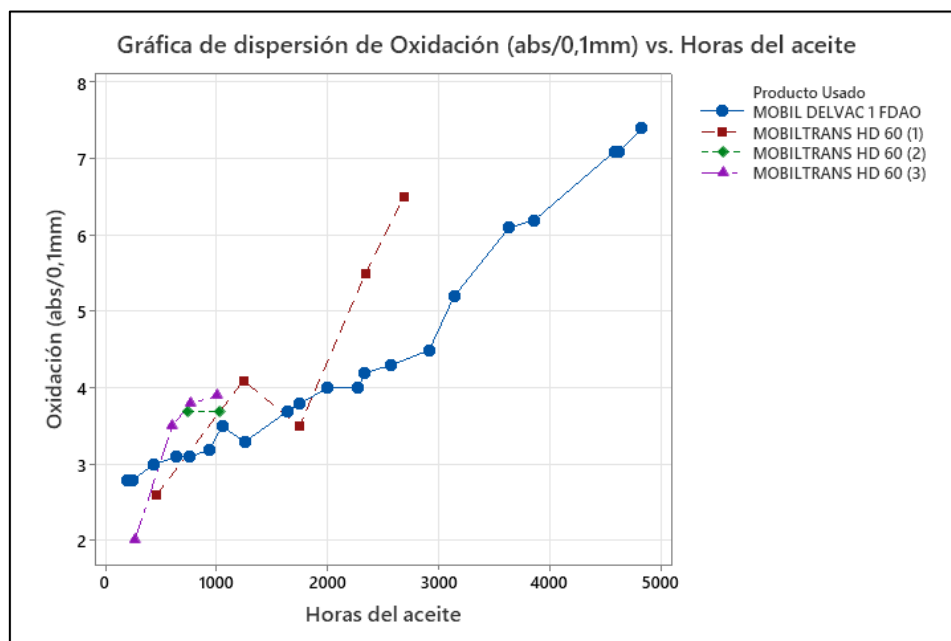
Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAO™ (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60™ (lubricante mineral); los límites se establecen en un rango de $\pm 10\%$ de la línea base (lubricante nuevo), para el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

Con la migración al producto lubricante sintético Mobil Delvac 1 FDAO™ en las primeras muestras presentan una disminución progresiva de la viscosidad, pero sin una variación drástica; en lo que va aumentando el número de horas de operación la viscosidad se normaliza. Este resultado nos demuestra la estabilidad que mantiene el lubricante sintético hasta las 5000 horas de operación. El límite superior de control corresponde a 34,76 cSt y el límite inferior de control 28,44 cSt.

En la Figura 63 notamos que en uno de los cambios con el lubricante mineral Mobiltrans HD60™ (1) los resultados de la viscosidad están cerca a los límites superiores, esto debido al ingreso de partículas contaminantes como se verá reflejado en las siguientes Figuras 70 y 71.

Figura 64

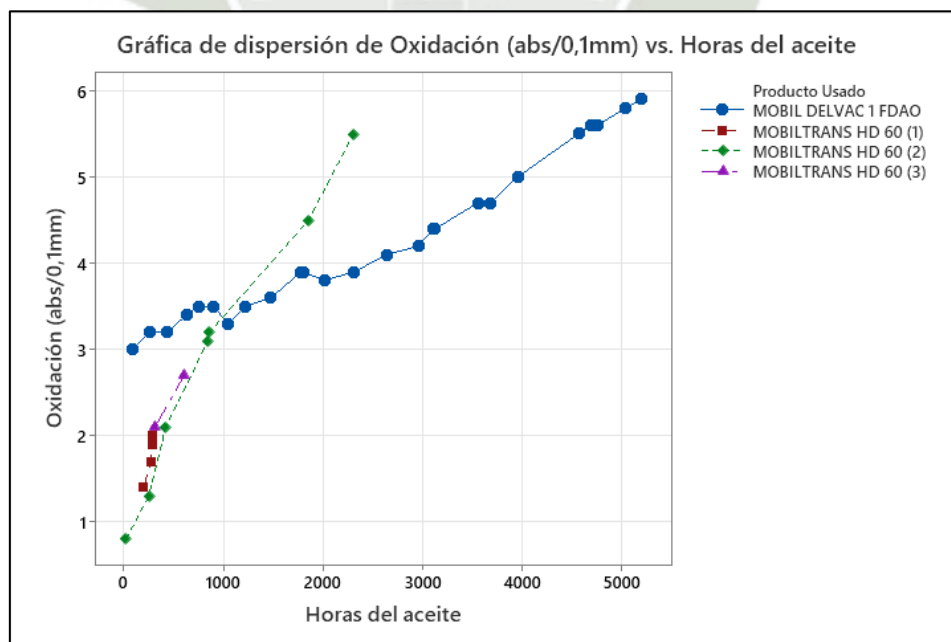
Comportamiento de la Oxidación - CA36



Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAO™ (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60™ (lubricante mineral); para el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

Figura 65

Comportamiento de la Oxidación - CA37

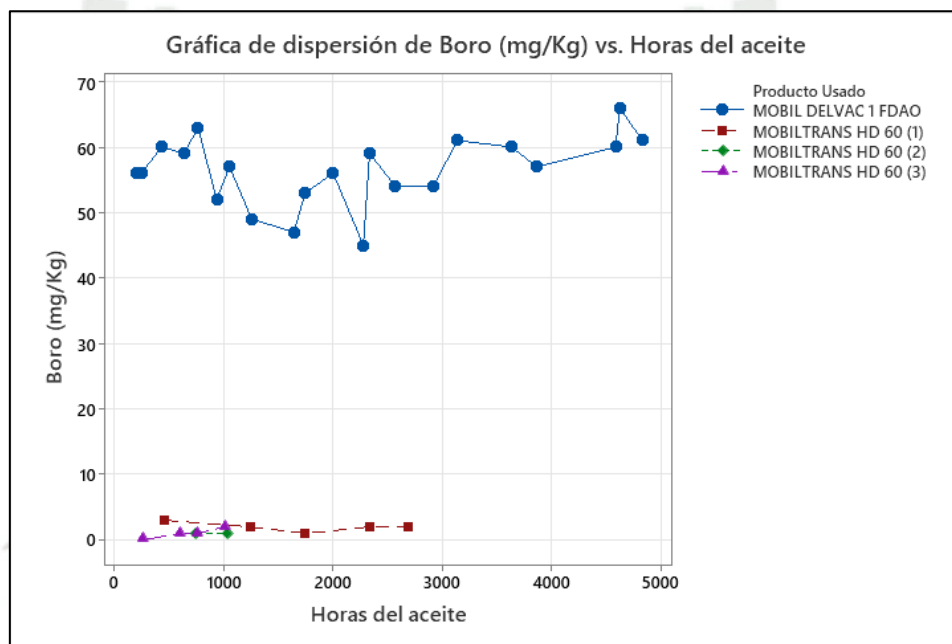


Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAO™ (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60™ (lubricante mineral); para el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

En la Figura 64 y 65 se puede observar el comportamiento con el lubricante mineral Mobiltrans HD 60TM donde la oxidación alcanza valores elevados con una mayor tasa de elevación en menos horas de operación; en cambio con el lubricante sintético Mobil Delvac 1 FDAOTM se obtiene una elevación progresiva con menor tasa de elevación durante las 5000 horas de operación.

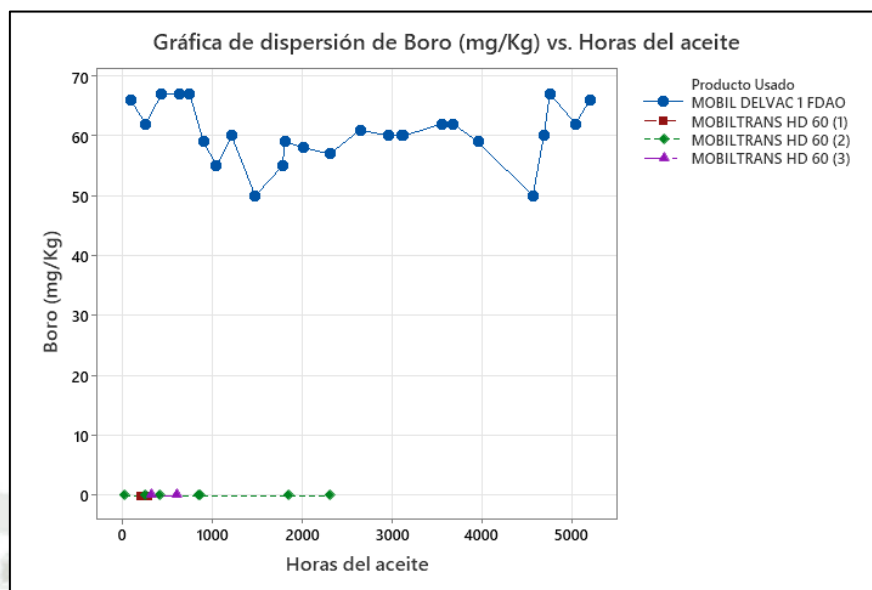
Figura 66

Comportamiento del Boro - CA36



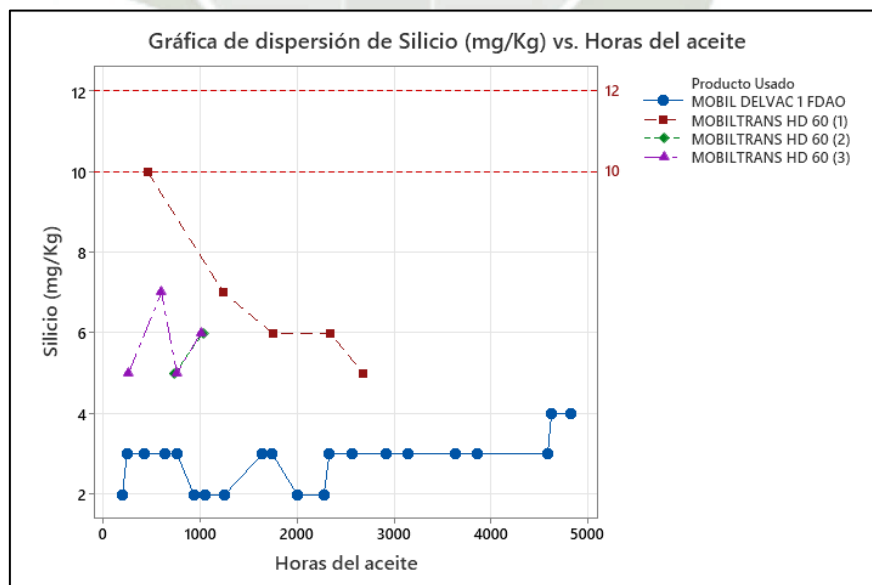
Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAOTM (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60TM (lubricante mineral); para el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

En la Figura 66 y 67 observamos la diferencia entre los dos lubricantes sintético y mineral con respecto a los aditivos que contienen, en el caso del lubricante mineral Mobiltrans HD60TM no se observa presencia del aditivo correspondiente al Boro debido a la formulación química original; para el caso del lubricante sintético Mobil Delvac 1 FDAOTM si se puede notar la presencia de un aditivo antidesgaste y modificador de fricción comúnmente utilizado en lubricantes sintéticos, el cual nos permite mantener un desempeño de menor desgaste de piezas en comparación con el lubricante mineral, en la gráfica se aprecia como el aditivo mantiene resultados dentro de un rango de 45 a 65 ppm aproximadamente con el transcurrir de las 5000 horas de trabajo del lubricante.

