



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MECÁNICA

MONITOREO DE LA DEGRADACIÓN DE UN ACEITE
LUBRICANTE GEARBOX 320 EN UN MOTORREDUCTOR.

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTOR:

YORKY DANIEL ARIAS JARAMILLO

Riobamba – Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MECÁNICA

**MONITOREO DE LA DEGRADACIÓN DE UN ACEITE
LUBRICANTE GEARBOX 320 EN UN MOTORREDUCTOR.**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTOR: YORKY DANIEL ARIAS JARAMILLO

DIRECTOR: Ing. LUIS FERNANDO BUENAÑO MOYANO Msc.

Riobamba – Ecuador

2023

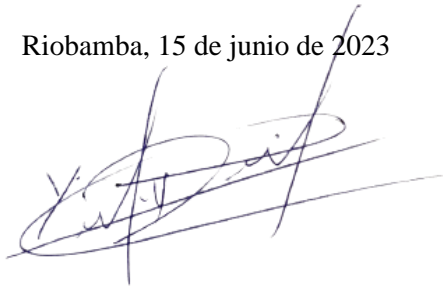
© 2023, Yorky Daniel Arias Jaramillo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Yorky Daniel Arias Jaramillo, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 15 de junio de 2023

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Yorky Daniel Arias Jaramillo', written over a horizontal line.

Yorky Daniel Arias Jaramillo

070455041-7

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MECÁNICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto Técnico, “**MONITOREO DE LA DEGRADACIÓN DE UN ACEITE LUBRICANTE GEARBOX 320 EN UN MOTORREDUCTOR.**”, realizado por el señor: **YORKY DANIEL ARIAS JARAMILLO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos y legales; en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez Msc.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



2023-06-15

Ing. Luis Fernando Buenaño Moyano Msc.
**DIRECTOR DE TRABAJO DE
TITULACIÓN**



2023-06-15

Ing. Nelson Santiago Chuquin Vasco
MIEMBRO DE TRIBUNAL



2023-06-15

DEDICATORIA

A mis amados padres Gorky y Gina que son lo más valioso que la vida me ha dado y el motor que me impulsa a seguir siempre adelante. El haberme ayudado en mi carrera universitaria a siempre salir adelante y con un apoyo incondicional que me han dado y que ha permitido que logre uno de los sueños que eh anhelado desde muy pequeño, convertirme en un gran ingeniero.

Yorky

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres Gorky y Gina por todo el esfuerzo y sacrificio que han hecho para apoyarme siempre, e inculcarme los valores de responsabilidad y humildad.

A mis docentes de la Facultad de Mecánica por haber compartido sus conocimientos con profesionalismo.

Al ingeniero Edwin Mora en calidad de jefe de mantenimiento de la planta de beneficio BIRA S.A., por su guía, apoyo y asesoramiento en el desarrollo del trabajo de titulación.

Agradecer también a mi tutor Ing. Luis Buenaño e Ing. Nelson Chuquin quienes con la enseñanza de sus conocimientos hicieron que pueda cumplir mi propósito, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo y amistad.

Yorky

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS	xv
RESUMEN	xvi
SUMMARY	xvii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Delimitación.....	4
1.3. Formulación del problema.....	5
1.4. Objetivos	5
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	5

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Lubricantes	7
2.2. Clasificación de aceites lubricantes	7
2.3. Características de aceites lubricantes	9
2.3.1. <i>Estabilidad a la oxidación</i>	9
2.3.2. <i>Resistencia a la formación de espuma</i>	10
2.3.3. <i>Resistencia a la humedad</i>	10
2.3.4. <i>Propiedades antiherrumbre</i>	10
2.3.5. <i>Extrema presión</i>	11
2.4. Propiedades fisicoquímicas de los lubricantes.....	11
2.4.1. <i>Aceite base</i>	11
2.4.2. <i>Demulsibilidad</i>	11
2.4.3. <i>Número de neutralización</i>	12
2.4.4. <i>Aditivos de lubricantes</i>	12
2.4.5. <i>Viscosidad</i>	14

2.4.6.	<i>Punto de fluidez</i>	14
2.4.7.	<i>Densidad</i>	15
2.4.8.	<i>Peso específico</i>	15
2.4.9.	<i>Color y Fluorescencia</i>	15
2.5	Aceite Gearbox EP	15
2.6	Antioxidantes	16
2.7	Caja reductora	16
2.8	Lubricación	17
2.8.1	<i>Análisis de aceites</i>	18
2.8.2	<i>Mantenimiento en el interior de una empresa</i>	20
2.8.3	<i>Mantenimiento predictivo</i>	20
2.9	Grados de viscosidad	21
2.9.1	<i>Grado SAE</i>	21
2.9.2	<i>Grados ISO</i>	22
2.10	Ensayos para evaluar la conformidad de los aceites	22
2.11	Fallas en engranajes de caja reductoras	23
2.12	Equipos de laboratorio para el análisis de aceites lubricantes industriales	25
2.12.1	<i>Viscosímetro rotacional</i>	25
2.12.2	<i>Analizador FluidScan (Espectrómetro Infrarrojo)</i>	26
2.12.3	<i>Densímetro</i>	28
2.12.4	<i>Oil View Check</i>	29
2.13	Normativa ASTM para análisis de aceites lubricantes	30
2.13.1	<i>ASTM D445 (Viscosidad cinemática)</i>	30
2.13.2	<i>ASTM D2270 (Índice de Viscosidad)</i>	30
2.13.3	<i>ASTM D95 (Agua en productos del petróleo)</i>	31
2.13.4	<i>ASTM D6595 (Metales en lubricantes)</i>	31
2.13.5	<i>ASTM D7596 (Recuento y clasificación de partículas) – ISO 4406</i>	31
2.14	Normas aplicadas para el análisis de aceite	31
2.14.1	<i>ASTM D5185</i>	31
2.14.2	<i>ASTM D6304</i>	32
2.14.3	<i>ASTM D445</i>	32
2.14.4	<i>ASTM E2412</i>	32
2.14.5	<i>ISO 11171:1999 – ISO 4406</i>	32
2.14.6	<i>ASTM D664</i>	33
2.15	Lubricación de motorreductores	34
2.15.1	<i>Lubricación forzada</i>	34
2.15.2	<i>Lubricación por baño de aceite o salpicadura</i>	34

2.16	Pruebas analíticas que permiten monitorear el aceite	35
------	--	----

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	37
3.1	Diseño metodológico.....	37
3.1.1	Investigación bibliográfica.....	37
3.1.2	Diseño de protocolo	37
3.1.3	<i>Caracterización del aceite</i>	37
3.1.4	<i>Ejecución de toma de muestras y pruebas de laboratorio</i>	38
3.1.5	<i>Definir límites condenatorios</i>	38
3.1.6	<i>Metodología SACODE</i>	38
3.1.7	<i>Diagnosticar y establecer acciones</i>	38
3.2	Protocolo para la toma de muestras e identificación del aceite.....	39
3.2.1	<i>Materiales para la toma de muestra del aceite</i>	40
3.2.2	<i>Método de la bomba de muestreo</i>	40
3.2.3	<i>Proceso de toma de muestra</i>	42
3.3.	Protocolo para la realización de las pruebas del análisis de aceite	44
3.3.1	<i>Procedimientos, Equipos, y Materiales para los análisis de aceites en laboratorio de tribología de la ESPOCH</i>	45
3.3.2	<i>Procedimiento, equipos y materiales para los análisis en un laboratorio certificado</i>	49
3.4	Límites condenatorios críticos para aplicar en el análisis de aceite.....	50
3.5	Caracterización del aceite mineral GEARBOX 320 EP	57
3.5.1	<i>Propiedades iniciales del aceite nuevo aportadas por el catálogo del fabricante</i>	58
3.5.2	<i>Propiedades iniciales del aceite nuevo aportadas por laboratorio privado</i>	58
3.5.3	<i>Propiedades iniciales del aceite nuevo aportadas por los equipos de laboratorio</i>	59
3.6	Ejecución de la toma de muestras	60
3.6.1	<i>Muestreo con manguera y bomba de vampiro</i>	60
3.7	Realización de las pruebas en el laboratorio de tribología.....	65
3.8	Análisis con la Metodología SACODE.....	65
3.8.1	<i>Salud (SA)</i>	66
3.8.2	<i>Contaminación (CO)</i>	66
3.8.3	<i>Desgaste (DE)</i>	67
3.9	Análisis de aceite lubricante mediante la metodología SACODE	69
3.10	Parámetros para analizar	70
3.11	Interpretación de los análisis de laboratorio	72

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	73
4.1.	Salud del lubricante	73
<i>4.1.1</i>	<i>Análisis de viscosidad.....</i>	<i>73</i>
<i>4.1.2</i>	<i>Análisis de dieléctrico.....</i>	<i>74</i>
<i>4.1.3</i>	<i>Análisis de TAN.....</i>	<i>75</i>
<i>4.1.4</i>	<i>Análisis de oxidación y sulfatación.....</i>	<i>76</i>
<i>4.1.5</i>	<i>Análisis de molibdeno, calcio, fósforo, zinc, magnesio, boro, sodio y potasio</i>	<i>77</i>
4.2	Contaminación del lubricante	83
<i>4.2.1</i>	<i>Aluminio</i>	<i>83</i>
<i>4.2.2</i>	<i>Silicio</i>	<i>84</i>
<i>4.2.3</i>	<i>Agua.....</i>	<i>84</i>
<i>4.2.4</i>	<i>Código de limpieza</i>	<i>85</i>
4.3	Desgaste.....	87
<i>4.3.1</i>	<i>Hierro</i>	<i>87</i>
<i>4.3.2</i>	<i>Cobre</i>	<i>88</i>
<i>4.3.3</i>	<i>Cromo</i>	<i>88</i>
<i>4.3.4</i>	<i>Estaño.....</i>	<i>88</i>
<i>4.3.5</i>	<i>Plata.....</i>	<i>89</i>
4.4	Programa de lubricación	91
	CONCLUSIONES.....	95
	RECOMENDACIONES.....	97
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Función de los aditivos en el aceite.....	13
Tabla 2-2:	Elementos contaminantes y su origen	19
Tabla 3-2:	Elementos de desgaste y su origen.....	19
Tabla 4-2:	Grados SAE de viscosidad para lubricantes de engranes automotrices.	21
Tabla 5-2:	Grados de viscosidad ISO.....	22
Tabla 6-2:	Ensayos para evaluar la conformidad de los aceites.....	23
Tabla 7-2:	Especificaciones técnicas del equipo	25
Tabla 8-2:	Especificaciones operacionales FluidScan.....	26
Tabla 9-2:	Categorías y propiedades del aceite	27
Tabla 10-2:	Especificaciones técnicas.....	28
Tabla 11-2:	Especificaciones técnicas de Oil View Check.....	29
Tabla 12-2:	Código ISO de limpieza.....	33
Tabla 13-2:	Pruebas de laboratorio a aceites usados de acuerdo con el tipo de servicio.....	35
Tabla 1-3:	Pruebas de equipos de laboratorio.....	49
Tabla 2-3:	Valores máximos o mínimos permisibles para diferentes pruebas de laboratorio bajo las normas ASTM.	51
Tabla 3-3:	Interpretación del análisis de la muestra de aceite lubricante, según Detroit Diesel Co.	52
Tabla 4-3:	Análisis y cambio de lubricante según el fabricante del reductor de velocidad.	52
Tabla 5-3:	Equivalencias entre los diferentes sistemas de clasificación de la viscosidad. ..	53
Tabla 6-3:	Límites para cajas automáticas VOITH.	54
Tabla 7-3:	Límites condenatorios de la norma ISO 4406.	54
Tabla 8-3:	Límites condenatorios de grupo SKF.....	55
Tabla 9-3:	Comparación de límites condenatorios.	55
Tabla 10-3:	Límites permisibles en las muestras de aceite.....	56
Tabla 11-3:	Propiedades del aceite mineral Gearbox EP 320.....	58
Tabla 12-3:	Propiedades del aceite nuevo aportadas por el laboratorio certificado.	58
Tabla 13-3:	Propiedades del aceite nuevo.	59
Tabla 14-3:	Identificación de las muestras.	65
Tabla 15-3:	Tipos de contaminantes.	67
Tabla 16-3:	Problemas y causas de la contaminación.	67
Tabla 17-3:	Valores estadísticos de hierro.	68
Tabla 18-3:	Distribución normal de hierro.	69
Tabla 19-3:	Valores de referencia de hierro.	69
Tabla 17-3:	Parámetros para interpretar del análisis del aceite.....	70