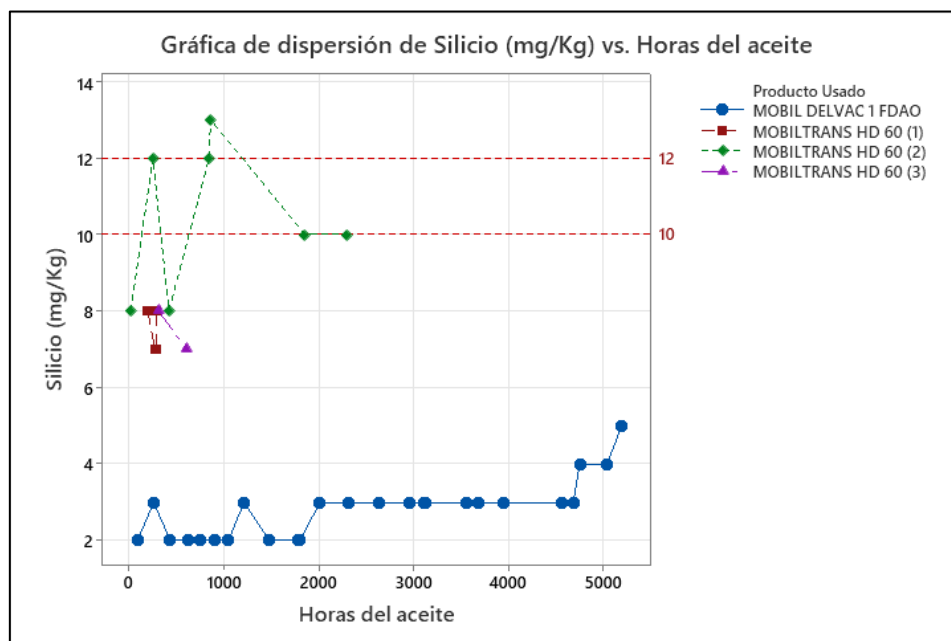
Figura 67
Comportamiento del Boro - CA37


Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAO™ (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60™ (lubricante mineral); para el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

b Contaminación

Figura 68
Comportamiento del Silicio - CA36


Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAO™ (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60™ (lubricante mineral); el límite se estableció de acuerdo a manual del fabricante del equipo en 12ppm para 5000 horas y 10 ppm para 3000 horas, en el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

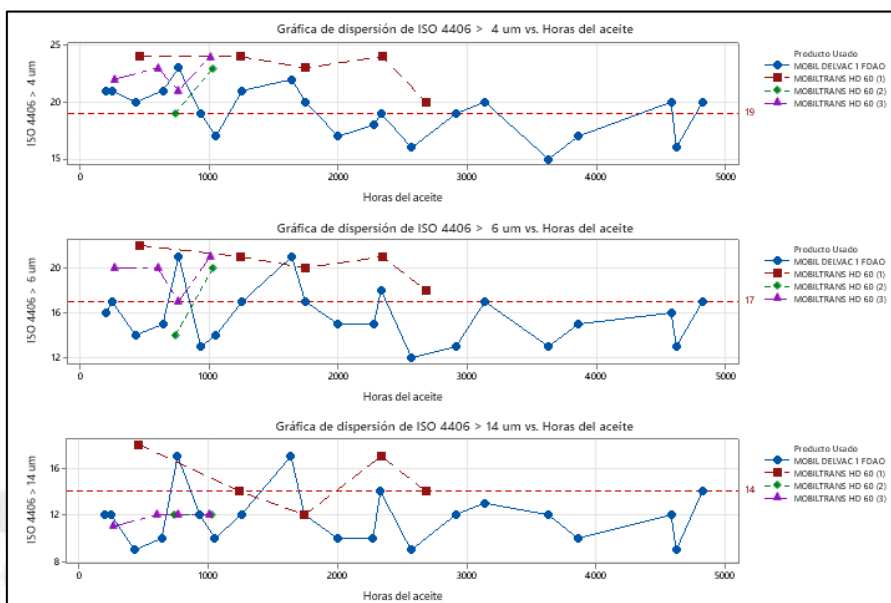
Figura 69
Comportamiento del Silicio - CA37


Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAOTM (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60TM (lubricante mineral); el límite se estableció de acuerdo a manual del fabricante del equipo en 12ppm para 5000 horas y 10 ppm para 3000 horas, en el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

En la Figura 68 y 69 se puede observar el comportamiento del elemento de silicio, el cual, en la mayoría de las veces, la presencia de silicio indica la entrada de tierra al sistema. Con el producto sintético, el control de la contaminación se puede mantener en niveles bajos en comparación al lubricante mineral debido a un mejor sellado de las juntas y hermeticidad del sistema, también se evitó abrir los compartimientos por efecto de rellenos o cambios de lubricante debido al mejor desempeño del lubricante sintético. Para el caso del lubricante Mobiltrans HD60TM alcanzó y superó el límite establecido de 10 ppm donde las partículas abrasivas han estado circulando en los componentes, ocasionando un potencial desgaste prematuro de las piezas internas.

Figura 70

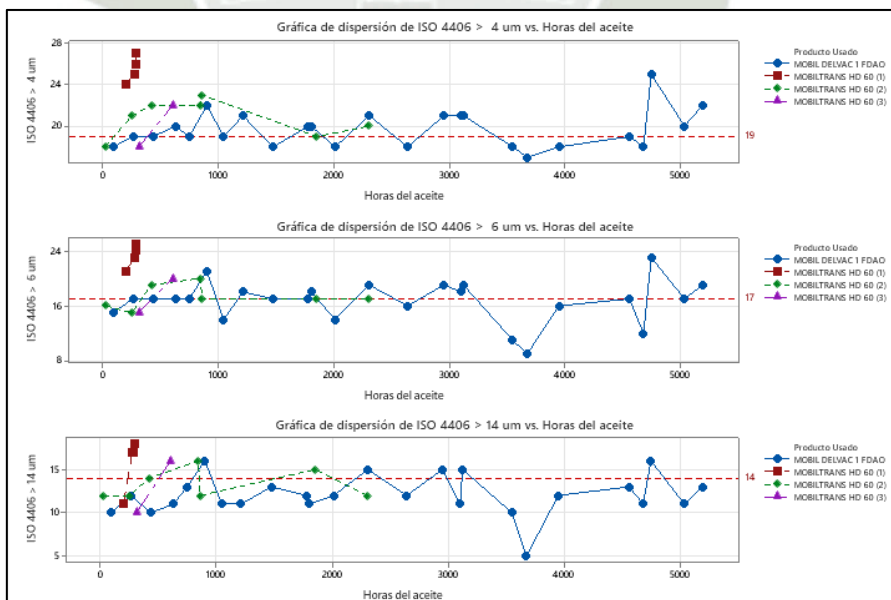
Comportamiento del Código ISO 4406 - CA36



Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAOTM (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60TM (lubricante mineral); los límites se establecieron en el código ISO 19/17/14 como objetivo de limpieza para sistemas de engranajes, para el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

Figura 71

Comportamiento del Código ISO 4406 - CA37



Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAOTM (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60TM (lubricante mineral); los límites se establecieron en el código ISO 19/17/14 como objetivo de limpieza para sistemas de engranajes, para el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

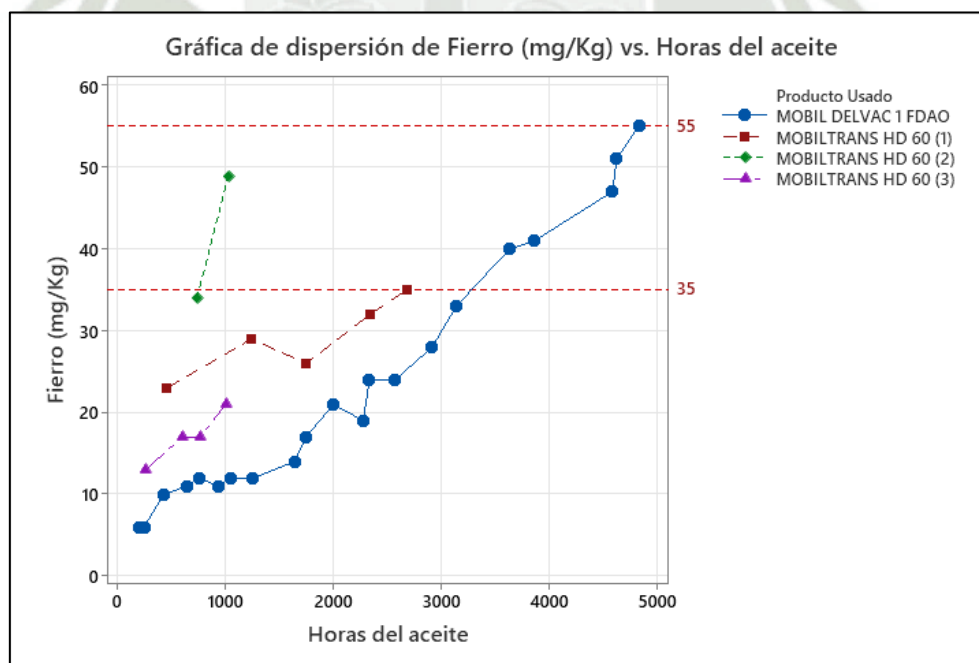
En la Figura 70 y 71 tenemos el comportamiento de limpieza ISO 4406, inicialmente el lubricante sin uso tiene un código ISO 18/16/12, la minera considero como límite un código ISO 19/17/14 obtenido durante el transcurso del monitoreo del lubricante sintético Mobil Delvac FDAO™ el cual se pudo mantener en la mayoría de resultados por debajo de estos niveles en ambos camiones con la ayuda del equipo dializador y su paquete de filtros de 3um y 6um.