Tabla 18-3:	Estructura de técnica SACODE.....	71
Tabla 1-4:	Resultados de la salud del aceite.....	73
Tabla 2-4:	Límites condenatorios de aditivos.....	78
Tabla 3-4:	Resultados de la contaminación del aceite.....	83
Tabla 4-4:	Códigos y tamaños de limpieza de las muestras de aceite.....	85
Tabla 5-4:	Límites de limpieza del fabricante.....	86
Tabla 6-4:	Límites de limpieza de SKF.....	86
Tabla 7-4:	Resultados de partículas de desgaste del aceite.....	87
Tabla 8-4:	Resultados de las propiedades y elementos estudiados en el análisis de aceite.	89
Tabla 9-4:	Fallo en la aditivación del aceite.....	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-2:	Clasificación de aceites lubricantes	8
Ilustración 2-2:	Características de los lubricantes.....	9
Ilustración 3-2:	Tipos de aditivos.	13
Ilustración 4-2:	Funciones del lubricante.....	17
Ilustración 5-2:	Tipos de falla en engranajes	24
Ilustración 6-2:	Viscosímetro rotacional.....	25
Ilustración 7-2:	Analizador FluidScan.....	27
Ilustración 8-2:	Densímetro	28
Ilustración 9-2:	Oil View Check.....	30
Ilustración 1-3:	Diagrama del diseño metodológico	39
Ilustración 2-3:	Etiqueta para el análisis del lubricante	40
Ilustración 3-3:	Bomba de vampiro	41
Ilustración 4-3:	Tubo plástico de 5/16 de pulgada.....	41
Ilustración 5-3:	Envases plásticos.....	42
Ilustración 6-3:	Pasos para la toma de muestra del aceite.....	43
Ilustración 7-3:	Proceso de ejecución del análisis de aceite.....	44
Ilustración 8-3:	Materiales para la utilización del densímetro (Guantes, muestra de aceite, papel absorbente y alcohol).....	45
Ilustración 9-3:	Materiales para la utilización del FluidScan (Guantes, muestra de aceite, pipeta de 1 ml., papel absorbente y alcohol).....	46
Ilustración 10-3:	Materiales para la utilización del Oil View Check (Guantes, muestra de aceite, jeringuillas de 5 ml., diésel, papel absorbente y alcohol)	47
Ilustración 11-3:	Sistema de clasificación de la viscosidad	53
Ilustración 12-3:	Muestreo con manguera y bomba de vampiro.....	61
Ilustración 13-3:	Limpieza de la superficie en la bayoneta.....	62
Ilustración 14-3:	Acople del envase plástico	62
Ilustración 15-3:	Acople de la manguera con la bomba de vampiro	63
Ilustración 16-3:	Toma de muestra del aceite	63
Ilustración 17-3:	Sellado del envase y desecho de manguera	64
Ilustración 18-3:	Adosado de membrete	64
Ilustración 1-4:	Gráfica de viscosidad	74
Ilustración 2-4:	Gráfica de dieléctrico	75
Ilustración 3-4:	Gráfica de número de ácidos totales.....	75
Ilustración 4-4:	Gráfica de oxidación	76
Ilustración 5-4:	Gráfica de sulfatación	77

Ilustración 6-4:	Gráfica de molibdeno	78
Ilustración 7-4:	Gráfica de calcio	79
Ilustración 8-4:	Gráfica de fósforo	80
Ilustración 9-4:	Gráfica de zinc	80
Ilustración 10-4:	Gráfica de magnesio.....	81
Ilustración 11-4:	Gráfica de boro.....	81
Ilustración 12-4:	Gráfica de sodio	82
Ilustración 13-4:	Gráfica de potasio	82
Ilustración 14-4:	Gráfica de aluminio.....	83
Ilustración 15-4:	Gráfica de silicio	84
Ilustración 16-4:	Gráfica de agua	85
Ilustración 17-4:	Gráfica de hierro	88
Ilustración 21-4:	Gráfica de muestreo de sistemas hidráulicos	92
Ilustración 22-4:	Gráfica de punto de muestro de sistema hidráulicos.....	93

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS DE ACEITE CON EL DENSÍMETRO.

ANEXO B: ANÁLISIS DE ACEITE CON EL EQUIPO DE FLUIDSCAN

ANEXO C: ANÁLISIS DE ACEITE CON OIL VIEW CHECK

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue monitorear el aceite mineral Gearbox 320 de Extrema Presión, en una caja reductora de engranes. La interpretación de los análisis de aceite se lo llevo a cabo mediante la metodología SACODE, la cual comprende un estudio de la salud, contaminación y degradación del lubricante. Por lo cual se hizo uso de las siguientes fases: primera fase se obtuvo la caracterización y formulación del aceite nuevo y en la segunda conocer la degradación en función al tiempo de uso, y la implementación de un programa de lubricación. Se estudiaron 7 muestras, 6 de estas fueron de aceite usado y 1 de aceite virgen con ello se obtuvo las propiedades como: viscosidad, dieléctrico, ácidos totales, formulación del aceite y código ISO de limpieza, así como los aditivos, elementos de contaminación y desgaste mediante un análisis elemental, se determinaron los límites condenatorios de cada variable mediante valores numéricos, porcentuales y estadísticos. Para el análisis de degradación se utilizó gráficas con los límites calculados mediante el uso de la línea base como referencia del aceite nuevo y el comportamiento de cada variable, dando como resultado que los elementos de aditivación se encuentran por debajo del límite crítico. Se concluye que el aceite mantiene sus propiedades a excepción de la aditivación y el número de ácidos totales por lo cual no cumple con las características mínimas de funcionamiento. Se recomienda el cambio de lubricante y una toma de muestras con una frecuencia más reducida.

Palabras clave: <ACEITE MINERAL GEARBOX 320>, <METODOLOGÍA SACODE>, <DEGRADACIÓN DEL LUBRICANTE>, <PROPIEDADES DEL ACEITE>, <PROGRAMA DE LUBRICACIÓN>.

1410-DBRA-UPT-2023



Ing. César de Castilla



SUMMARY

The objective of the present investigation was to monitor the Extreme Pressure Gearbox 320 mineral oil, in a gear reduction box. The interpretation of the oil analysis was carried out using the SACODE methodology, which includes a study of the health, contamination and degradation of the lubricant. Therefore, the following phases were used: first phase, the characterization and formulation of the new oil was obtained and in the second, the degradation was determined based on the time of use, and the implementation of a lubrication program. 7 samples were studied, 6 of these were used oil and 1 virgin oil, with which properties were obtained such as: viscosity, dielectric, total acids, oil formulation and ISO cleaning code, as well as additives, contamination elements and wear through an elemental analysis, the condemnatory limits of each variable were determined through numerical, percentage and statistical values. For the degradation analysis, graphs were used with the limits calculated by using the baseline as a reference for the new oil and the behavior of each variable, resulting in the guessing elements being below the critical limit. It is concluded that the oil maintains its properties except for guessing and the number of total acids, for which it does not meet the minimum operating characteristics. It is recommended to change the lubricant and take samples more frequently.

Keywords: <GEARBOX 320 MINERAL OIL>, <SACODE METHODOLOGY>, <LUBRICANT DEGRADATION>, <OIL PROPERTIES>, <LUBRICATION PROGRAM>.



Lic. Luis Francisco Mantilla Cabrera Mgs.

CI:0603747809

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento es el conjunto de técnicas propuestas a observar e intervenir en equipos e instalaciones que se encuentran en servicio. El personal encargado de dirigir el mantenimiento se enfoca en la búsqueda de nuevos caminos, para evitar equivocarse cuando se toma alguna acción en los equipos, es por ello por lo que se debe involucrar el mantenimiento predictivo para evaluar la maquinaria e intervenir en función a su estado, transformando la relación entre el personal involucrado, la planta y el equipo de trabajo que está en la obligación de mantener los equipos funcionales. Este proyecto tiene como finalidad ejecutar una metodología para monitorear el aceite lubricante de un motorreductor a través de pruebas de laboratorio, basado en la necesidad que presenta la empresa minera BIRA S.A. de conocer la condición y evaluación del aceite

Los aceites lubricantes al momento de entrar en uso comienzan a cambiar sus valores de viscosidad, pierden sus niveles de aditivos, las condiciones ambientales como la temperatura, aire o humedad crea oxidación entre otras propiedades vulnerables para el aceite.

El análisis de aceite es una poderosa herramienta para el monitoreo de condición, constituye soporte en el mantenimiento predictivo que busca alargar la vida e incluye incrementar la confiabilidad de los equipos acarreado ventajas económicas.

La presente investigación se desarrolla como parte de un monitoreo en una planta minera ubicada en el cantón Portovelo, en la provincia de El Oro, Ecuador. Dicha planta posee un molino de bolas el cual tiene acoplado un motorreductor para transmitir la potencia, en la empresa los análisis de aceite que realizan se basan en límites condenatorios optados por los laboratorios certificados, lo cual no siempre es lo más indicado para conocer la evaluación del aceite si no que se debe evaluar con los parámetros del fabricante o de otra normas internacionales de esta manera se llega a tener interpretaciones más exitosas y optar por acciones más tempranas.

Dichos límites condenatorios son amplios y se deben centrar en los parámetros más importantes que presenta la metodología SACODE de análisis de aceite, esta ha sido previamente aplicada con éxito en autores como Arellano (Arellano, 2017, p. 22) y Maldonado (Martins, 2010, p. 2 - 3) y reconocida por otros como Noria Corporation la cual es una empresa con presencia en Latinoamérica con más de 18 años de experiencia en la implementación de programas de lubricación de maquinaria y análisis de aceite.

El presente trabajo persigue el objetivo de organizar e implementar una primera etapa del análisis de aceite, basado en dicha metodología SACODE, que permita evaluar adecuadamente su estado,

a partir de datos experimentales de propiedades de esta sustancia, determinados en el laboratorio de la Facultad de Mecánica y complementando con un laboratorio de análisis certificado.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

En la tesis doctoral realizada en la Universidad Politécnica de Valencia nombrada “Contribución al desarrollo y mejora para la cuantificación de la degradación en aceites lubricantes usados de MCI A a través de la técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR)”, identifican que existen factores que intervienen en la degradación de un aceite, como es el caso de las partículas metálicas que pueden estar presentes en el lubricante como es el cobre, compuestos ferrosos, materias extrañas u otros productos de oxidación, que logran que el aceite aumente el problema de la degradación (Gómez, 2013, p. 37).

En la revista científica y tecnológica UPSE con su artículo de “Salud del lubricante y comportamiento de los aditivos en vehículos tipo turismo”, se refiere que en los cambios de temperatura propios de la operación de un motor de combustión interna, provoca un comportamiento de oxidación y nitratación con base en la viscosidad, sus estudios demuestran que la viscosidad del aceite se llega a reducir un 22% y por ello la salud del lubricante se encontró en su límite de condición operativa (Antamba et al., 2021, p. 38).

En el artículo “Determination of power losses in worm gear reducer” se menciona que el aceite tiene una gran importancia en cajas reductoras de engranajes helicoidales, mayor eficacia y una menor pérdida con el uso de aceites sintéticos en comparación con aceites minerales para lubricación, tomaron en cuenta que los aceites sintéticos son más costosos que los minerales, pero demuestran ventajas con el tiempo de uso del equipo en base a la viscosidad de los lubricantes que reducen al máximo las pérdidas de energía (Radosavljević et al, 2018, pp. 1 - 5).

En estudios realizados en la ciudad de Arequipa - Perú se desarrollaron “Análisis de detección de fugas de aceite en los reductores de velocidad de una prensa de lavado” donde identificaron las principales causas de fallas en un reductor de velocidad, siendo la fuga de aceite una de ellas. Mediante un estudio conocieron que los retenes no eran aptos para la especificación del elemento, produciéndose así entradas de agua lo que generó vapor de agua dentro del reductor de provocando así perjuicios como la pérdida del propio equipo, además de afectar negativamente a los costos de mantenimiento (Amésquita, 2019, pp. 34 - 37).

En una investigación en Arequipa – Perú, específicamente en Puerto Bravo, Mollendo, se desarrolló un estudio nombrado “Plan de mantenimiento proactivo centrado principalmente en el análisis de aceite en los reductores de velocidad utilizados para calentamiento y enfriamiento uniforme en turbinas de gas de la central termoeléctrica en Puerto Bravo, Mollendo- Arequipa”, dando a conocer que en el arranque de las unidades de generación de los principales equipos rotativos, los reductores de velocidad son los equipos más críticos. Aplicando un análisis causa raíz dieron a conocer que el principal modo de falla para la indisponibilidad del equipo es la contaminación del lubricante siendo sus principales causas las físicas, humanas, ambientales y latentes (Zeballos, 2021, p. 5 - 7).

En la universidad Nacional de Colombia se desarrolló la investigación “Las fallas en los engranajes” donde resumen que las fallas comunes en estos elementos mecánicos se suscitan en desgaste, fatiga superficial, flujo plástico, rotura de dientes y fallas combinadas, estos fenómenos se presentan por las condiciones de funcionamiento en velocidad y carga, así como también en las características del diseño de los engranajes, lubricación y las altas temperaturas de operación a las que están expuestas (Benítez, 1985, p. 41).

Ingresando en el contexto de Ecuador, específicamente en la Universidad Politécnica Salesiana, se ha desarrollado el trabajo de investigación de “Estudio de implementación del sistema de mantenimiento predictivo en la compañía Ecuatoriana del Caucho ERCO” donde se recomienda aprovechar los análisis de aceite como una herramienta altamente productiva que deben utilizar los ingenieros de confiabilidad o mantenimiento y explicando los análisis de laboratorio que se deben aplicar a las propiedades físicos-químicos del aceite usado con el tipo de mecanismo que está empleando (Cherres y Ñauta, 2015, p. 142).