Para el caso del desempeño del lubricante mineral Mobiltrans HD60™ los resultados registrados demuestran una mayor cantidad de partículas que ingresan al sistema incorporadas en los insumos y materiales de repuestos que están contaminados con partículas, en muchos casos las partículas ingresan con los lubricantes nuevos, con los filtros, en las mangueras nuevas, en las conexiones, en los recipientes de aceite de relleno, durante el trabajo de inspección, en los trabajos de mantenimiento preventivo y en los trabajos de reparación del componente.

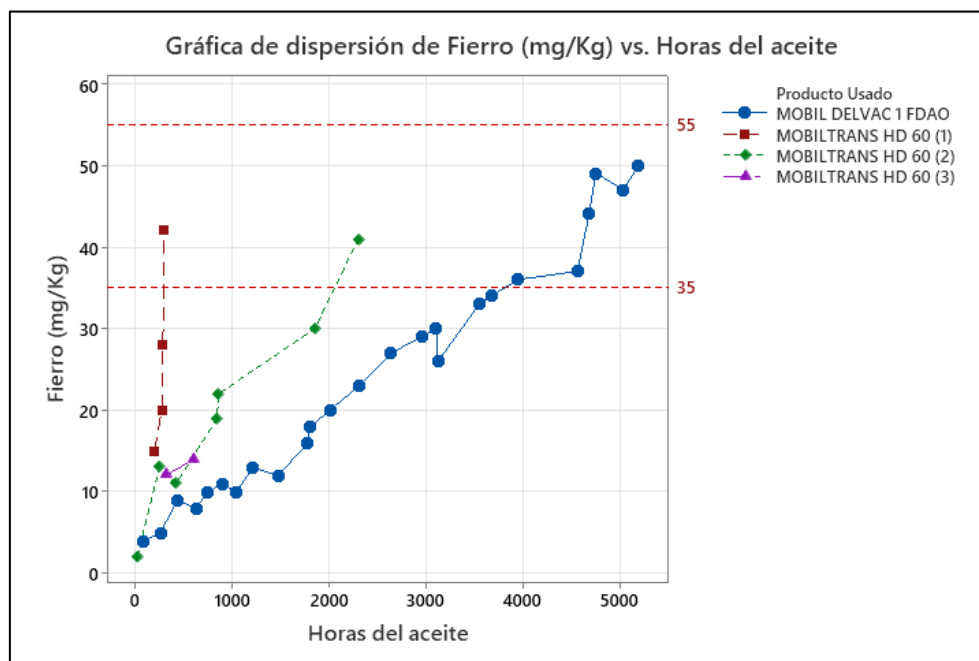
c Desgaste

Figura 72

Comportamiento del Hierro - CA36

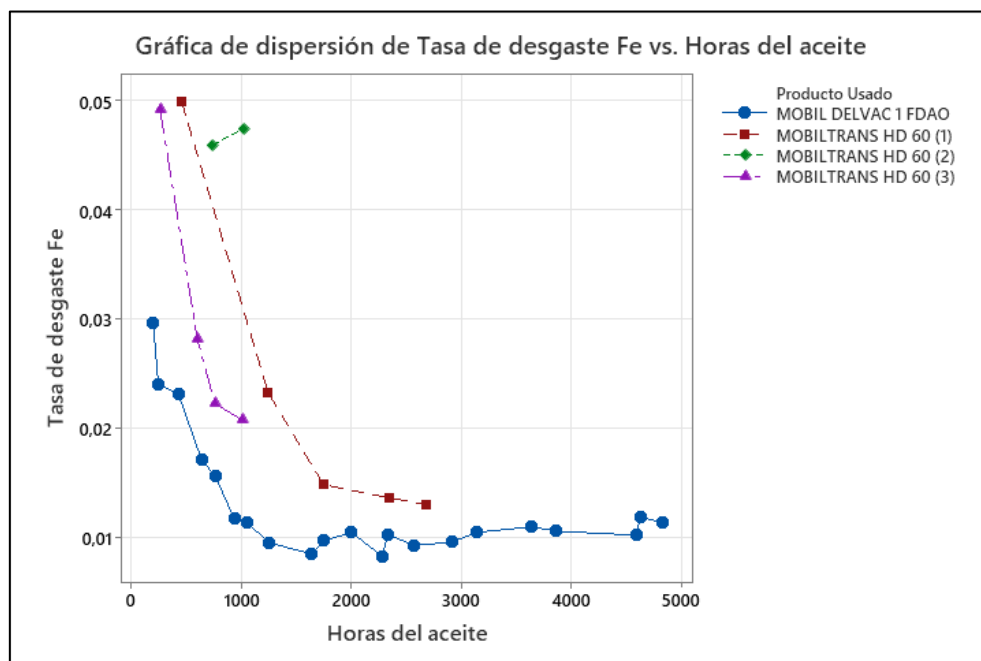


Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAO™ (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60™ (lubricante mineral); el límite se estableció de acuerdo a manual del fabricante del equipo en 55 ppm para 5000 horas y 35 ppm para 3000 horas, en el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

Figura 73
Comportamiento del Hierro - CA37


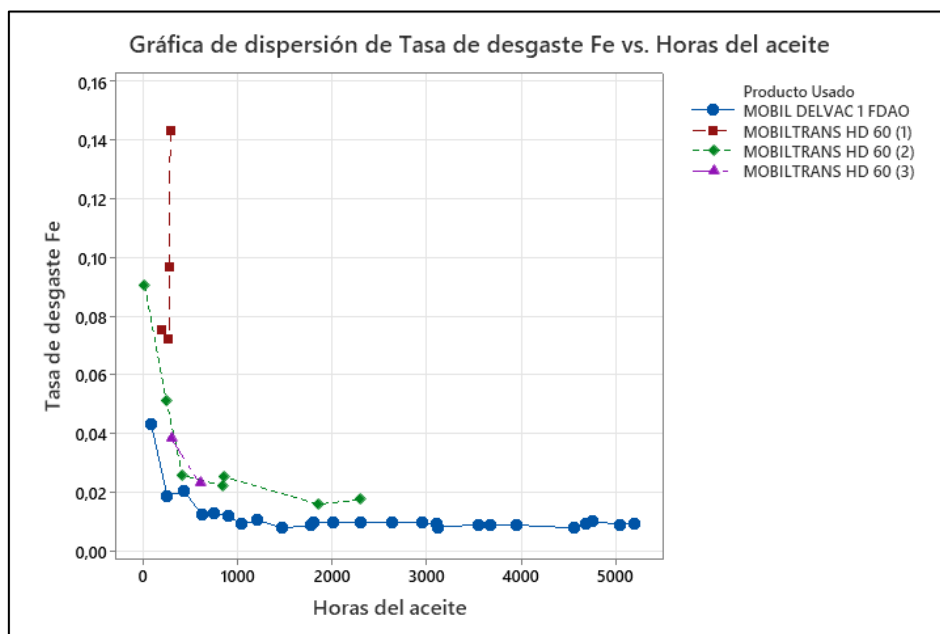
Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAO™ (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60™ (lubricante mineral); el límite se estableció de acuerdo a manual del fabricante del equipo en 55 ppm para 5000 horas y 35 ppm para 3000 horas, en el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

En la Figura 72 y 73 se puede observar el comportamiento del desgaste de hierro acumulado durante el periodo de 5000 horas de trabajo del lubricante sintético Mobil Delvac 1 FDAO™, este se mantuvo por debajo del límite establecido de 55 ppm, en comparación con el lubricante mineral Mobiltrans HD60™ donde se observan casos que superan los 35 ppm de límite establecido para un cambio de 3000 horas.

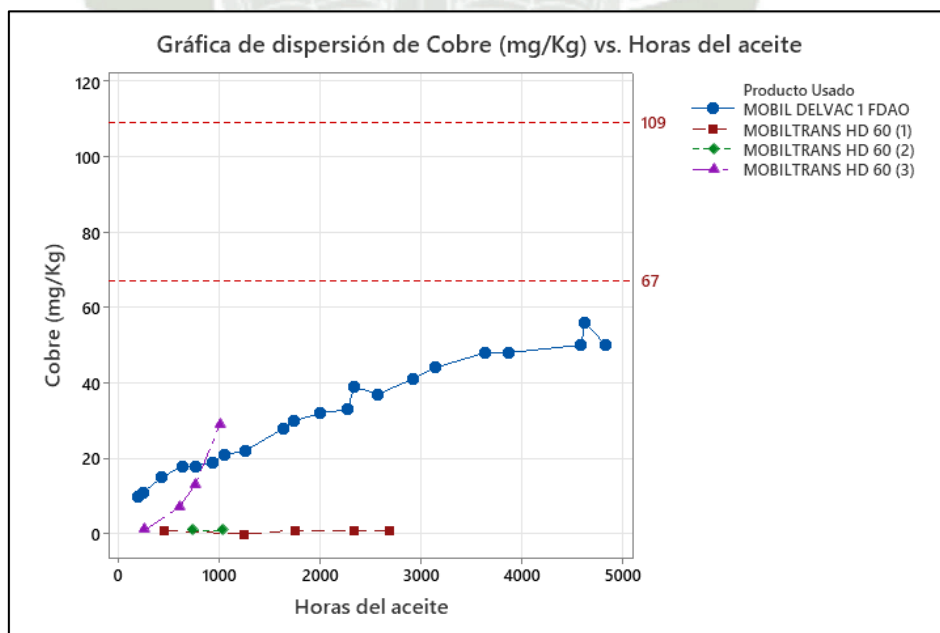
Figura 74
Comportamiento de la Tasa de Desgaste del Hierro - CA36


Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAO™ (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60™ (lubricante mineral), en el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

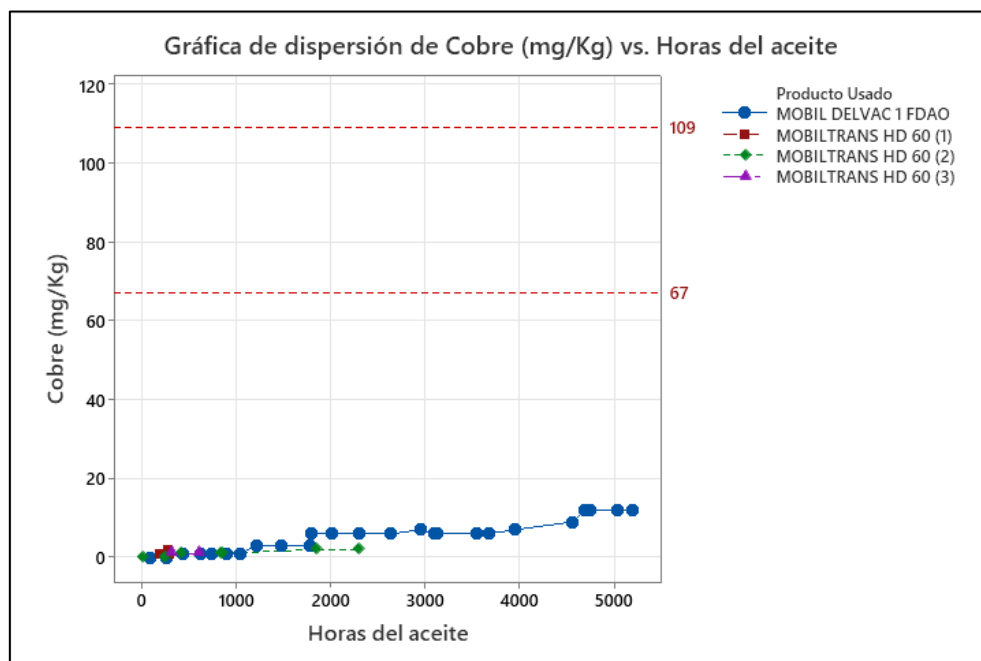
Como se observa la tasa de desgaste en las primeras horas con el lubricante sintético Mobil Delvac 1 FDAO™ es menor en comparación con el lubricante mineral Mobiltrans HD60™, con una reducción constante a valores mínimos en su tendencia, la cual se mantuvo sin cambios significativos a lo largo de las 5000 horas de operación, esto debido a la limpieza y control de la contaminación como se muestra en la Figura 74 y 75.

Figura 75
Comportamiento de la Tasa de Desgaste del Hierro - CA37


Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAO™ (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60™ (lubricante mineral), en el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

Figura 76
Comportamiento del Cobre - CA36


Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAO™ (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60™ (lubricante mineral); el límite se estableció de acuerdo a manual del fabricante del equipo en 109 ppm para 5000 horas y 67 ppm para 3000 horas, en el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

Figura 77
Comportamiento del Cobre - CA37


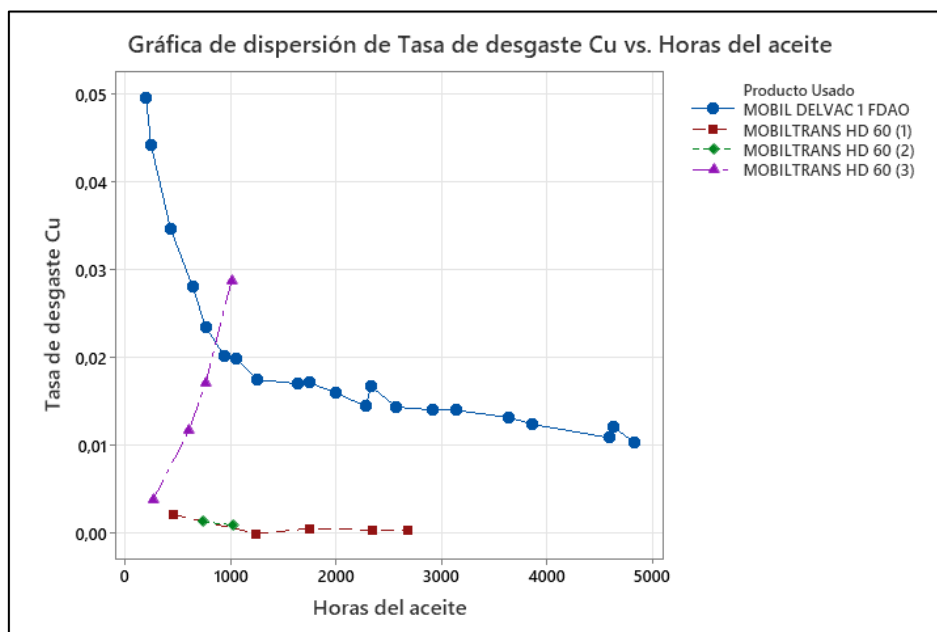
Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAO™ (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60™ (lubricante mineral); el límite se estableció de acuerdo a manual del fabricante del equipo en 109 ppm para 5000 horas y 67 ppm para 3000 horas, en el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

En la Figura 76 y 77 se puede observar el comportamiento del desgaste de cobre acumulado durante el periodo de 5000 horas de trabajo del lubricante sintético Mobil Delvac 1 FDAO™, este se mantuvo para ambos casos por debajo del límite establecido, en el camión CA36, el origen del cobre probablemente sea de una pieza mal montada o armada del paquete de engranajes de los mandos finales antes de realizar la migración al lubricante sintético, en la línea de tendencia Mobiltrans HD60™ (3) ya se observa la presencia de Cu, previo al cambio de lubricante sintético.

En la tasa de desgaste se observa el cambio de tendencia con el lubricante sintético Mobil Delvac 1 FDAO™, donde al transcurrir las horas de trabajo la pendiente se pudo controlar y disminuir como se muestra en la Figura 78 debido a la mejor protección de los metales y a la buena práctica de limpieza de lubricante mediante el dializado, en la Figura 79 la tasa de desgaste se mantuvo mínimo de comportamiento constante.

Figura 78

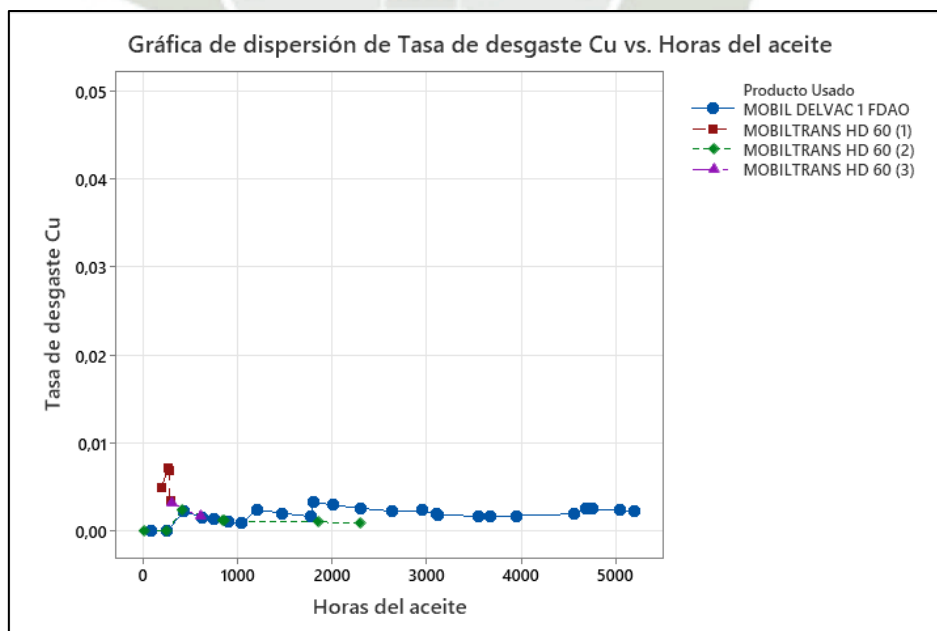
Comportamiento de la Tasa de Desgaste del Cobre - CA36



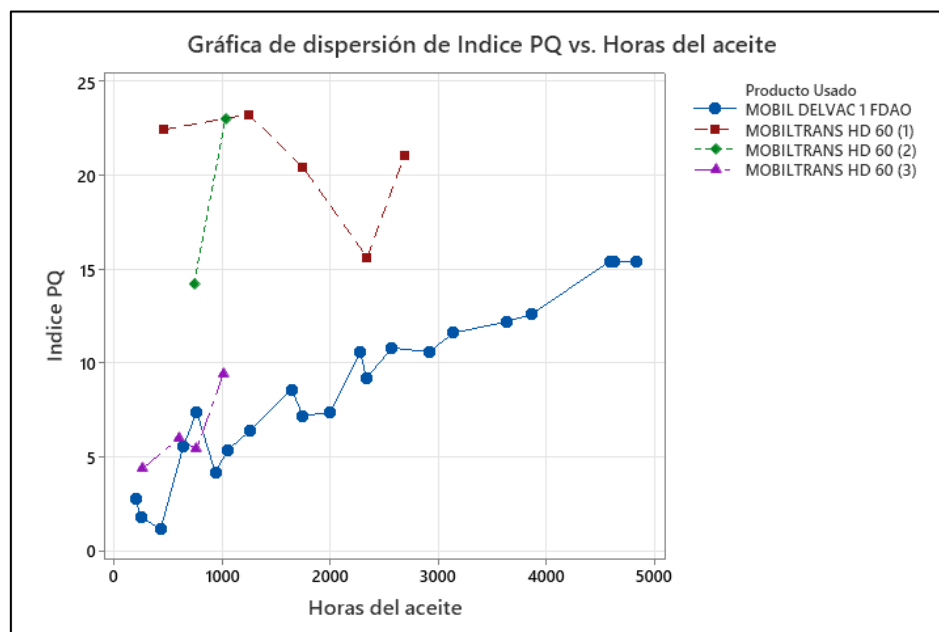
Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAOTM (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60TM (lubricante mineral), en el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