1.2. Delimitación

La presente propuesta de investigación pretende realizar pruebas en el motorreductor FALK modelo 2090FC2B9.257 empleado para el funcionamiento de un molino de bolas con una potencia de 100 HP y una relación de transmisión 9.257, además se evaluará el aceite mineral GEARBOX 320 EP que se está utilizando con los equipos del laboratorio de tribología de la Facultad de Mecánica y el análisis de laboratorio de una empresas particular con el fin de conocer otros parámetros que influyen para conocer la degradación del aceite lubricante, así mismo se validara el aceite teniendo en cuenta las condiciones iniciales del lubricante con pruebas iguales a las del trabajo con la finalidad de obtener una comparativa entre lo ocurrido con el número de horas expuesto a su funcionamiento, donde la evaluación de resultados se focalizará en la

degradación del aceite contemplando así un análisis analítico. Con el análisis de cada propiedad y la ayuda de gráficos y comparación de los límites de la degradación con el tiempo de funcionamiento se indicará cual es el límite de uso del lubricante que permitirá determinar su resistencia, con el fin de que presente mayores beneficios para la producción de la empresa minera BIRA S.A. La evaluación y toma de las muestras se realiza considerando las facilidades con las que se puede ingresar a la empresa y las limitaciones que se tiene para extraer el aceite.

1.3. Formulación del problema

En la actualidad el uso de equipos mecánicos permite un desempeño eficiente en el desarrollo de tareas, motivo por el cual ya no es necesario utilizar recursos humanos en ciertas actividades. Industrialmente hablando, la búsqueda incesante de facilitar a los usuarios el desempeño de sus actividades mediante dispositivos innovadores ha involucrado a la ingeniería como una fuente potencial para la generación de opciones, por lo que se busca un beneficio de los equipos mecánicos para reducción de velocidad y transmisión de potencia. Por lo general, no todas las actividades presentan los mismos parámetros de desempeño, por lo que existe una gran cantidad de industria dentro del campo, encontrando la presencia de equipos motorreductores de producción nacional.

La empresa minera BIRA S.A., ubicada en la provincia de El Oro, cantón Portovelo, en su planta de beneficio no justifica la selección y la validación de los aceites lubricantes y carece de un protocolo de pruebas y evaluación de análisis de aceite. Este tipo de máquinas industriales demanda de un alto costo de producción por lo que la confiabilidad del equipo puede aumentar al analizar el comportamiento del lubricante. Se estudiará la degradación que se presenta actualmente en el aceite Gearbox 320 EP con el fin de evaluar y conocer si está siendo controlada.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Monitorear la degradación de un aceite lubricante Gearbox 320 en un motorreductor.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar una investigación bibliográfica sobre la lubricación de motorreductores y las pruebas analíticas que permitan evaluar la degradación del aceite.
- Proponer un protocolo de toma de muestra para la evaluación de la degradación del aceite

del motorreductor.

- Caracterizar el aceite que se utiliza en la lubricación del motorreductor para obtener las características físico químicas referenciales y poder evaluar su degradación.
- Realizar la toma de muestra y el análisis del aceite en servicio para evaluar el comportamiento de la degradación en el motorreductor.
- Analizar los resultados y elaborar las recomendaciones del programa de lubricación del motorreductor para asegurar su vida útil.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Lubricantes

Los lubricantes tipo aceites pueden ser minerales o sintéticos. Los aceites minerales se fabrican en base a fracciones pesadas de petróleo los cuales contienen residuos metálicos, metales y aditivos los cuales mejoran el desarrollo de los equipos rotativos.

Los aceites sintéticos que hoy en día se remplazan por los aceites minerales a gran escala, esto se da debido a que son fabricados en base a polímeros los cuales mediante análisis se logró conocer que tiene mejores propiedades reológicas (Trujillo, 2016, pp. 18 - 21).

La sustancia sólida, líquida o gaseosa que se introduce en dos superficies móviles y tiene la finalidad de reducir la fricción, desgaste y disipar la temperatura de los elementos de máquina se conoce como lubricante (Altmann, 2016, p. 23).

Cabe destacar que los lubricantes tienen una clasificación que se basa en normativas estandarizadas e internacionales como se las menciona a continuación en el apartado 2.2.

2.2. Clasificación de aceites lubricantes

El proceso para la selección del tipo de aceite lubricante está en la búsqueda del mejor rendimiento que se puede efectuar en los equipos rotatorios con un desgaste mínimo que permita que los elementos de transmisión de potencia conserven su vida útil y tengan una confiabilidad alta en los equipos de manera que cumplan las solicitudes a las cuales estarán sometidos.

Los aceites lubricantes para transmisiones se pueden clasificar como se muestra en la Ilustración 1-2.

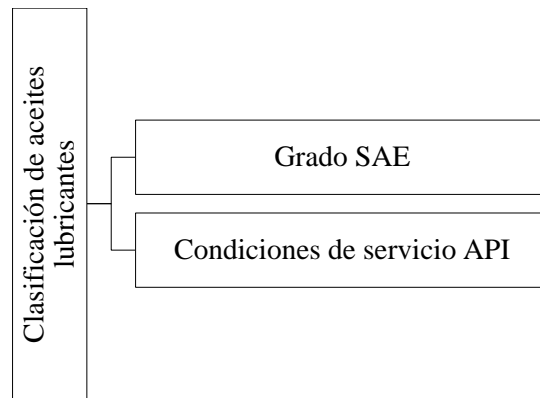


Ilustración 1-2: Clasificación de aceites lubricantes

Fuente:(INEN, 2015).

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

- **Clasificación grado SAE:** La norma J 300 define la clasificación del aceite como el grado de viscosidad conforme a un valor, cuanto más alto sea el índice mayor será la preservación de la viscosidad a altas temperaturas, si el valor es pequeño el aceite será viscoso a una temperatura ambiente y a grandes temperaturas el aceite disminuirá su viscosidad. La norma SAE clasifica y define los límites de los aceites lubricantes en términos reológicos (Noria, 2013, p. 1 - 2).
- Aceites monogrado cuando las temperaturas no varían significativamente durante el funcionamiento del equipo.
- Aceites multigrado ofrecen un grado de viscosidad en invierno y verano viene dado con la sigla W en su identificación.
- **Condiciones de servicio API:** La categoría API tales como GL-4, GL-5, GL-6, MT-1 definen el nivel de desempeño del lubricante.
 - **API GL-4.** Designa características en transmisiones manuales y diferenciales que constan de engranes hipoidales en las condiciones de bajo torque y alta velocidad y alto torque y baja velocidad.
 - **API GL-5.** Designa características en diferenciales y transmisiones manuales que constan de engranes hipoidales con mecanismos de autobloqueo con las condiciones de alta velocidad y bajo torque o baja velocidad y alto torque.
 - **API GL-6.** Designa características en transmisiones manuales y diferenciales diseñados para una alta compensación en los piñones.
 - **API MT-1.** Designa características de servicio en transmisiones manuales que no son asincrónicas, poseen una alta estabilidad térmica y una mejor protección contra el desgaste

en componentes y deterioro de sellos.

Con la ayuda de la clasificación de los aceites lubricantes debemos tener en cuenta sus primordiales características para un correcto funcionamiento en los equipos

2.3. Características de aceites lubricantes

Un lubricante es una sustancia líquida capaz de disminuir la fricción y el desgaste entre dos superficies sólidas en contacto, en la Ilustración 2-2 se indican las principales características de los aceites lubricantes.

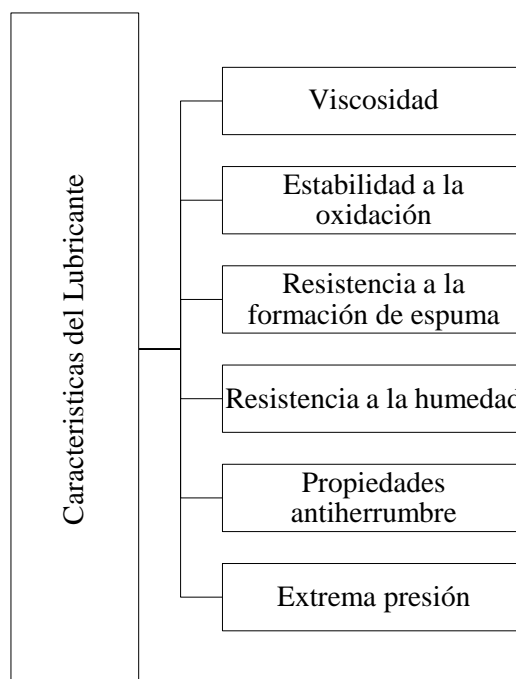


Ilustración 2-2: Características de los lubricantes

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Los aceites semisintéticos son aquellos que su fabricación es la mezcla de los aceites minerales básicos y los aceites básicos sintéticos. Los lubricantes contienen propiedades fisicoquímicas que los hacen característicos para el tipo de aplicación en la industria.

2.3.1. Estabilidad a la oxidación

Desde el punto de vista de la vida de un lubricante la característica más importante de un aceite es su resistencia a la oxidación bajo las condiciones de trabajo.

Los valores de viscosidad, resistencia a la formación de lodos, barnices, corrosión, buena demulsibilidad, resistencia a la formación de espuma, entre otros se deben conservar, es por ello por lo que la resistencia a la oxidación es un factor importante para preservar. La clave para conseguir productos con una alta estabilidad a la oxidación es la calidad del aceite base y la química de los aditivos (Teradillos & Ciria, 2003, p. 3).

El envejecimiento de un aceite se reduce con la estabilidad de un aceite. El comportamiento del lubricante está relacionado con un cambio de viscosidad y aumento del índice de acidez, si este aumenta notablemente los fabricantes de aceite recomiendan un drenaje y cambio de aceite (Mang & Dresel, 2007, p. 268).

2.3.2. Resistencia a la formación de espuma

La cantidad de espuma generada en los aceites básicos depende del grado de refinación del crudo y estos tienden a formar espuma cuando se someten fuertes agitaciones. La pobre capacidad del lubricante (mezcla aire-aceite) es el efecto negativo de la formación de la espuma, que se reduce en una mayor oxidación del aceite por contacto prolongado con el aire y en ciertos casos a una reducida refrigeración es por ello que los aditivos antiespumantes tienen la función de reducir la tensión superficial de las burbujas de aire, permitiendo así formar burbujas mayores que son más fáciles de destruirse, estos aditivos son utilizados en la gran mayoría de las formulaciones de aceites lubricantes (Flores, 2012, p. 13).

2.3.3. Resistencia a la humedad

La humedad en los aceites genera emulsiones que forman depósitos junto con la suciedad, así como la herrumbre y corrosión que afecta al sistema de lubricación, incrementado además la viscosidad del lubricante. Los aditivos detergentes se degradan aumentando el potencial corrosivo de los ácidos o productos que forman al combinarse. En los metales hierro, cobre y plomo promueve la oxidación ya que también actúa como un catalizador (Fong et al., 2017, p. 141).

La humedad reduce la película lubricante e interfiere con la lubricación dejando las piezas susceptibles al desgaste abrasivo, adhesivo y fatiga.

2.3.4. Propiedades antiherrumbre

Cuando el aceite se contamina con agua provoca el herrumbre en las aleaciones ferrosas, es por eso que la antiherrumbre son compuestos orgánicos generalmente, que previenen la formación de

herrumbre en distintas formas que el agua tiene contacto con el metal, de esta manera se logra formar una superficie protectora (Alvarez, 2019, p. 24).

2.3.5. Extrema presión

Cuando las cargas aumentan a tal punto que los aditivos de lubricidad no tienen efecto, se busca un aditivo de alta resistencia que comúnmente se lo conoce como extrema presión.

El azufre, cloro y fósforo son los elementos químicos que han demostrado mayor efectividad, las condiciones orgánicas que contienen estos elementos forman películas que protegen a la superficie debido a que reaccionan a ciertas temperaturas con la superficie metálica.

Las combinaciones cloradas y sulfuradas forman una capa cuya estructura blanda disminuye el coeficiente de fricción. La acción de los compuestos del fósforo radica en la formación de compuestos con el metal, por lo cual la carga se logra distribuir sobre un área mayor y las condiciones de temperatura se hacen menos extremas esto es debido a la fluidez de las aleaciones formadas, las cuales permiten extenderse sobre las superficies metálicas (Gooding, 2009, p. 46).

2.4. Propiedades fisicoquímicas de los lubricantes

Las características que hacen que un aceite pueda ejecutar el trabajo en sistemas de lubricación de maquinaria deben cumplir con ciertas funciones mencionadas a continuación que permiten evaluar el estado del aceite durante su funcionamiento.

2.4.1. Aceite base

Los aceites base es el componente imprescindible en los lubricantes, representando hasta el 95% del contenido. La familia de lubricantes contienen aditivos que dependiendo de la aplicación tendrán un porcentaje, representando para aceites hidráulicos o compresores con el 1% mientras que para el trabajo de fluidos con metales o lubricantes de engranajes se trabaja con 30% de aditivos (Mang & Dresel, 2007).

2.4.2. Demulsibilidad

La demulsibilidad en un aceite lubricante es la capacidad que tiene en condiciones normalizadas de separarse del agua, realizado el contacto entre el agua y el aceite se hace una fuerte agitación de los fluidos observándose como se produce su separación de esta forma se logra conocer la

capacidad del aceite para la eliminación del agua por decantación (Álvarez, 1999, p. 181).

2.4.3. Número de neutralización

Se puede representar en cuatro distintos valores

1. Número de ácido total (TAN): determina los constituyentes ácidos en la muestra de aceite, débiles y fuertes.
2. Número de ácido fuerte (SAN): determina el contenido de ácidos fuertes.
3. Número de base total (TBN): determina constituyentes alcalinos.
4. Número de base fuerte: determina componentes fuertemente alcalinos.

En un aceite la acidez y la alcalinidad llegan a dar indicaciones de su grado de refinado, aditivación, contaminantes y especialmente en el seguimiento de su aplicación en función de la evolución de otras características del lubricante.

A un TBN alto corresponde un TAN bajo, demostrando un elevado contenido de aditivo detergente-dispersante, eficiente separación del carbón y buena limpieza. A un TAN alto corresponde un TBN bajo, implicando así la destrucción del aditivo y eminente poder corrosivo del lubricante (Álvarez, 1999, pp. 156 - 160).

2.4.4. Aditivos de lubricantes

Los aditivos son sustancias que en pequeñas cantidades ayudan a los aceites lubricantes a mejorar e incluir propiedades necesarias para cumplir con las condiciones de explotación y un mejor rendimiento, así como en la transportación y mantenimiento.

Los aditivos empleados deben incluir condiciones como solubilidad en altas y bajas temperaturas en un rango de bases lubricantes, resistentes a la degradación mientras son expuestos a su servicio, la toxicidad y contaminación no deben ser un factor en la formulación final. Los aditivos deben tener un bajo costo con los requerimientos mencionados debido a su comercialización (Gooding, 2009, pp. 51 - 58).

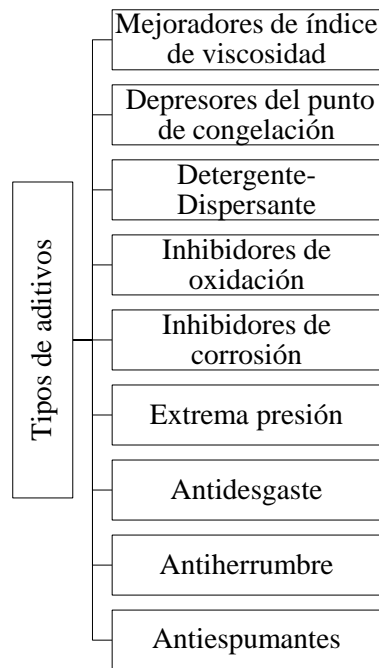


Ilustración 3-2: Tipos de aditivos.

Fuente: (Gooding, 2009, pp. 51 - 58)

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Los aditivos influyen de gran medida en la formulación del aceite, a continuación, se presentan la tabla 1-2 con los elementos más influyentes.

Tabla 1-2: Función de los aditivos en el aceite

Aditivo	Función
Molibdeno	Aditivo de extrema presión o un lubricante solido en los aceites o grasas, es un inhibidor de la corrosión en algunos refrigerantes convencionales o aditivos complementarios
Calcio	El calcio es un detergente, dispersante, incrementador de alcalinidad.
Fósforo	Antidesgaste, reductor de depósitos en la cámara de combustión; inhibidor de corrosión en refrigerantes.
Zinc	El zinc funciona como un elemento antidesgaste, antioxidante, inhibidor de corrosión.
Magnesio	Detergente, dispersante, incrementador de alcalinidad
Boro	Detergente, dispersante; antioxidante en aceites y refrigerantes

Fuente:(Delgado, et al., 2008, p. 23)

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

2.4.5. Viscosidad

Es la característica de la distribución del aceite en toda la superficie de contacto, formando capas finas protectoras de presiones, temperaturas y velocidades existentes (Gooding, 2009, p. 25).

La viscosidad es la característica de un fluido que mide el esfuerzo de corte a la razón de deformación de una partícula de fluido, es una propiedad que depende de la temperatura y los fluidos newtonianos es independiente de la razón de esfuerzo aplicado y de la razón de deformación a contrario de los fluidos no newtonianos debido a que la viscosidad varía con la razón de deformación (Cenguel y Cimbala, 2006, p. 929).

La viscosidad es la propiedad más importante a tener en cuenta en los aceites lubricantes, en esencia cuanto más grueso sea el lubricante mayor será su viscosidad y será más resistente a fluir. Los métodos más aplicados para conocer esta característica se basan en medir el tiempo requerido de una cantidad de aceite con una temperatura especificada para fluir a través de un orificio con dimensiones establecidas por efecto de la gravedad. Los métodos más comunes para medir la viscosidad son Saybolt (ASTM D88) que se encuentra con más frecuencia y el cinemático (ASTM D445) que generalmente se lo considera como el más preciso.

2.4.5.1. Índice de viscosidad

El índice de viscosidad demuestra cuanto el fluido cambia con la temperatura. Es ampliamente utilizado cuando se emplean los fluidos hidráulicos y aceites lubricantes que utilizan los equipos cuando el rango de la temperatura es extremo en su operación.

El índice de viscosidad alto en un fluido muestra un cambio pequeño con la temperatura. Un fluido con un índice alto de viscosidad muestra un gran cambio con la temperatura (Mott, 2006, p. 33).

2.4.6. Punto de fluidez

El punto de fluidez es la temperatura expresada en múltiplos de 3°C más baja a la cual se observa la no fluidez cuando es examinado con ciertas condiciones. Esta propiedad expresa el límite de la aplicación a bajas temperaturas con una gran importancia en los sistemas de refrigeración (Álvarez, 1999, pp. 24 - 25).

2.4.7. Densidad

Es la relación existente entre la masa y el volumen de un aceite considerándose a una temperatura normalizada de 20 grados centígrados, las unidades son gramos sobre centímetro al cubo (g/cm^3).

2.4.8. Peso específico

Es la relación entre el peso y el volumen de un aceite a una temperatura específica, las unidades son Newton sobre milímetros al cubo (N/mm^3).

2.4.9. Color y Fluorescencia

La fluorescencia es una de las características que carecen de valor en el criterio de evaluación de los aceites terminados, esto es debido a que pueden ser modificados o encubiertos por los aditivos. Sin embargo, los usuarios daban una gran importancia al color del aceite, como indicativo de un mejor o peor grado de refino, mientras tanto que la fluorescencia se tomaba como indicativo del origen crudo.

Así se mencionó que la fluorescencia azulada caracterizaba los aceites artificiales mientras tanto que la verde como los parafínicos (Torres, 2011, p. 15).

Los lubricantes que contienen características como las mencionadas anteriormente tienen un campo aplicativo muy extenso, es por ello por lo que se deben clasificar para cada tipo de aplicación industrial.

Es por ello por lo que conociendo las características de los aceites lubricantes se puede interpretar las propiedades del aceite lubricante estudiado y sus beneficios en la industria.

2.5. Aceite Gearbox EP

El aceite Gearbox EP es diseñado con modificaciones de fricción que proporcionan una protección adicional contra el desgaste, mientras operan más tiempo bajo cargas extremas pesadas.

Utilizando este aceite se aumenta la vida útil del engranaje, proporcionando un superior rendimiento de energía lo cual reduce la temperatura de funcionamiento.

Las principales características del producto son:

- Excepcionales características antidesgaste y de extrema presión
- Regula la temperatura
- Resistencia superior a la corrosión
- Excelente resistencia al agua demulsibilidad y características antiespumantes
- Excelentes propiedades antifricción

En el lubricante se producen cambios químicos que influyen directamente en su estado y son influenciados por varios factores, cambiando así su vida útil como son: la explotación del equipo, los contaminantes que se presentan, la naturaleza del básico, tipo y cuantía de los aditivos.

Los procesos de degradación son frecuentemente influenciados por altas temperaturas, oxidación, hidrólisis del aditivo en el aceite lubricante de servicio (Mang & Dresel, 2007).

2.6. Antioxidantes

La vida del lubricante es limitada debido al envejecimiento del material base, debido a que cumplen muchas funciones entre las cuales están transmisión de energía o protección contra el desgaste. La particularidad de los lubricantes cuando se degradan es un cambio de color y un olor a quemado característico, aumentando así la viscosidad del fluido y generar productos ácidos de oxidación que causaran corrosión e inconvenientes en la lubricación. Para el tratamiento del envejecimiento se añaden antioxidantes que retrasan la degradación (Mang & Dresel, 2007, p. 89).

2.7. Caja reductora

Se puede definir a la caja reductora como un grupo de engranajes que trabajando juntos son un mecanismo que sirve para mantener la velocidad de salida a una velocidad que se acerque mucho a la ideal para que el equipo acoplado pueda trabajar con total eficiencia.

Todos los engranajes tienen una vida útil finita a la fatiga, por ello el propósito de los aceites lubricantes es prolongar la duración de estos en base a sus condiciones de operación. El lubricante para engranajes debe cumplir dos funciones elementales, prevenir el desgaste prematuro de los dientes y refrigerar el calor generado por los engranes al medio externo.

Como todos los elementos de una máquina los engranajes tienen una vida finita a la fatiga. El propósito del diseño y de la lubricación de los engranajes es prolongar la vida de éstos, de acuerdo

con las condiciones de trabajo. Un lubricante para engranajes tiene dos funciones principales, prevenir el desgaste entre los dientes, mediante la formación de una película lubricante que impida el contacto metal-metal, servir de medio refrigerante y transportar el calor generado por los engranajes y cojinetes al medio externo.

2.8. Lubricación

Es un procedimiento que se utilizará con el fin de minimizar el roce entre superficies que se encuentren muy próximas entre sí y que a su vez estén ejerciendo un movimiento entre ellas, y para lograr esa reducción de roce se utiliza un lubricante, el cual será el encargado de soportar la carga que se genere entre las superficies previamente mencionadas.

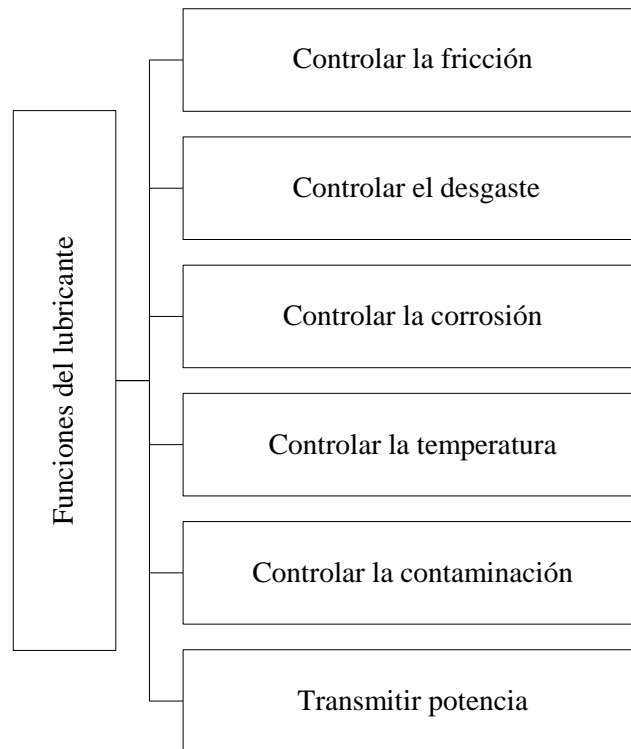


Ilustración 4-2: Funciones del lubricante

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

El mantenimiento se lo define como la administración de elementos activos que dispone una compañía, de modo que el rendimiento de los activos se maximice (Widman, 2005, p. 1).

El mantenimiento puede considerarse como un conjunto de operaciones de recursos humanos, tecnológicos y físicos que llegan a permitir una disminución de producción en las empresas por detenciones inesperadas, logrando así aumentar la disponibilidad de los equipos obteniendo una vida útil mayor y confiabilidad en los equipos.

En las empresas se puede observar que la intervención del mantenimiento programado cumple una función de apoyo en la cual participan actividades que buscan una disminución global de costos en mantenimiento en el transcurso de la vida estimada de los activos.

2.8.1. Análisis de aceites

El análisis de aceites determina el estado de operación de las máquinas a partir del estudio de las propiedades físicas y químicas de su aceite lubricante.

El aceite es muy importante en las máquinas porque sirve la protege del desgaste, controla su temperatura y elimina sus impurezas. Cuando el aceite presenta altos grados de contaminación y/o degradación, no cumple con estas funciones y la máquina comienza a fallar.

La técnica de análisis de aceites permite cuantificar el grado de contaminación y/o degradación del aceite por medio de una serie de pruebas que se llevan a cabo en laboratorios especializados sobre una muestra tomada de la máquina cuando está operando o cuando acaba de detenerse.

El grado de contaminación del aceite está relacionado con la presencia de partículas de desgaste y de sustancias extrañas, por tal razón es un buen indicador del estado en que se encuentra la máquina. El grado de degradación del aceite sirve para determinar su estado mismo porque representa la pérdida en la capacidad de lubricar producida por una alteración de sus propiedades y la de sus aditivos.

La contaminación en una muestra de aceite está determinada por medio de la cuantificación de:

- Partículas metálicas de desgaste
- Combustible
- Agua
- Materias carbonosas
- Insolubles

La degradación en una muestra de aceite está determinada por medio de la cuantificación de las siguientes propiedades:

- Viscosidad
- Detergencia

- Basicidad
- Constante Dieléctrica

La información proveniente de las pruebas físicas y químicas del aceite permite decidir sobre el plan de lubricación y mantenimiento de la máquina (Olarde et al., 2010, p. 225).

Existen elementos metálicos y no metálicos que están presentes en la caja reductora los cuales pueden llegar a influir en la condición del lubricante, en las tablas 2-2 y 3-2 se presentan los elementos más influyentes que permanecen suspendidos en el aceite.