Figura 79

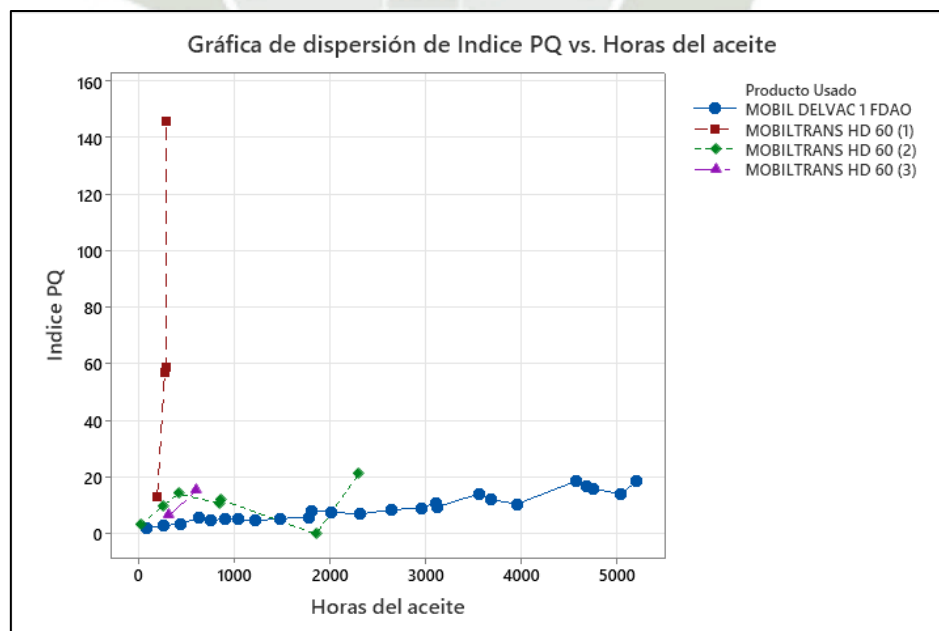
Comportamiento de la Tasa de Desgaste del Cobre - CA37



Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAOTM (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60TM (lubricante mineral), en el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

Figura 80
Comportamiento del Índice PQ - CA36


Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAOTM (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60TM (lubricante mineral), en el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

Figura 81
Comportamiento del Índice PQ - CA37


Nota. Tenemos dos tipos de lubricantes, Mobil Delvac 1 FDAOTM (lubricante sintético) y Mobiltrans HD60TM (lubricante mineral), en el caso del lubricante mineral se consideraron tres cambios anteriores como punto de comparación.

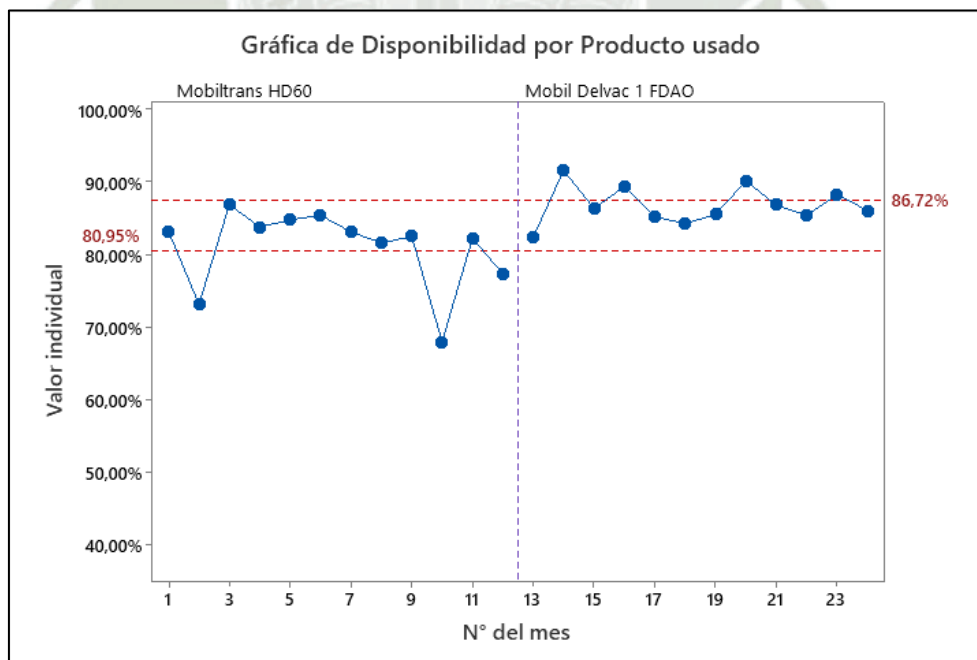
En la Figura 80 y 81 se puede observar el comportamiento del índice PQ (*Particle Quantifier*) acumulado durante el periodo de 5000 horas de trabajo del lubricante sintético, el cual es una relación directa de la masa de partículas ferromagnéticas con la cantidad de lubricante en la muestra de aceite, con esta prueba identificamos la presencia de partículas ferromagnéticas de tamaños superiores a las 10 μ m, las cuales no pueden ser detectadas por el espectrómetro de elementos atómicos utilizado para encontrar cantidades (ppm) de tamaños menores.

En las figuras mencionadas se demuestra la efectividad del desempeño del lubricante sintético Mobil Delvac 1 FDAO™ obteniendo menores resultados de presencia ferromagnética en el lubricante, en comparación al mineral; no podemos dejar de mencionar el dializado como una herramienta de filtrado para mantener el lubricante limpio y mejorar la tendencia de desgaste causado por la acumulación de particular de mayor tamaño (>10 μ m).

4.7. Evaluación de la disponibilidad

Figura 82

Disponibilidad - CA36

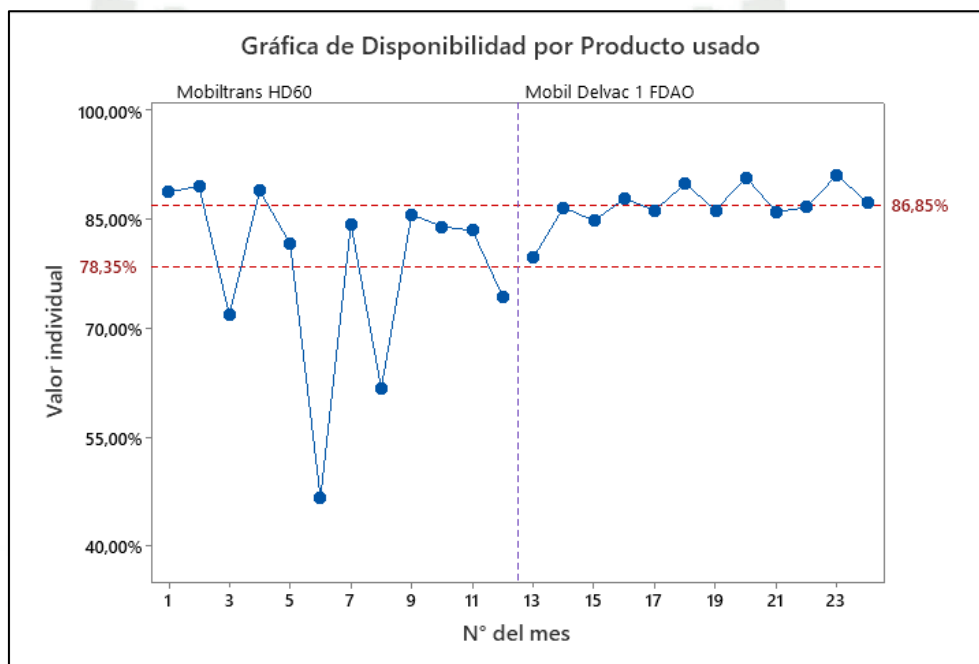


Nota. Tenemos el desempeño de la disponibilidad en dos periodos anuales con diferentes lubricantes, en el primer periodo obtenemos un promedio de 80.95% de disponibilidad con el lubricante mineral Mobiltrans HD60™ y en el segundo periodo obtenemos un promedio de 86.72% de disponibilidad con el lubricante sintético Mobil Delvac 1 FDAO™.

En la Figura 82 se muestra la variación de la disponibilidad del camión CA36 entre los 24 meses de estudio, inicialmente se tenía un promedio de disponibilidad del 80,95%, donde podemos observar que en el último año la disponibilidad se incrementó 5,76% a un promedio de 86,72% demostrando de esta manera que la migración al lubricante sintético mejora la disponibilidad del equipo.

Figura 83

Disponibilidad - CA37



Nota. Tenemos el desempeño de la disponibilidad en dos periodos anuales con diferentes lubricantes, en el primer periodo obtenemos un promedio de 78,35% de disponibilidad con el lubricante mineral Mobiltrans HD60™ y en el segundo periodo obtenemos un promedio de 86,85% de disponibilidad con el lubricante sintético Mobil Delvac 1 FDAO™.

En la Figura 83 se muestra la variación de la disponibilidad del camión CA37 entre los 24 meses de estudio, inicialmente se tenía un promedio de disponibilidad del 78,35%, donde podemos observar que en el último año la disponibilidad se incrementó 8,50% a un promedio de 86,85% demostrando de esta manera que la migración al lubricante sintético mejora la disponibilidad del equipo.

4.8. Cálculos de ahorros netos debido a la migración y extensión de vida útil del lubricante

Los ahorros logrados por el uso de lubricantes sintéticos fueron muy significativos gracias al seguimiento del programa de análisis de aceite y la limpieza de partículas grandes con dializado. Aunque la inversión en lubricantes sintéticos es mayor, algunos ahorros son directamente observables. Por ejemplo, puede reducir el consumo de lubricante, detectar fallas en el tren posterior a través del análisis de aceite, detener el equipo o encontrar problemas críticos. Aunque el componente general se ve afectado, se pueden obtener ahorros adicionales mediante reparaciones importantes y la reducción del tiempo de inactividad del equipo debido a los intervalos prolongados de cambio de lubricante. Para aclarar este concepto, veamos algunos números.