Tabla 2-2: Elementos contaminantes y su origen

Contaminante	Origen
Aluminio	Los óxidos de aluminio presentes en el medio ambiente suelen estar asociados con la contaminación por silicio (suciedad). Cojinetes, bujes, retenedores y arandelas de empuje, tubería del enfriador de aceite.
Silicio	El silicio se asocia típicamente con la contaminación por suciedad. Esta contaminación puede ser el resultado de cualquier condición que permita la entrada de suciedad en un sistema de aceite de componentes. Otras fuentes de silicio incluyen sellos, aditivos de aceite y refrigerante y grasas.
Agua	Empaques o sellos defectuosos del equipo.

Fuente: (Delgado, et al., 2008).

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Los elementos de desgaste son aquellas partículas que se desprenden de los componentes internos del motorreductor.

Tabla 3-2: Elementos de desgaste y su origen

Desgaste	Origen
Hierro	Ejes y engranajes, cojinetes, carcasa
Cobre	Cojinetes, bujes, retenedores y arandelas de empuje, tubería del enfriador de aceite
Cromo	Cojinetes, ejes, sellos
Estaño	Cojinetes, ejes, sellos El estaño puede estar presente como aditivo del aceite, generalmente junto con lubricantes que contienen compuestos de molibdeno.
Plata	Algunos cojinetes y bujes, soldadura del enfriador de aceite, sellos
Titanio	El titanio generalmente se encuentra solo en ciertos aceros comerciales o

	industriales aeroespaciales y de servicio pesado. Algunos ejes, cojinetes y engranajes
Vanadio	El vanadio generalmente se encuentra solo en ciertos aceros comerciales o industriales aeroespaciales y de servicio pesado. También puede estar presente en combustibles como material residual crudo pesado.

Fuente: (Delgado, et al., 2008).

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

La condición del aceite se puede conocer mediante pruebas de infrarrojo, las cuales entregan valores de oxidación y sulfatación es importante conocer el significado de cada resultado para conocer cómo puede influir en la salud del lubricante.

Oxidación: La acidez de un aceite y el agotamiento de los aditivos es el resultado de la oxidación donde se involucra una serie de reacciones químicas entre el oxígeno y altas temperaturas. El grado de oxidación de un aceite es un indicativo de condiciones de funcionamiento anormales acompañada de una degradación del lubricante, los resultados de la prueba se informan en la escala de absorbancia.

Sulfatación: es la medida relacionada con la degradación del lubricante por oxidación del compuesto de azufre, los valores recomendados es entre 15 y 20 Abs/cm (Infraspeak, 2013, p. 1).

2.8.2. Mantenimiento en el interior de una empresa

El propósito de los mantenimientos programados en una empresa tiene como fin de que cumplan con la vida útil esperada, obteniendo así una confiabilidad y disponibilidad en los equipos, manteniendo los equipos e instalaciones productivas en forma continua con las condiciones de funcionamiento predeterminadas. (Olarie et al., 2010, p. 223).

Se logra maximizar la eficiencia y productividad disminuyendo los costos globales en los paros de producción de las empresas.

2.8.3. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo son protocolos u ensayos no destructivos que ayudan a ejecutar un seguimiento del correcto funcionamiento de los equipos industriales y descubrir signos sobre el mal funcionamiento del equipo o si está actuando de manera disfuncional. Con la ayuda de este procedimiento de mantenimiento estratégico en las empresas se logra detectar averías y tomar

acciones oportunas sobre el estado del equipo, haciendo función de paradas programadas a fin de que afecte en lo más mínimo los procesos de producción y aumentando la vida útil de la maquinaria industrial (Olarde et al., 2010, p. 224).

El mantenimiento predictivo es aquel que involucra en sus ramas de estudio los análisis de aceite presentados en la industria el cual permite cuantificar el grado de contaminación u degradación por medio de unas pruebas analíticas llevadas a cabo de laboratorios especializados, tomando una muestra del lubricante utilizado en la maquinaria y verificando su estado actual y deterioro, tomando así decisiones que benefician a los equipos y maquinarias de la empresa.

2.9. Grados de viscosidad

Los grados de viscosidad en los aceites se clasifican en grado SAE para automotores y grado ISO para uso industrial generalmente.

2.9.1. Grado SAE

SAE International implemento un sistema de clasificación de lubricantes para transmisiones de potencia en engranes que nos muestra la viscosidad de los aceites a temperaturas específicas, aplicando los estándares de la norma ASTM D 2983 y ASTM D 445.

Tabla 4-2: Grados SAE de viscosidad para lubricantes de engranes automotrices.

Grado de viscosidad SAE	Temperatura máxima para viscosidad dinámica de 150000 cp*(°C)	Viscosidad cinemática a 100°C (Cst)	
		Mín.	Máx.
70W	-55	4.1	-
75W	-40	4.1	-
80W	-26	7.0	-
85W	-12	11.0	-
80	-	7.0	<11.0
85	-	11.0	<13.5
90	-	13.5	<24.0
140	-	24.0	<41.0
250	-	41.0	-

Fuente:(SAE, 1998).

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

2.9.2. Grados ISO

Es un sistema de clasificación de los lubricantes líquidos, aceites industriales principalmente, nos dice que viscosidad tienen los aceites y así evitamos confusiones a los proveedores, diseñadores y usuarios.

Los lubricantes empleados en trabajos industriales están en un rango grande de viscosidad, los diseñadores de los lubricantes deben tomar en cuenta que el lubricante tolere las capacidades extremas de temperatura con una suficiente capacidad de carga, aplicando ASTM D 2422.

Tabla 5-2: Grados de viscosidad ISO

Grado ISO VG	Viscosidad cinemática a 40°C (Cst) o (mm ² /s)		
	Nominal	Mínimo	máximo
2	2.2	1.98	2.40
3	3.2	2.88	3.52
5	4.6	4.14	5.06
7	6.8	6.12	7.48
10	10	9.00	11.0
15	15	13.5	16.5
22	22	19.8	24.2
32	32	28.8	35.2
46	46	41.4	50.6
68	68	61.2	74.8
100	100	90.0	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	4 14	506
680	680	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650
2200	2200	1980	2420
3200	3200	2880	3520

Fuente: (ASTM, 2002)

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

2.10. Ensayos para evaluar la conformidad de los aceites

Los siguientes ensayos son fundamentales para verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos en la norma ecuatoriana INEN 2030

- **ASTM:** (American Society for Testing Materials) mantiene un sólido liderazgo en la definición de los materiales y métodos de prueba en casi todas las industrias.

Tabla 6-2: Ensayos para evaluar la conformidad de los aceites

Requisitos	Métodos de ensayo
Determinación de viscosidad	ASTM D 445, ASTM D2983
Determinación del índice de viscosidad	ASTM D 2 270
Ensayo de espuma	ASTM D 892
Determinación del punto de escurrimiento	ASTM D 97
Determinación del punto de inflamación	ASTM D 92
Ensayo de corrosión sobre la lámina de cobre	ASTM D 130
Determinación del contenido del aditivo	ASTM D 4951, ASTM D 4047, ASTM D 1091
Determinación del contenido de agua	Efectuar el método de crepitación
Determinación de los materiales en suspensión	ASTM D 2273

Fuente:(INEN, 2015)

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

2.11. Fallas en engranajes de caja reductoras

Las fallas más comunes en las cajas reductoras se mencionan en la Ilustración 5-2, donde se observa de manera gráfica sus fallas y alteraciones en los componentes de un equipo.

Desgaste. Este tipo de deterioro se produce por el desprendimiento de material de sus capas externas de manera uniforme. Este tipo de fallo es muy común por el rozamiento entre metales por fallas o películas pobres de lubricantes. Como se puede observar en la Ilustración 5-2. Tipos de fallo en engranajes se muestra una amplia gama de fallos por desgaste donde:

- **Desgaste pulimentado:** este desgaste se da cuando la película de lubricante es más delgada que la altura combinada de las irregularidades opuestas donde ocurre contacto metálico es un desgaste que no es necesario evitar, pero si se desea evitar se requiere una capa de lubricante de mayor viscosidad, reducción en la carga y a su vez en la temperatura

de operación.

- **Desgaste moderado y excesivo:** Se observa remoción en adendo y dedendo, pero la línea de paso intacta se debe a la lubricación límite o contaminación en el lubricante, a su vez puede llegar a ser excesivo cuando los dientes presentan una gran cantidad de material.
- **Desgaste abrasivo:** Distinguido por hallarse zonas planas y gastadas que interrumpen el perfil del diente (Benítez, 1985, p. 46).
- **Desgaste corrosivo:** deterioro superficial por acción química, presenta gran cantidad de picaduras uniformemente distribuidas en la zona de trabajo del engranada, se deben al vapor de agua presente en los lubricantes.
- **Desgaste adhesivo:** Conocido también como escoriado, es un desgaste rápido de los dientes a causa de grandes fuerzas adhesivas desarrolladas al contacto entre dientes, es decir la partícula de lubricante no previenen el contacto entre dientes (Benítez, 1985, p. 46).

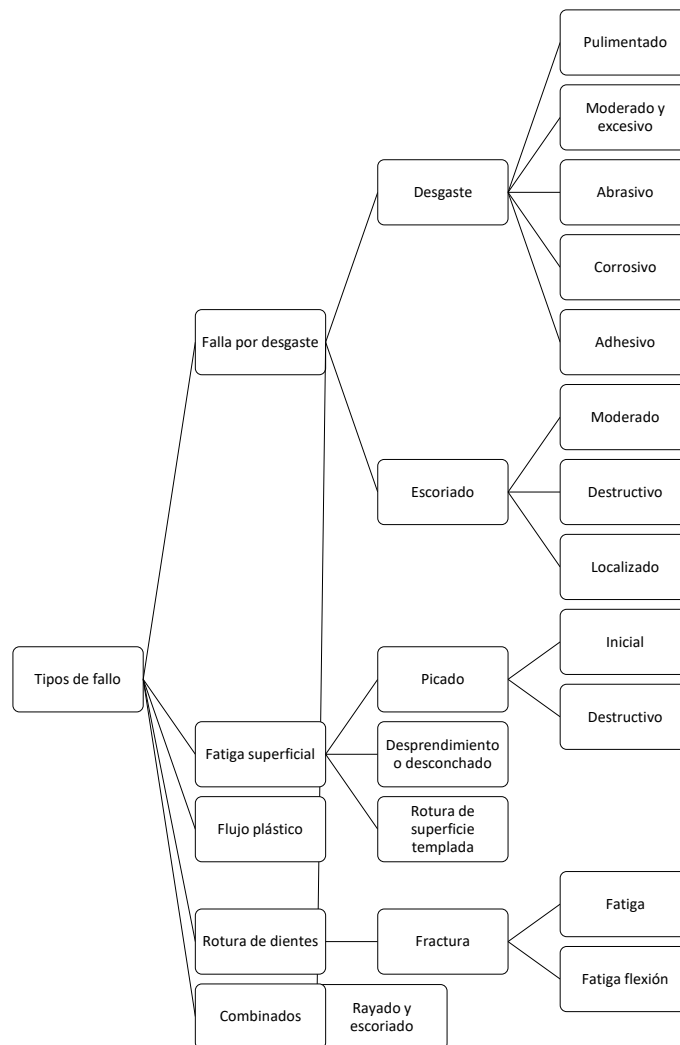


Ilustración 5-2: Tipos de falla en engranajes

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

2.12. Equipos de laboratorio para el análisis de aceites lubricantes industriales

En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, la facultad de mecánica cuenta con un laboratorio de tribología el cual contiene los siguientes equipos.

2.12.1. Viscosímetro rotacional

Utilizado para comprobar la resistencia viscosa y la viscosidad dinámica que tienen varios líquidos procedentes de petróleo o de otros derivados.

Tabla 7-2: Especificaciones técnicas del equipo

Especificaciones técnicas	
Modelo	VIS-8
Rango de medición (MPa.s)	1-2M
Velocidad de rotación (RPM)	0,3,0,6,1,5,3,6,12,30,60
Número de husillos	Los husillos: código 1,2,3,4; están equipados con el producto El husillo de código 0 es una opción en la utilización
Precisión	±1% del rango de la escala completa en uso
Capacidad de retorno	±0,5% de la escala completa en uso
Energía	Adaptador de corriente (entrada: 100-240V, 50/60Hz)

Fuente: Manual de uso de viscosímetro rotacional VIS-8

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

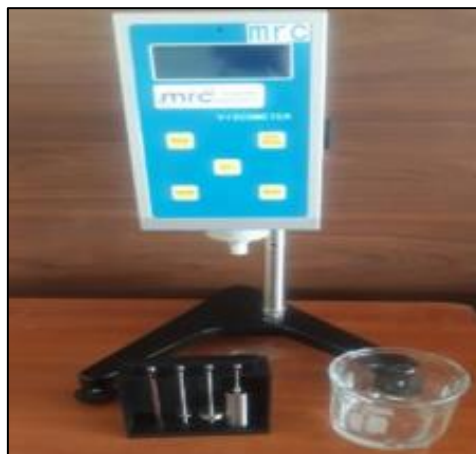


Ilustración 6-2: Viscosímetro rotacional

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

2.12.2. Analizador FluidScan (Espectrómetro Infrarrojo)

Es un espectrómetro portátil que permite realizar mediciones de forma directa e inmediata del contenido de agua, Número Total de Ácidos (TAN) y oxidación para lubricantes usados en cajas de engranajes y sistemas hidráulicos y también mide el Número Total de Bases (TBN), agua, glicol, hollín, decaimiento de aditivos, sulfatación y oxidación para aceites de motores.

El funcionamiento del fluidscan (espectrómetro infrarrojo) es con óptica de rejilla y un conjunto de detectores lineales, recoge la luz infrarroja transmitida por el fluido en la celda superior en una guía de ondas. La guía de ondas lleva la luz a una rejilla de difracción que refleja la luz a un detector de matriz que registra el espectro infrarrojo del fluido. Proporciona un rango espectral, una resolución y una relación señal/ruido más que adecuados para el análisis rápido de lubricantes en servicio (Ametek, 2019, p. 1).

El analizador Fluidscan es un espectrómetro infrarrojo diseñado para aplicaciones portátiles, por lo que es fácil de usar, solo se necesita una gota de aceite y el tiempo de espera para resultados se aproxima a un minuto, no se necesita solventes para limpiar, tiene medición directa de agua, Oxidación y TAN (Ametek, 2019, p. 1).

Tabla 8-2: Especificaciones operacionales FluidScan

Especificaciones operacionales	
Volumen de muestra	100 µL (1 gota)
Solventes/Reactivos	Ninguno
Temperatura ambiente de operación	10°C a 50°C (14°F a 122°F)
Humedad relativa	0 a 100%, no-condensante
Altitud ambiente	Hasta 5,000 metros (16,404 pies)

Fuente: (Ametek, 2019, p. 1).

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

El espectrómetro infrarrojo muestra una base de datos con las siguientes categorías de aplicación y propiedades medidas en el aceite como se muestra en la tabla 9-2.



Ilustración 7-2: Analizador FluidScan

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Tabla 9-2: Categorías y propiedades del aceite

Categorías de aplicación	Propiedades medidas por FluidScan
Transmisión	Agua (ppm), Oxidación (Abs/0.1mm)
Hidráulica- Resistente al fuego (Ester de fosfato)	Agua (ppm), TAN (mg KOH/g)
Hidráulica – Aeroespacial (Fluido hidráulico sintético)	Agua (ppm), Oxidación (Abs/0.1mm), Alien Fluid minerales base (MIL-H-2304) (%), and Alien Fluid aceite de motor (MIL-H-23699) (%)
Transferencia de calor (aceite de enfriamiento)	Agua (ppm), Oxidación (Abs/0.1mm)
Industrial (Turbina de vapor y CCGT, Hidráulica, compresor, Chiller, Gear, etc.)	Agua (ppm), Oxidación (Abs/0.1mm), TAN (mg KOH/g)
Aeroespacial de turbinas (aceite de turbina de gas sintético)	Agua (ppm), TAN (mg KOH/g), Antioxidante (% Reducción)
Motores (Aceite de motor para diferentes tipos de motores, incluidos gasolina, diésel, diésel de servicio pesado, HFO, gas natural, etc.)	Agua (ppm), Oxidación (Abs/0.1mm), TBN (mg KOH/g), TAN (mg KOH/g) (Solo Gas Natural), Sulfatación (Abs/0.1mm), Nitración (Abs/cm), hollín (%), Glicol (%),

	Antidesgaste (%), Dilución de biodiesel (%) (Diesel & Diesel de servicio pesado – Aceite de motor)
Etanol en gasolina	Etanol (%)
FAME en diésel	FAME (%)
Materia prima en biodiesel	Agua (ppm), FFA %
Biodiesel	Agua (ppm), TAN (mg KOH/g), Glicerina total (%)

Fuente: (Ametek, 2019, p. 1)

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

2.12.3. *Densímetro*

Es un densímetro portátil el cual emplea la tecnología de tubo U oscilante y se caracteriza por medir valores relacionados con la densidad de la muestra y especificar de forma inmediata los resultados en su gran pantalla, para poder visualizar, almacenar, imprimir o exportar a una PC.

Tabla 10-2: Especificaciones técnicas

Especificaciones técnicas	
Rango de medición	Densidad: 0 g/cm ³ a 3 g/cm ³ Temperatura: 0 °C a 40 °C (32 °F a 104 °F) Viscosidad: 0 a 1000 mPa·s
Precisión	Densidad: 0.001 g/cm ³ Temperatura: 0,2 °C (0,4 °F)

Fuente: Manual de uso del Densímetro

Realizado por: Arias, Yorki, 2023



Ilustración 8-2: Densímetro

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

2.12.4. Oil View Check

El analizador de aceites Oil view Quick-Check brinda resultados útiles y rápidos para ayudar a resolver problemas relacionados con el lubricante y tomar decisiones acordes a la información de datos proporcionada por el mismo en tres categorías.

- Degradación del aceite: Mediante medidas del índice de degradación y la constante dieléctrica.
- Entrada de contaminación: Midiendo el contenido de agua y partículas grandes sin hierro.
- Desgaste de componentes químicos: Por la relación del índice férrico y el índice de partículas férricas a más de 60 micrones.

Tabla 11-2: Especificaciones técnicas de Oil View Check

Especificaciones técnicas	
Interfaz	Display LCD 2×16 Cable RS-232 para comunicación con computadoras PC.
Mediciones	Dieléctrico: Comparación con el dieléctrico de un aceite limpio para determinar la degradación del lubricante. Índice Ferroso: Partículas ferrosas > 5 micrones. Indicación de Ferrosos Grandes: Partículas ferrosas >> 60 micrones. Indicación de No-Ferrosos Grandes: Partículas no-ferrosas >> 60 micrones. Indicación de gota: Gotas libres de agua. Agua: Estimación de agua en porcentaje.
Volumen de muestra	Mínimo 30 ml.
Tiempo de prueba	1 minuto (Dilución requerida).
Tipos de lubricantes	Todos los aceites minerales y sintéticos

Fuente: (OilView, 2010)

Realizado por: Arias, Yorki, 2023



Ilustración 9-2: Oil View Check

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

2.13. Normativa ASTM para análisis de aceites lubricantes

2.13.1. ASTM D445 (Viscosidad cinemática)

La norma ASTM D 445 mide el tiempo que un volumen fijo pueda fluir a través de un capilar de vidrio calibrado. Esto nos indica que la viscosidad cinemática se calcula mediante el tiempo de flujo y el factor de calibración del viscosímetro (Eurolab, 2008, p. 2).

Debemos tener en cuenta que la viscosidad siempre se considera para la selección de un lubricante, teniendo en cuenta la velocidad, carga y temperatura de los elementos lubricados para así tener una mayor efectividad.

2.13.2. ASTM D2270 (Índice de Viscosidad)

El índice de viscosidad es un número empírico que indica el efecto de la temperatura sobre la viscosidad de un aceite, se lo calcula utilizando tablas o monogramas respectivos.

El índice de viscosidad debe ser evaluado cuando sus aplicaciones en el aceite estén expuestas a grandes cambios de temperatura. Debemos tener en cuenta que un índice de viscosidad mayor o igual a 80 en un aceite mineral puro es parafínico, y con un índice de 40 es un aceite nafténico (Gooding, 2009, p. 304).

2.13.3. ASTM D95 (Agua en productos del petróleo)

El material es calentado bajo reflujo con un solvente inmisible en agua, el cual destila juntamente con el agua de la muestra, El solvente y el agua son condensados y separados en una trampa, el agua ocupa la parte graduada y el solvente retorna al balón (Scharlab, 2021, p. 1).

2.13.4. ASTM D6595 (Metales en lubricantes)

Este método de prueba cubre la determinación de metales de desgaste y contaminantes en aceites lubricantes usados y fluidos hidráulicos usados mediante espectroscopía de emisión atómica con electrodo de disco giratorio (RDE-AES).

Este método de prueba proporciona una indicación rápida del desgaste anormal y la presencia de contaminación en lubricantes y fluidos hidráulicos nuevos o usados (Scharlab, 2021, p. 1).

2.13.5. ASTM D7596 (Recuento y clasificación de partículas) – ISO 4406

Este método de prueba cubre la determinación de la concentración de partículas, la distribución del tamaño de las partículas, la forma de las partículas y el contenido de hollín para aceites nuevos y en servicio usado para lubricación, contenido de hollín para aceites nuevos y en servicio usados para lubricación y sistemas hidráulicos mediante un probador integrado de imágenes directas. El método de prueba es aplicable a fluidos a base de petróleo y sintéticos (ASTM, 2023, p. 1).

La normativa usualmente empleada para cualificar el recuento de partículas es la norma ISO 4406, en la cual se califica con un rango numérico, el número de partículas aparecidas de tamaños superiores a unos valores predeterminados, que en la última modificación de esta norma son: partículas superiores a 4µm, superiores a 6µm y superiores a 14 µm, que dan la clasificación R₄/R₆/R₁₆.

2.14. Normas aplicadas para el análisis de aceite

Las normativas que se utilizaron en el análisis de aceite cumplen con reglas internacionales las cuales se mencionan brevemente a continuación.

2.14.1. ASTM D5185

Es un análisis espectrométrico donde los elementos que normalmente se controlan son: cobre,

hierro, cromo, aluminio, plomo, estaño, silicio, sodio, potasio, molibdeno, plata, titanio, vanadio, manganeso, cadmio, calcio, fósforo, zinc, magnesio, bario, boro y en general todos aquellos que forman parte de algún componente de la máquina.

2.14.2. ASTM D6304

El contenido de agua es uno de los principales enemigos de los aceites, las condensaciones a través de los sellos u otras fuentes tienen a crear emulsiones.

El aceite contaminado con agua y aire es abrasivo y puede ocasionar desgaste prematuro en los cojinetes, engranajes y los elementos que estén en contacto con el lubricante creando herrumbre.

2.14.3. ASTM D445

Es una propiedad física que se define como la resistencia interna a fluir de las moléculas cuando pasan una a lado de otra en un líquido, a una determinada temperatura en su movimiento. La resistencia a fluir depende de las fuerzas intermoleculares que se desarrollan en el interior del líquido, es de estas que dependerá finalmente la resistencia mecánica al hacer deslizar una capa de líquido sobre otra capa adyacente del mismo líquido (Albarracín, 2006, p. 184).

2.14.4. ASTM E2412

La prueba ASTM E2412 expresa el monitoreo de condición del lubricante mediante una práctica estándar, se lo debe realizar mediante una espectrometría infrarroja transformada de Fourier (FT-IR). La prueba abarca un control de agotamiento de aditivos, degradación del material base y una acumulación de contaminantes de la maquinaria con fluidos hidráulicos u otros fluidos para el funcionamiento normal del equipo (ASTM, 2023, p. 2).

2.14.5. ISO 11171:1999 – ISO 4406

Es el estándar para reportar el nivel de contaminación sólida en los fluidos, de acuerdo a este estándar se asigna un número a la cantidad de partículas, estas están contadas en tres diferentes tamaños con sus unidades en micrones en tamaños de 4, 61 y 14. La tabla ISO es fácil de interpretar, la cual tiene en el límite superior el código ISO y a su lado derecho el número de partículas por mililitro las cuales contienen un máximo y un mínimo (Cotrina, 2016, p. 58).

Tabla 12-2: Código ISO de limpieza

Numero de partículas por mL		R - Numero de rango
Mas de	Hasta e incluyendo	
80000	160000	24
40000	80000	23
20000	40000	22
10000	20000	21
5000	10000	20
2500	5000	19
1300	2500	18
640	1300	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
0.64	1.3	7
0.32	0.64	6
0.16	0.32	5
0.08	0.16	4
0.04	0.08	3
0.02	0.04	2
0.01	0.02	1

Fuente: (Donaldson, 2023, p. 1).

2.14.6. ASTM D664

El número de neutralización TAN (Número de ácido total) es la cantidad de miligramos de una base estándar (KOH), que necesita un gramo de aceite para neutralizar las sustancias básicas que posee. Es necesario que todo el ácido sulfúrico se neutralice y se lave para que el aceite nuevo presente un valor de TAN bajo en los procesos de tratamiento con ácido de la base de lubricante (Hach, 2016, p. 4-5).

2.15. Lubricación de motorreductores

La lubricación en los motorreductores depende en esencia del fabricante y de condiciones de aplicación específicas. Uno de los factores importantes para la lubricación del motorreductor es el tipo de montaje, para el reductor FALK 2090FC2B es un montaje horizontal.

Los engranajes de los motorreductores están lubricados normalmente por lubricación forzada, baño de aceite o salpicadura.

2.15.1. Lubricación forzada

La alimentación forzada se utiliza regularmente en los engranajes que tienen una alta velocidad o en unidades de muy baja, debido a que con la salpicadura no se puede usar por la disposición del engranaje, el sistema de alimentación forzado es una bomba que cuenta con líneas de succión y suministro para la entrega del aceite (Bloch, 2009, p. 283).

2.15.2. Lubricación por baño de aceite o salpicadura

El aceite es recogido por los componentes giratorios, luego se distribuye dentro del componente y regresa al baño de aceite, el aceite debe estar en un nivel aproximadamente a la mitad del elemento rodante más bajo cuando el equipo este parado, muy habitualmente las clasificaciones de velocidad para la lubricación con aceite vienen dadas por un baño de aceite (Helloauto, 2023, p. 1).