Tabla 23

Costos de Lubricantes

	Mobiltrans HD 60™	Mobil Delvac 1 FDAO™
Costo del aceite (USD/Gln)	\$ 9,00	\$ 27,00
Cantidad total (Gal)	408	408
Costo total del aceite (USD)	\$3.672,00	\$11.016,00

Nota. Inversión total por cantidad de lubricante necesario especificado por el fabricante. Basado en el manual de operación y mantenimiento (Caterpillar Inc., 2009)

En la Tabla 23 observamos la inversión inicial en el lubricante para la capacidad total del tren posterior, generalmente el lubricante sintético equivale a una inversión 3 veces mayor en comparación al mineral. A continuación, se presentan la Tabla 24 y Tabla 25 en las cuales se presentan los costos por reparación y adquisición de componentes nuevos.

Tabla 24

Costos de Reparaciones

Costo de reparación del Diferencial	\$82.000,00
Costo de reparación de los Mandos Finales	\$34.200,00
Costo total de reparaciones	\$116.200,00

Nota. Inversión total por cada tipo de reparación.

Tabla 25
Costos de Componentes Nuevos

Costo de Diferencial	\$74.350,00
Costo de Mandos Finales	\$218.480,00
Costo de total del tren posterior	\$292.830,00

Nota. Inversión total por la compra de componentes nuevos.

Otro efecto significativo de realizar la migración y extensión de drenado del lubricante es la disminución de intervenciones que se realizan en el taller, provocando un ahorro de costos por parada de equipo los cuales se detallan en la siguiente Tabla 26.

Tabla 26
Costos por Parada de Equipo

Cantidad de camiones	25
Parada de equipo por cambio de aceite (hr)	24
Parada de equipo por cambio de tren posterior (hr)	96
Costo de parada de equipo (\$/hr)	\$800,00
Costo de parada por cambio de lubricante	\$19.200,00
Costo de parada por cambio de tren posterior	\$76.800,00
Tasa de interés mínima de rendimiento	13%

Nota. Costos determinados por la minera por detener la producción de un equipo.

Para poder contar con una tasa base de beneficio, se escogió como guía el costo de oportunidad o tasa de interés mínima de rendimiento recomendado por la minera, la cual es del 13%, la cual se utilizará para los cálculos del VAN y TIR.

A continuación, en la Tabla 27, detallamos los costos en los que se puede incurrir a lo largo de la vida útil de un camión minero en 9 años, primero analizamos los costos por el uso del lubricante mineral basándonos en drenados de lubricante cada 3000 horas, reparaciones cada 6000 horas y una vida útil del tren posterior de 18000 horas.

Tabla 27

Costos con Lubricante Mineral

	0 año	1er año	2do año	3er año	4to año	5to año	6to año	7mo año	8vo año	9no año	TOTAL
Recarga lubricante (3000 hr)		2	3	2	3	3	2	3	3	2	23
Reparaciones requeridas (6000 hr)		1	1	0	1	1	0	1	1	0	6
Tren posterior requeridos (18000 hr)		0	0	1	0	0	1	0	0	1	3
Costo del lubricante	\$3.672,00	\$ 7.344,00	\$ 11.016,00	\$ 7.344,00	\$ 11.016,00	\$ 11.016,00	\$ 7.344,00	\$ 11.016,00	\$ 11.016,00	\$ 7.344,00	
Costo por reparaciones		\$ 116.200,00	\$ 116.200,00	\$ 0,00	\$ 116.200,00	\$ 116.200,00	\$ 0,00	\$ 116.200,00	\$ 116.200,00	\$ 0,00	
Costo por requerimiento de tren posterior		\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 292.830,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 292.830,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 292.830,00	
Costo de parada de equipo por recarga de lubricante		\$ 38.400,00	\$ 57.600,00	\$ 38.400,00	\$ 57.600,00	\$ 57.600,00	\$ 38.400,00	\$ 57.600,00	\$ 57.600,00	\$ 38.400,00	
Costo de parada de equipo por cambio de tren posterior		\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	
TOTAL	\$ 3.672,00	\$ 238.744,00	\$ 261.616,00	\$ 415.374,00	\$ 261.616,00	\$ 261.616,00	\$ 415.374,00	\$ 261.616,00	\$ 261.616,00	\$ 415.374,00	\$ 2.796.618,00

Nota. Flujo de inversión en un periodo de 9 años haciendo uso del lubricante mineral

Ahora en la Tabla 28, detallamos los costos por el uso del lubricante sintético basándonos en drenados de lubricante cada 5000 horas.

Tabla 28

Costos con Lubricante Sintético

	0 año	1er año	2do año	3er año	4to año	5to año	6to año	7mo año	8vo año	9no año	TOTAL
Recarga lubricante (5000 hr)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
Reparaciones requeridas (6000 hr)		1	1	0	1	1	0	1	1	0	6
Tren posterior requerido (18000 hr)		0	0	1	0	0	1	0	0	1	3
Costo del lubricante	\$ 11.016,00	\$ 11.016,00	\$ 11.016,00	\$ 11.016,00	\$ 11.016,00	\$ 11.016,00	\$ 11.016,00	\$ 11.016,00	\$ 11.016,00	\$ 11.016,00	
Costo por reparaciones		\$ 116.200,00	\$ 116.200,00	\$ 0,00	\$ 116.200,00	\$ 116.200,00	\$ 0,00	\$ 116.200,00	\$ 116.200,00	\$ 0,00	
Costo por requerimiento de tren posterior		\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 292.830,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 292.830,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 292.830,00	
Costo de parada de equipo por recarga de lubricante		\$ 19.200,00	\$ 19.200,00	\$ 19.200,00	\$ 19.200,00	\$ 19.200,00	\$ 19.200,00	\$ 19.200,00	\$ 19.200,00	\$ 19.200,00	
Costo de parada de equipo por cambio de tren posterior		\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	\$ 79.800,00	\$ 76.800,00	\$ 76.800,00	
Costo por análisis de lubricante		\$ 500,00	\$ 500,00	\$ 500,00	\$ 500,00	\$ 500,00	\$ 500,00	\$ 500,00	\$ 500,00	\$ 500,00	
Costo del dializador y filtros	\$ 30.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 30.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	
TOTAL	\$ 41.016,00	\$ 228.716,00	\$ 228.716,00	\$ 405.346,00	\$ 228.716,00	\$ 253.716,00	\$ 405.346,00	\$ 228.716,00	\$ 228.716,00	\$ 405.346,00	\$ 2.654.350,00

Nota. Flujo de inversión en un periodo de 9 años haciendo uso del lubricante sintético

El ahorro obtenido por un camión minero detallamos a continuación en la Tabla 29:

Tabla 29

Ahorros por un Camión Minero

	0 año	1er año	2do año	3er año	4to año	5to año	6to año	7mo año	8vo año	9no año	TOTAL
Ahorro	-\$ 37.344,00	\$ 10.028,00	\$ 32.900,00	\$ 10.028,00	\$ 32.900,00	\$ 7.900,00	\$ 10.028,00	\$ 32.900,00	\$ 32.900,00	\$ 10.028,00	\$ 142.268,00
VAN	\$ 63.226,72										
TIR	48%										

Nota. Ahorros totalizados anualmente.

Si consideramos la flota completa de 25 camiones mineros, obtendríamos un ahorro total de \$ 3.556.700,00 en el transcurso de 9 años o un ahorro anual de \$ 395.188,89.

La migración y extensión de drenado de lubricante presentado es rentable, pues resulta un VAN equivalente a \$ 63.226,72. Por otro lado, la tasa interna de retorno resulta igual al 48%, esto debido a los ahorros obtenidos por la implementación de la estrategia de mejora.



CONCLUSIONES

General:

Se concluye que la migración y extensión del periodo de cambio del lubricante en el tren posterior es factible y sustentable gracias al uso del lubricante sintético debido a su lubricación efectiva con altas cargas que protege los elementos mecánicos del componente, prolongando su vida útil, ayudando a proporcionar un intervalo entre drenados mayor que un lubricante mineral y reducir el tiempo muerto por mantenimiento.

Específicas:

Primera: Se concluye que los resultados fisicoquímicos en la condición de salud permiten la extensión del periodo de cambio, donde se evaluó la Viscosidad que se mantienen dentro de los límites establecidos para cada tipo de lubricante $\pm 10\%$ del valor del resultado de la línea base (lubricante nuevo); la Oxidación con lubricante sintético mantiene una tendencia menor con relación al lubricante mineral durante las 5000 horas de trabajo del lubricante sintético y la presencia del aditivo Boro mejora la capa antidesgaste para extender la vida útil del lubricante.

Segunda: Se concluye que los resultados fisicoquímicos en la condición de contaminación permiten la extensión del periodo de cambio, donde se evaluó el elemento químico del Silicio que representa al ingreso de la tierra al sistema, donde se mantuvo por debajo del límite establecido en 12 ppm; y el control de la contaminación se mejoró a partir de la práctica de dializado del lubricante y obtener un conteo de partículas con un código ISO 19/17/14 como objetivo para extender la vida útil del lubricante.

Tercera: Se concluye que los resultados fisicoquímicos en la condición de desgaste permiten la extensión del periodo de cambio, donde se evaluó el elemento químico del Fierro obteniendo un desgaste acumulado durante el periodo de 5000 horas de trabajo del lubricante sintético por debajo del límite establecido de 55 ppm, así mismo la tasa de desgaste fue menor en comparación al lubricante mineral; también se evaluó el elemento químico del Cobre obteniendo un desgaste acumulado durante el periodo de 5000 horas de trabajo del lubricante sintético por debajo del límite establecido de 109 ppm, así mismo la tasa de desgaste fue menor en comparación al lubricante mineral y el índice PQ con resultados de menor presencia ferromagnética en el lubricante sintético, en comparación al mineral; no

podemos dejar de mencionar el dializado como una herramienta de filtrado para mantener el lubricante limpio para extender la vida útil del lubricante.

Cuarta: Introducir herramientas, equipos y materiales de monitoreo de condición en el área de mantenimiento, como bombas de muestreo de aceite, recipientes de muestreo y dializadores. Capacitar al personal para realizar estas tareas, genera una mayor disponibilidad; la migración e implementación de extensión del periodo de cambio de lubricante en el tren posterior en camiones mineros CAT 797F, se demuestra por la disponibilidad del camión minero CA36 de 86.72% con un incremento del 5.76% y el camión minero CA37 de 86.85% con un incremento del 8.5%, generarían un ahorro en la flota de 25 camiones de \$ 3.556.700,00 en el transcurso de 9 años o un ahorro anual de \$ 395.188,89

RECOMENDACIONES

Primera: Si se toma la decisión de implementar un programa para extender la vida útil del lubricante, es recomendable hacerlo bien. De lo contrario, sufrirá pérdidas por análisis y acciones no interpretables, así como el uso de lubricante y personal que puede utilizarse en otras tareas.

Segunda: Se recomienda que todo el personal involucrado en el mantenimiento de los equipos esté capacitado para tomar muestras de aceite de manera adecuada y maximizar la densidad de información de los sistemas involucrados. De lo contrario, obtendrá resultados erróneos y no podrá aplicar un buen plan de mantenimiento.

Tercera: Generación de límites y parámetros para condiciones específicas en el sitio del equipo para medir tendencias y concentraciones de metales de desgaste y propiedades lubricantes. Estos varían según el compartimento o sistema que se analiza, la marca del equipo, el nivel de lubricante utilizado y el tipo de aceite recomendado por el fabricante.

Cuarta: Tener un programa de lubricación con procedimientos escritos para documentar la lubricación correcta, conjuntamente con una cultura de control de contaminación para evitar partículas microscópicas en el sistema de lubricación; principal generador de daños en los mecanismos internos.

Quinta: Como parte de una futura línea de investigación, recomendaría investigar a partir de este trabajo la posibilidad de ampliar el estudio de migración y extensión de vida útil del lubricante a los demás componentes del camión minero mencionado, dando lugar a la innovación de monitoreo a través de sensores inalámbricos en línea y así obtener resultados más precisos respecto a la condición del componente.

Sexta: Esta investigación no ha podido precisar si la extensión de drenado del lubricante afecta la vida útil de los componentes que intervienen en la lubricación, es por eso que se recomienda realizar esta investigación en un futuro ya que involucra una mayor cantidad de tiempo de seguimiento a lo largo de la vida útil de los componentes que suele ser de 3 años aproximadamente.

BIBLIOGRAFIA

- Abejaro Soto, A. (2019). *Predictiva21*. Obtenido de <https://predictiva21.com/control-contaminacion-lubricantes/#:~:text=%C3%81rea%20para%20adecuada%20gesti%C3%B3n%20de,esencial%20para%20evitar%20la%20contaminaci%C3%B3n>.
- Acuña Acuña, J. (2003). *Ingeniería de confiabilidad*. San José, Costa Rica: Editorial tecnológica de Costa Rica.
- API (American Petroleum Institute). (06 de 09 de 2022). *API (American Petroleum Institute)*. Obtenido de <https://www.api.org/products-and-services/engine-oil/documents>
- Beltrán Jaramillo, J. M. (2013). *Indicadores de gestión*. 3R Editores.
- Benitez Hernandez, L. E. (s.f.). *Las fallas en los engranajes*. Universidad nacional de Colombia, Bogota.
- Bravo, E. (2007). *Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad*. Acción Ecológica.
- Caterpillar Inc. (2000). *Guía de Capacitación de Servicio*. Illinois: East Peoria Service Training.
- Caterpillar Inc. (Octubre de 2009). *Manual de operación y mantenimiento - Camión de obras 797F*. Illinois.
- Caterpillar Inc. (2012). *Camión Minero 797F*. Illinois: (n.d.).
- Caterpillar Inc. (2013). *Límites Caterpillar SOS*. Illinois: (n.d.).
- Cedillo Salinas, A. R., & Jaramillo León, D. F. (2014). Estudio de la incidencia del uso de filtros de aceite alternos en el envejecimiento prematuro del aceite de motor de combustion interna. (*tesis de grado*). Universidad Politecnica Salesiana, Cuenca-Ecuador.
- Cervantes, R. A. (2015). Caracterización de la degradación del aceite lubricante en automotores de ciclo de diesel. (*Trabajo de Grado*). Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Chimeno, C. (2019). Nanopartículas como objetos innovadores para la mejora de la calidad de procesos tribológicos y analíticos. (*Tesis Doctoral*). Universidad de Oviedo, Oviedo.
- Díaz, G. (08 de Febrero de 2021). *La tribología y el análisis de los lubricantes industriales (parte1)*. Obtenido de Terotecnic Ingeniería S.L.: <https://terotecnic.com/mantenimiento-predictivo/la-tribologia-y-el-analisis-de-los-lubricantes-industriales/>

- Díaz, J. J. (2006). Documento de apoyo a la gestion de mantenimiento, para la seleccion y aplicación de lubricantes. (*Trabajo de Grado*). Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Dominguez Soto, D. C. (2018). Implemetacion de un mantenimiento basado en el analisis de aceite para incrementar la disponibilidad de una excavadora CAT 336 de GYM. (*Tesis Pregrado*). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque.
- Ferreyros. (2015). *Ferreyros Discussion Topics*.
- Finning Capacitación Ltda - material del estudiante. (2021). *Tren de potencia 797F*.
- Galbiati Riesco, J. M. (2015). *Conceptos Básicos de Estadística*.
- González, F. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*. Madrid: Fundación Confemetal.
- Guerrero, T. (2016). Determinación de la degradación y contaminación del aceite de motores Otto en función del kilometraje recorrido. (*Tesis de Maestría*). Universidad del Azuay, Cuenca.
- Llacta Moscoso, A. E. (2012). *Análisis de rendimiento de lubricantes para motor diesel Deutz 413, en el mantenimiento de las maquinarias de la empresa Conymutse E.I.R.L.* Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Martínez, J. (2014). Generación de un plan de mantenimiento basado en informes de análisis de aceite, lubricante en motores Cummins Isx. (*Trabajo de Grado*). Universidad Santo Tomás, Bogotá.
- Massa, L., & Cusi, R. (2019). La regeneración de los aceites usados de los motores de combustión disminuye el impacto ambiental en la ciudad de Ica. *ÑAWPARISUN - Revista de investigación científica*, 1(4), 1-6.
- Mobil TM. (2017). *Ficha tecnica de lubricante mineral para transmisiones y mandos finales*.
- Mobil TM. (2020). *Ficha tecnica lubricante sintético para mandos finales y ejes*.
- Moubray, J. (1997). *Mantenimiento centrado en la confiabilidad*. New York: Industrial Press Inc.
- Noria latín américa. (2015). *DIPLOMADO: LUBRICACIÓN DE CLASE MUNDIAL*. Lima: n.d.
- Noria Latín América. (27 de Dic. de 2021). *Noria*. Obtenido de <https://noria.mx/analisis-de-lubricante-a/los-fundamentos-del-muestreo-de-aceite-usado/>
- Palza Bernuy, A. (2021). Gestión estrategica y logistica en mantenimiento. (*Maestria ingeniería de mantenimiento*). Universidad Católica de Santa María, Arequipa.

- Paredes Nuñez, J. E. (2010). Metodología de Investigación. (*Manual*). Universidad Católica de Santa María, Arequipa.
- Portocarrero Servan, R., & Rabanal Delgado, Y. D. (2019). Mantenimiento predictivo basado en análisis de aceite para mejorar la disponibilidad de los remolcadores con motor cummins isx en una empresa de transporte de carga. (*Tesis Pregrado*). Universidad Nacional del Callao, Lima.
- Suárez, H. (2006). Extensión de intervalos de cambio de aceites lubricantes en equipos pesados de minería e incremento de la vida útil de componentes mayores mediante monitoreo de condiciones. (*Informe de Suficiencia*). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Taipe, D. (2014). Incremento de periodo de cambio de aceite mediante análisis en el sistema de lubricación del motor de motoniveladora CAT-16H. (*Tesis de Pregrado*). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Tello, G., & Espinoza, E. (2016). Implementación del programa de tribología centrada en la confiabilidad para mejorar la productividad de las palas pc4000 en la minera miskimayo. (*Tesis para optar al título profesional*). Universidad Privada del Norte, Lima.
- Tiempo Minero. (11 de Nov. de 2021). *Tiempo Minero*. (B. Quinde, Editor) Obtenido de <https://camiper.com/tiempominero-noticias-en-mineria-para-el-peru-y-el-mundo/antapaccay-ampliara-la-capacidad-de-sus-plantas-de-procesamiento/#:~:text=apoyo%20social%2C%20agreg%C3%B3,Producci%C3%B3n,mina%20produjo%20hasta%2020%2C000%20toneladas>.
- Trujillo Corona, G. (2012). *Interpretación de análisis de lubricante*. Bilbao: Noria Latín América.
- Wakiru, J. M., Pintelon, L., Muchiri, P. N., & Chemweno, P. K. (2018). A review on lubricant condition monitoring information. *ELSEVIER*, 109-127.
- Wolak , A., & Zajac, G. (2018). Changes in the operating characteristics of engine oils: A comparison of the results obtained with the use of two automatic devices. *ELSEVIER*, 53-61.
- Wright, J. (2016). *Congreso de mantenimiento y confiabilidad latam*. Obtenido de <https://cmc-latam.com/2018/03/07/comprendiendo-la-eficiencia-del-filtro-la-tasa-beta/>

ANEXOS

Anexo 1 Reporte de análisis de lubricante



Smart Lab
Lubricant Analysis

Reporte de Análisis

NORMAL

Fecha de reporte: 1 Jun. 2021
 Cuenta: **COMPAÑIA MINERA**
 Cuenta Padre:
 Flota o Área: **Caterpillar - 797F**
 Equipo: **37**

Información del componente					
Componente: Diferencial		Fabricante: CATERPILLAR			
Clase de Componente: Diferencial		Modelo:			
		Lubricante: MOBIL DELVAC 1 FINAL DRIVE AND AXLE OIL			