Cuando las velocidades circunferenciales son bajas o medias hasta aproximadamente 20 m/s se prefiere la lubricación por salpicadura como un sistema de lubricación simple y confiable, donde el ancho de la cara del engranaje debe estar sumergido mientras el engrane no esté funcionando, con esto la cantidad de aceite es suficiente para proporcionar una película lubricante adecuada (Klingelberg, 2016, p. 98).

El nivel del aceite es bajo, los elementos del reductor de velocidad como los engranes y rodamientos se lubrican mediante salpicadura debido a que no quedan sumergidos en el baño del aceite.

2.16. Pruebas analíticas que permiten monitorear el aceite

Para obtener éxito en los análisis de aceite no solo depende de conocer cómo se realizan las pruebas o interpretar los datos obtenidos del laboratorio, si no también conocer cuáles son las pruebas más útiles para efectuar (Albarracín, 2006). A continuación, en la tabla 13-2, se especifican las pruebas de laboratorio para aceites usados.

Tabla 13-2: Pruebas de laboratorio a aceites usados de acuerdo con el tipo de servicio.

Prueba	Método ASTM	Reductores	Prueba	Método ASTM	Reductores
Gravedad Específica	D-287	(1)	Herrumbre	D-665	(5)
Viscosidad	D-88	X	Contenido de cenizas	D-482	(1)
carbón	D-189	(2)	Contenido de azufre	D-1266	(6)
Número de neutralización	D-664	X	Contenido de	D-808	(6)
Insolubles	D-893	(1)	Silicio		X
Formación de espuma	D-892	(1)	Hierro		X
Agua y sedimentos	D-95	(3)	Cobre		(7)
Corrosión al cobre	D-130	(4)			

Fuente: (Albarracín, 2006, p. 203).

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Notas:

- (1) Opcional. Raras veces se hace.
- (2) Para temperaturas de operación por encima de los 80°C.
- (3) Si el contenido de agua ocasional o permanentemente es alto (0,50 Vol.).
- (4) Se analiza cuando el contenido de agua es alto (0,5% Vol.) y hay presencia de bronce, babbitt o cobre (metales blandos) en el equipo lubricado.
- (5) Se analiza cuando el contenido de agua es alto (0,5% Vol.) y hay presencia de materiales ferrosos en el equipo lubricado. Siempre que se analiza (3), se debe analizar (4) o (5).
- (6) Si el aceite es del tipo EP.
- (7) Si hay cobre, bronce o babbitt en el mecanismo lubricado.

(8) Si los cojinetes de apoyo del cigüeñal son de plata.

Las técnicas de análisis para monitorear el aceite son usadas en el mantenimiento preventivo, la cual ha sido usada por varios años para conocer los análisis convencionales, una muestra de aceite se extrae de una máquina u equipo en funcionamiento y se la ingresa al laboratorio para conocer sus características y poder evaluarlas.

Los Aceites de engranajes EP deben tener las características principales.

- Capacidad de presión extrema
- Limpieza
- Demulsibilidad

El aceite en largos periodos de uso debe funcionar bajo presión, debe mantener una limpieza en los sistemas y debe separarse rápidamente del agua por su demulsibilidad (Bloch, 2009, pp. 11 - 12).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

En todos los análisis de monitoreo de aceite es importante considerar mediante la lectura de datos la información que representa el reporte de análisis de aceite. También se debe tomar atención a los detalles que presentan para la toma de muestras, los elementos que se deben usar para la recolección del aceite y la clasificación de los datos entregados y sus límites condenatorios.

Para un mejor desempeño del análisis utilizado en el trabajo se realiza un diseño metodológico.

3.1. Diseño metodológico

3.1.1. *Investigación bibliográfica*

La investigación bibliográfica consta de la obtención de la información de libros, revistas, artículos científicos y normas internacionales para las evaluaciones y comparaciones de un aceite lubricante utilizado en un motorreductor, donde se encontraron protocolos de muestreo, información característica del lubricante y parámetros que son evaluados para determinar su degradación y vida útil donde se hará la comparación de datos reales con los datos técnicos muestreados en los equipos de análisis de aceite.

3.1.2. *Diseño de protocolo*

En el desarrollo del trabajo se contempla un protocolo que llevará a cabo la empresa para la toma de muestras, la que consta de los materiales que se deben usar, el método efectuado para la extracción del aceite y el membrete o identificación de la muestra. Seguido del protocolo de muestreo el siguiente paso es el protocolo de los análisis de laboratorio donde se exponen el orden de los equipos a utilizar y la cantidad de muestra necesaria para su utilización.

3.1.3. *Caracterización del aceite*

En este trabajo se presenta la caracterización de un aceite lubricante que se ha utilizado para la lubricación de un motorreductor FALK aplicado en el funcionamiento de un molino de bolas en una empresa minera. Entre las características tenidas en cuenta estuvieron: densidad, integridad del fluido, oxidación, número de ácidos totales (TAN), agua y su valor del dieléctrico.

3.1.4. Ejecución de toma de muestras y pruebas de laboratorio

La toma de muestras es el proceso de recolectar el aceite lubricante por medio de un método para la extracción del aceite sin que este se encuentre expuesto a la contaminación, en el cual se tomó por medio de una bomba de vampiro y frascos de muestreo, además se toman los datos de operación de la máquina y del lubricante siendo esta información necesaria para un posterior exitoso análisis de aceite.

Con las muestras de aceite recolectadas se procedió a utilizar los equipos de laboratorio de la Facultad de Mecánica y se establece un orden para realizar el análisis de aceite y recoger la información pertinente, posteriormente se grafican los datos y se interpretan acorde a las normativas y recomendaciones del fabricante para conocer el estado actual del lubricante.

3.1.5. Definir límites condenatorios

Los límites condenatorios tienen el objetivo de conocer cuáles son los valores máximos y mínimos permisibles de elementos o propiedades del aceite con el fin de percibir si existe una degradación, un daño en la máquina o si el aceite cumple con las óptimas condiciones para la lubricación. Es por ello que fue necesario conocer la caracterización previa del aceite nuevo para detectar sus valores base, de esta manera se pudo conocer la cantidad permitida en cada elemento o propiedad.

3.1.6. Metodología SACODE

Una vez identificado y caracterizado el aceite, se aplican los análisis de aceite adecuados al motorreductor, y los resultados se evalúan mediante la metodología SACODE, esta permite interpretar de manera correcta los resultados, dividiéndolos en tres categorías: salud, contaminación y desgaste.

3.1.7. Diagnosticar y establecer acciones

Una vez aplicada la metodología SACODE se obtiene un orden de los resultados en función de los límites condenatorios, en este punto se emite un diagnóstico de la condición operativa del aceite y las acciones de mantenimiento.

Para un mejor desempeño del análisis utilizado en el trabajo se realiza un diseño metodológico, en la Ilustración 1-3 se indica el proceso de la investigación.

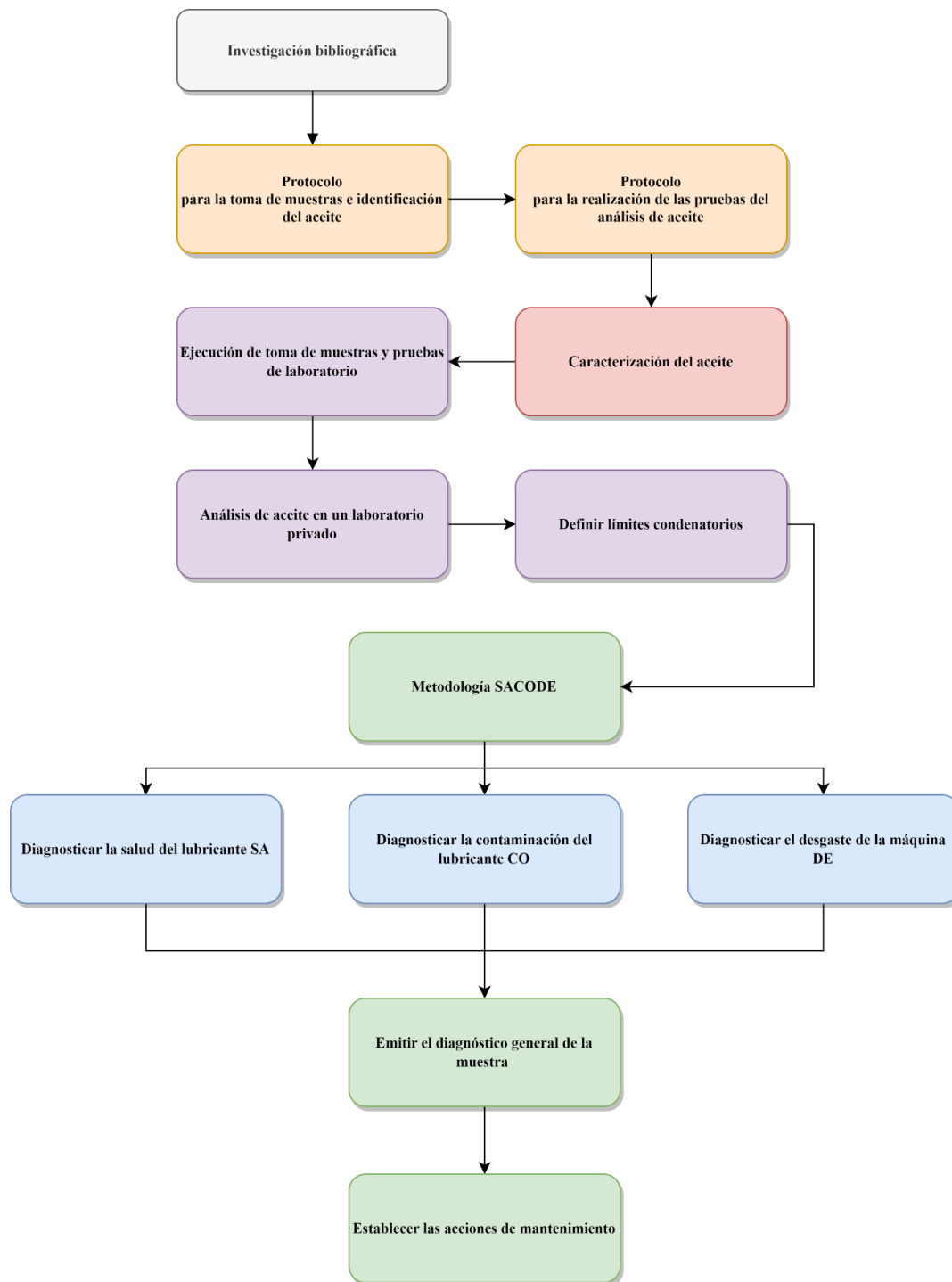


Ilustración 1-3: Diagrama del diseño metodológico

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

3.2. Protocolo para la toma de muestras e identificación del aceite

Las muestras de aceites se deben obtener de manera que los resultados sean lo más representativos posibles, para ello es necesario detener el equipo y tomar las muestras inmediatamente, con esto

se logrará que todas las impurezas se encuentren suspendidas en el aceite.

No se debe tomar la muestra del fondo del depósito del equipo o del filtro debido, a que en estas partes se encuentran la mayor concentración de impurezas las cuales no están recirculando con el aceite (Albarracín, 2006).

3.2.1. *Materiales para la toma de muestra del aceite*

Para un éxito proceso de recolección de muestras de aceite se ha considerado utilizar los siguientes materiales:

- Bomba de vampiro manual
- Manguera de 5/16
- Envase de plástico con tapa hermética
- Etiqueta con los datos

En la Ilustración 2-3 se propone la utilización de un formato de etiqueta para el análisis de aceite, la intención es contar con la mayor cantidad de información que permita identificar las muestras que se enviaran al laboratorio.

ETIQUETA PARA EL ANÁLISIS DEL LUBRICANTE			
Fecha de la muestra	_____	Nombre del aceite	_____
Sitio de trabajo	_____	ISO/API/SAE	_____
Modelo / Marca del equipo	_____	Fecha / Horómetro del último cambio	_____
Número de serie	_____	Horómetro actual	_____
¿Se cambio el aceite en la toma de muestra?		_____ SI	_____ NO
Observaciones: _____			

Ilustración 2-3: Etiqueta para el análisis del lubricante

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

3.2.2. *Método de la bomba de muestreo*

La bomba de succión que se utiliza con el fin de tomar el aceite del interior del reductor es del tipo vampiro la cual se acciona de forma manual, succionando el aceite por un tubo de plástico

hasta el recipiente que se encuentra acoplado y enroscado en la bomba de vampiro. Puede apreciarse la estructura de la bomba en la Ilustración 3-3.



Ilustración 3-3: Bomba de vampiro

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

El tubo de plástico de 5/16 de pulgada -debe ser nuevo cada vez que se toma una muestra de aceite de esta manera los resultados no se verán afectados por contaminación o impurezas de otros líquidos o sustancias.



Ilustración 4-3: Tubo plástico de 5/16 de pulgada

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Los envases de plástico para la toma de muestra deben ser nuevos y completamente limpios, se debe revisar que la tapa sea hermética para evitar el derramamiento del aceite o la contaminación de impurezas en el mismo.



Ilustración 5-3: Envases plásticos

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

A continuación, en el apartado 3.2.3., se propone un procedimiento para la realización de la toma de muestras, en él intervienen todos los elementos descritos anteriormente. El cumplimiento de este procedimiento conllevará a obtener buenos resultados en el análisis de aceite.