	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	
Datos y Resultados de la muestra	Estado del Reporte	A001071773	A001052637	A002105176	A002105020	A002104973
	ID de la muestra	Premium	Premium	Premium	Premium	Premium
	Nivel de servicio	00111872	00116712	00122225	00122222	00124953
	Identificación de la botella	MOBIL DELVAC 1 FINAL DRIVE AND AXLE OIL	MOBIL DELVAC 1 FINAL DRIVE AND AXLE OIL	MOBIL DELVAC 1 FINAL DRIVE AND AXLE OIL	MOBIL DELVAC 1 FINAL DRIVE AND AXLE OIL	MOBIL DELVAC 1 FINAL DRIVE AND AXLE OIL
	Lubricante utilizado	30 Mar. 2021	23 Abr. 2021	9 May. 2021	9 May. 2021	23 May. 2021
	Fecha de muestreo	15 Abr. 2021	5 May. 2021	19 May. 2021	19 May. 2021	1 Jun. 2021
	Fecha de reporte	26907 Hrs	27421 Hrs	27734 Hrs	27733 Hrs	27990 Hrs
	Hrs/Km de Equipo	3125 Hrs	3645 Hrs	3957 Hrs	3963 Hrs	4214 Hrs
	Hrs/Km de Aceite	40 gal				
	Volumen de Relleno	No	No	No	No	No
Cambio de Aceite	No	No	Sí	Sí	No	
Cambio de Filtro	Dializado - 06 horas					
Comentarios de muestra						
Lubricante	Clasificación de Contaminación	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	Clasificación de Equipo	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	Clasificación de Aceite	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
	Agua (Cualitativo)	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
	Código ISO (ISO 4406)	22/20/15	21/17/10	24/19/14	19/17/14	20/18/14
	Conteo de Partículas > 04um	39992	11214	99552	3670	9539
	Conteo de Partículas > 06um	9242	895	2617	1267	2025
	Conteo de Partículas > 14um	300	8	141	155	159
	Índice PQ	21	12	26	23	20
	Oxidación (Abs/0.1mm)	0.182	0.193	0.186	0.181	0.191
Desgaste (ppm)	TAN (mgKOH/g)	1.86	0.30	1.44	1.33	1.40
	Viscosidad a 100°C (cSt)	30.7	30.6	30.6	30.5	30.6
	Ag (Plata)	0	0	0	0	0
	Al (Aluminio)	3	0	0	0	0
	Cd (Cadmio)	1	0	0	0	0
	Cr (Cromo)	0	0	0	1	1
	Cu (Cobre)	7	10	28	19	15
	Fe (Hierro)	24	39	45	48	50
	Mo (Molibdeno)	1	0	0	0	0
	Ni (Níquel)	2	0	1	1	1
Contaminantes (ppm)	Pb (Plomo)	1	1	3	2	2
	Sn (Estaño)	0	0	1	0	0
	Ti (Titanio)	0	0	0	0	0
	K (Potasio)	2	0	0	0	1
	Mn (Manganeso)	0	0	1	1	1
Aditivos (ppm)	Na (Sodio)	0	5	3	3	4
	Si (Silicio)	3	8	4	4	4
	V (Vanadio)	0	0	0	0	0
	B (Boro)	63	73	80	90	77
	Ba (Bario)	0	0	0	0	0
	Ca (Calcio)	610	840	850	939	944
	Mg (Magnesio)	3	4	4	4	5
	P (Fósforo)	327	443	451	495	452
	Zn (Zinc)	199	260	270	292	307

Recomendación y Comentarios

-No se requiere acción alguna sobre el aceite o el equipo. Todos los resultados de las pruebas realizadas están dentro de los rangos aceptables. Examine cambios progresivos y resultados moderados en busca de tendencias cambiantes. Retome la muestra en el próximo intervalo programado.



1.-Introducción:

LUBCOM cuenta con Servicio Técnico Especializado, Uno de los objetivos es implementar una Unidad de filtración adecuada para mantener la limpieza de sus equipos y de esta manera incrementar la Vida útil y confiabilidad.

Es importante mencionar que para que un sistema de filtración trabaje en óptimas condiciones y cumpla con los objetivos, se requiere implementar o mejorar el blindaje del equipo, la toma de muestras, el llenado y la visualización del estado del aceite.

Para que la toma de muestra y el análisis de aceite sea efectivo y permita detectar las fallas en una etapa temprana y antes de que se constituyan en fallas mayores es importante reconocer los lugares óptimos para la toma de muestra.

2.-Objetivo:

Disminuir el Código de limpieza actual del aceite de su Aceite con Viscosidad @40°C – 320 cSt. De acuerdo a lo solicitado:

2.1.- Método:

- Implementar un SKID DE FILTRACION MOVIL adecuado para sus Equipos.

2.2.- Propuesta:

La unidad de filtración a Implementar contiene un filtro de 6μ de 34" y un filtro 3μ de 34" de longitud para partículas, Tasa Beta 1000, y Filtro Magnético en línea.

Breve explicación de la importancia de la Taza Beta en un Filtro de partículas.

La mejor clasificación y las más comúnmente usada en la industria de los filtros es la tasa beta, que resulta del Método multipass para evaluar el desempeño de filtración de un filtro fino (ISO 16889).

Contaminación en el fluido a filtrar (partículas/ml)	Contaminación en el fluido después del filtro (partículas/ml)	Tasa Beta	Porcentaje de eficiencia
1,000,000	500,000	2	50
	50,000	20	95
	13,000	75	98.7
	5,000	200	99.5
	1,000	1,000	99.9

Tabla 1. Efecto de la tasa de filtración (Tasa Beta) en la limpieza del fluido.

FILTRO ELEMENTO BETA 1000 DE 34"			
Referencia	Descripción	Imagen Referencial	Cant.
HP101L34-3MB	Filtro elemento de 3 micras - beta 1000 de 34" Marca: HY-PRO		1
HP101L34-6MB	Filtro elemento de 6 micras - beta 1000 de 34" Marca: HY-PRO		1



S·O·SSM Services

Latest Information – 04 June 2013

New Tables:

With this update, over 300 new or updated Wear Tables have been added to this repository. The updated tables were created with significantly larger data sets. Wear Tables are now available for machines with Tier 2 Equivalent, Tier 4 Interim, and Tier 4 Final engines.

Machine Engine Wear Tables:

Some Cat machine engines have a standard 250-hour oil drain and an optional 500-hour oil drain. To provide the most conservative approach, the 250-hour tables are usually loaded into SOS Services Manager. Both engine wear tables are available in this document.

A few of the newest machines have the standard engine oil drain at 500 hours. For these machines, the 500-hour wear table is loaded into SOS Services Manager.

Basic Information:

This electronic document is primarily designed to replace the paper wear table booklets that were published between 1998 and 1999. These wear table booklets were printed under the following document numbers:

SELD0847 Excavators
SELD0854 Wheel Loaders
SELD0855 Off Highway Trucks
SELD0856 Non-Captive Engines
SELD0857 Agricultural Tractors
SELD0858 Articulated Dump Trucks
SELD0859 Backhoe Loaders
SELD0868 Scrapers
SELD0880 Track Type Tractors
SELD0881 Motor Graders
SELD0882 Integrated Tool Carriers
SELD0883 Forest Products
SELD0884 Paving Products
SELD0885 Pipelayers
SELD0886 Track Loaders

Security Statement:

This electronic file and the previous paper booklets are considered proprietary to Caterpillar Inc. and Caterpillar Dealers. The contents of this file must not be copied or redistributed in any way.

S-O-SSM Services Wear Table Format

Basic Information:

The format and nomenclature has changed on the latest wear tables. These changes were made to improve the interpretation process and to optimize the use of these tables in the new S-O-S Services Manager laboratory information management system (LIMS). S-O-S Services Manager evaluates a sample test based on three levels of severity. The new wear table format is designed to complement this interpretation strategy with three levels of severity for each wear element.

New Format:

In the new format, there are only three columns of information for each element; the previous format had four columns of information. The description of each column has also changed. The example below shows the previous format with four columns and the statistical probability associated with each column.

Probability	85%	95%	97.5%	Over 97.5%
Element	Pop. Norm	Reportable	Unacceptable	Urgent
Iron	21 - 57	58 - 64	65 - 68	Over 68

The new format is shown below with three columns, new column names, and the statistical probability. In simple terms, the reportable column has been eliminated and all of the columns have been renamed.

Probability	85%	97.5%	Over 97.5%
Element	No Action Required	Monitor	Action Required
Iron	21 - 57	58 - 68	Over 68

S-O-S Services Manager will inform the analyst with a yellow flag when any element is within the values listed in the Monitor column. If any element exceeds the Action Required value, the analyst will be informed with a red flag. These tables and other test limits will be part of the rules based logic that is used to develop an Auto Interpreter System within S-O-S Services Manager.

WTG Format:

The Wear Table Generator (WTG) has given S-O-S Services the ability to produce wear tables in a semi-automatic process. The WTG uses the database from S-O-S Services Manager as the data source. The data is retrieved, cleansed, and statistically evaluated by the WTG as it produces a wear tables. The resulting wear tables are written back to S-O-S Services Manager. In the S-O-S Services Manager application, wear tables can be accessed through the equipment manager screen or on the interpretation manager screen.

The WTG also produces a .pdf file of the wear table. The .pdf files contain the wear table and all of the filter criteria used to create the table. These WTG .pdf files are placed into the KN wear table repository on a regular basis.

Examples of the three formats are on the following pages.

Caterpillar S•O•SSM Services Wear table

Created	31 May 2013
Manufacturer	CATERPILLAR
Family	All
Model	797F
Product ID Prefix	LAJ
Compartment	DIFFERENTIAL REAR
Valid Equipment	98
Valid Samples	1653
Valid Fluid Hours	4000

Element	No Action Required	Monitor	Action Required
Copper	0 to 89	90 to 109	Over 109
Iron	0 to 48	49 to 55	Over 55
Chromium	0 to 2	3 to 4	Over 4
Aluminum	0 to 2	3 to 4	Over 4
Lead	0 to 11	12 to 14	Over 14
Silicon	0 to 9	10 to 12	Over 12
Tin	0 to 4	5 to 6	Over 6

Filter Criteria	
Maximum Fluid Hours	5000
Maximum Equipment Hours	16000
Break-In Samples Excluded	True
Excluded Samples with Positive Fuel	True
Excluded Samples with Positive Water	True
Excluded Samples with Positive Glycol	True
Excluded Samples where Sodium (Na) Exceeds PPM	25
Excluded Samples where Potassium (K) Exceeds PPM	25
Excluded Samples where Silicon (Si) Exceeds PPM	30
Starting Sample Date	All
Ending Sample Date	All
Specific Jobsites	All
Specific Customers	All
Dealers Excluded	None
Minimum Samples set at	30
Minimum Equipment set at	3