3.2.3. *Proceso de toma de muestra*

Como parte del diseño del protocolo para la toma de muestras del aceite lubricante en la Ilustración 6-3 se presenta el proceso que se debe seguir para obtener exitosamente una muestra de aceite que permita el análisis correspondiente en el laboratorio.

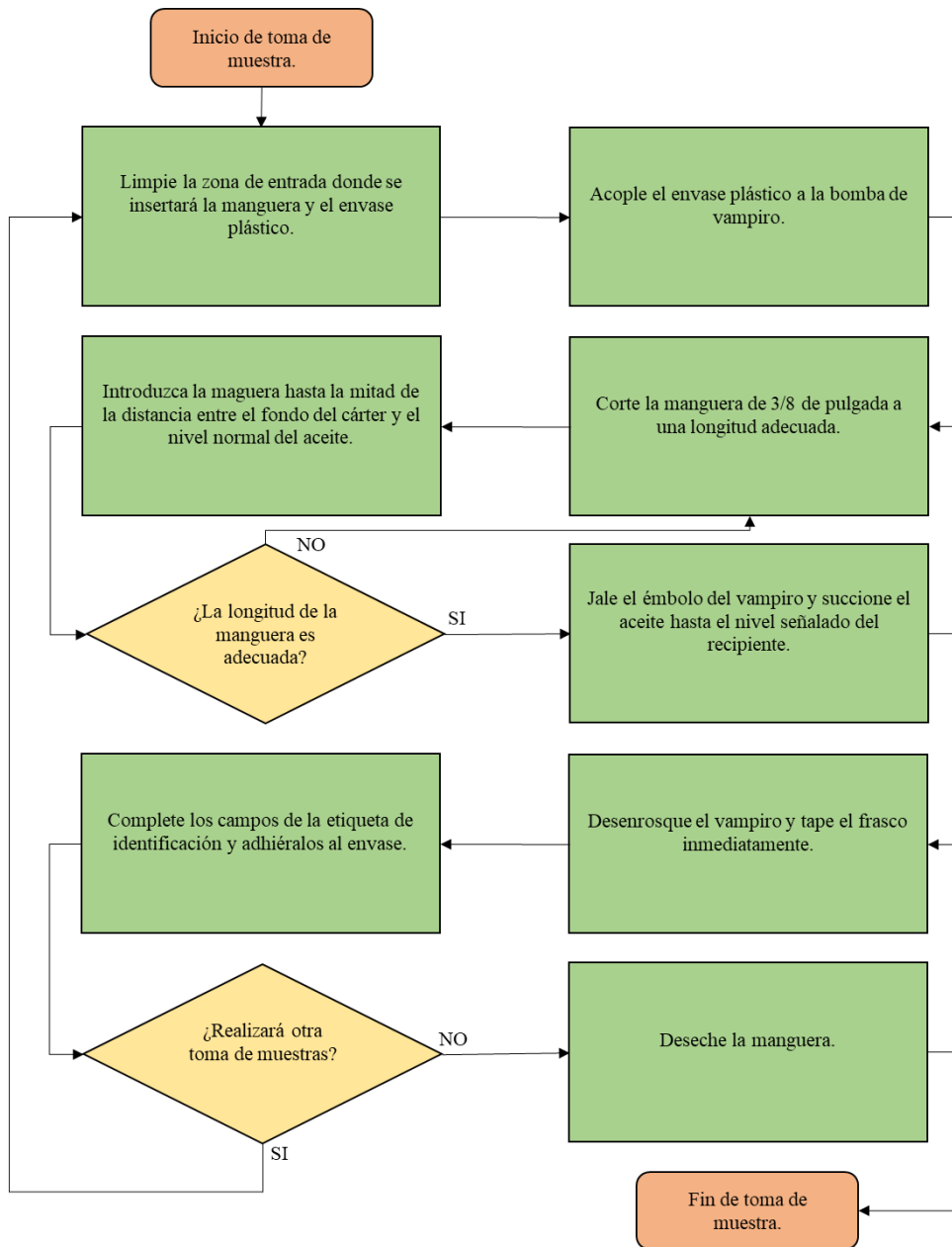


Ilustración 6-3: Pasos para la toma de muestra del aceite

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Nota: Tome la muestra cuando el aceite este caliente o inmediatamente después de haber paralizado el equipo

En el presente trabajo se aplica el protocolo propuesto para asegurar el éxito de la realización de las pruebas de laboratorio y que permita obtener las conclusiones y recomendaciones que aseguren la vida útil del motorreductor mediante la formulación de la propuesta en base al análisis de resultados.

3.3. Protocolo para la realización de las pruebas del análisis de aceite

Las paradas inesperadas de equipos en una empresa son críticas y pueden ser evitadas o mantenidas con un margen mínimo con un programa de análisis de lubricantes.

El mantenimiento preventivo abarca las técnicas de análisis de aceite, esta ha sido utilizada durante años en la industria. Para los análisis más convencionales estas muestras se extraen cuando el equipo está en funcionamiento en condiciones normales de trabajo y se somete a un análisis de laboratorio para medir algunas de sus características en las cuales se incluye: Análisis elemental, Viscosidad, infrarrojo, contaminación por agua, limpieza, número de ácidos totales (TAN), oxidación, densidad, entre otras. Sin embargo, existen pruebas que pueden ser efectuadas para una evaluación más detallada del aceite usado.

En la Ilustración 7-3 se presenta el protocolo que se va a seguir en la ejecución del análisis de aceite en el presente trabajo, el cumplimiento de este protocolo permitirá un uso adecuado y ordenado de los equipos que cuenta el laboratorio de tribología de la ESPOCH.

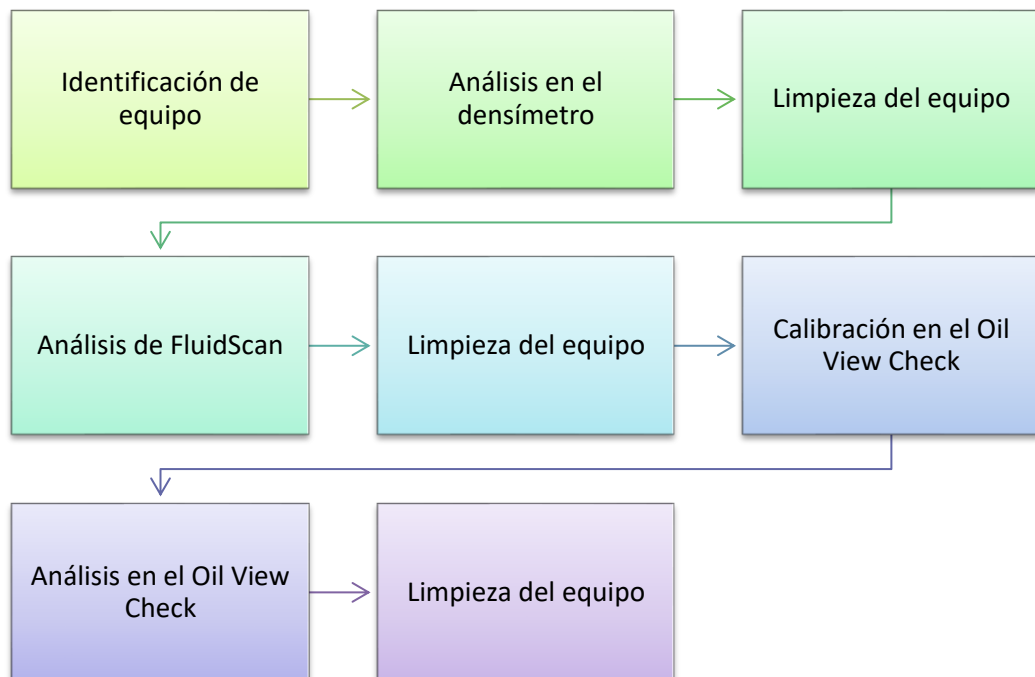


Ilustración 7-3: Proceso de ejecución del análisis de aceite

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Cabe destacar que el protocolo para la realización de los análisis de aceite cumple con un orden establecido para procesar las muestras en los equipos. Una muestra se realizará en el espectrómetro infrarrojo (FluidScan), la misma muestra se utiliza en el densímetro y por último

se utiliza el equipo Oil View Check para concluir con los análisis del aceite.

3.3.1. Procedimientos, Equipos, y Materiales para los análisis de aceites en laboratorio de tribología de la ESPOCH

3.3.1.1. Densímetro

Los materiales que se deben utilizar para realizar el análisis de aceites en el densímetro se muestran en la Ilustración 8-3.



Ilustración 8-3: Materiales para la utilización del densímetro (Guantes, muestra de aceite, papel absorbente y alcohol)

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Para la utilización del equipo se necesitó una cantidad mínima de 2 mililitros del aceite lubricante, el proceso para la utilización del equipo se indica a continuación:

1. Se toma la muestra del aceite por medio de la succión de la bomba que se encuentra incorporada en el equipo
2. Se debe esperar a que el equipo establezca los valores de densidad
3. Se debe pulsar el botón para guardar los datos que se encuentra en la parte posterior del equipo
4. Se toman los valores de temperatura ambiente en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$) y la densidad en gramos sobre centímetros cúbicos (g/cm^3) que indica el equipo
5. Tomadas las medidas se procede a desechar el aceite lubricante de la bomba y limpiar los conductos del equipo con alcohol isopropílico

En el anexo A se muestran las imágenes del funcionamiento del equipo con una muestra realizada en el laboratorio.

Una vez tomadas las medidas de las muestras del aceite en el densímetro se procede a utilizar el equipo FluidScan.

3.3.1.2. FluidScan (Espectrómetro infrarrojo)

Los materiales que se deben utilizar para realizar el análisis de aceites en el espectrómetro infrarrojo se muestran en la Ilustración 9-3.



Ilustración 9-3: Materiales para la utilización del FluidScan (Guantes, muestra de aceite, pipeta de 1 ml., papel absorbente y alcohol)

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Para la utilización del equipo se necesitaron dos gotas de aceite lubricante, el proceso para la utilización del equipo se indica a continuación:

1. Se enciende el FluidScan e ingresamos automáticamente al menú principal
2. Se debe acceder a medir fluido donde se abrirá la biblioteca incorporada en el equipo y se debe seleccionar el tipo de aceite.
3. A continuación, se agrega el nombre de la muestra y la fecha del análisis
4. Si el equipo no se encuentra calibrado con el ruido de fondo, pedirá realizar una medición.

5. Se extrae 1 mililitro de aceite con la pipeta y se agregan dos gotas en la celda del equipo
6. Se cierra la tapa metálica del equipo y la introducimos en la abertura para la realización de la prueba
7. Seleccionar OK para iniciar la medición
8. A continuación, indicamos la viscosidad y la dilución que son las propiedades del aceite
9. Tomamos los datos de la medición de la prueba.
10. Extremos la tapa metálica del equipo y limpiamos la celda

En el anexo B se muestran las ilustraciones con los pasos mencionados anteriormente con una muestra utilizada en el laboratorio.

El siguiente equipo que se analizó corresponde al Oil View Check, el cual es el último equipo para la realización de los análisis de aceite.

3.3.1.3. Oil View Check

Los materiales que se deben utilizar para realizar el análisis de aceite en el Oil View Check se muestran en la Ilustración 10-3.



Ilustración 10-3: Materiales para la utilización del Oil View Check (Guantes, muestra de aceite, jeringuillas de 5 ml., diésel, papel absorbente y alcohol)

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Para la utilización del equipo se necesitó una cantidad de 5 mililitros de aceite lubricante y 5 mililitros de diésel para su dilución, el proceso para la calibración del equipo se indica a continuación:

1. Encienda la alimentación.
2. Siguiendo las instrucciones en la pantalla del dispositivo, enchufe la rejilla de prueba limpia en el dispositivo.
3. Desconecte la rejilla y llénela con 10 mililitros con el fluido de calibración 220.
4. Conecte la rejilla al dispositivo.
5. Desconecte la rejilla.
6. Siguiendo las instrucciones en la pantalla del dispositivo, enchufe la rejilla de prueba limpia en el dispositivo.
7. Desconecte la rejilla y llénela con 10 mililitros con el fluido de calibración 300.
8. Conecte la rejilla al dispositivo.
9. El dispositivo ahora debe estar calibrado.

Con el equipo calibrado se procede a realizar el análisis de aceite con los pasos que se indican a continuación:

1. Se conecta el equipo Oil View Check a una fuente de energía y por medio de conectores se enlaza a una computadora donde tendremos los registros de los análisis.
2. Se debe abrir la aplicación y al mismo tiempo encender el equipo
3. Abierta la aplicación debemos calibrar el equipo, para ello seguimos las instrucciones que orden el programa.
4. Calibrado el equipo procedemos a conectar la rejilla limpia
5. Retiramos la rejilla del Oil View Check e ingresamos en el recipiente de plástico 5 mililitros de aceite para acoplar nuevamente la rejilla en el equipo.
6. Retiramos la rejilla del equipo y diluimos 5 mililitros de diésel en el envase y procedemos a acoplar la rejilla para obtener las mediciones.
7. Observamos que en la computadora se muestra una tabla con los resultados del aceite.
8. Se debe comparar los resultados con los límites seteados en el programa, para ello debemos ingresar el aceite con su valor de dieléctrico y su viscosidad a 40°C en la tabla de referencia
9. Se debe escoger el aceite ingresado en la tabla de referencia y Gear/Simple/Other en la tabla de alarmas, ambas selecciones las debemos setear para obtener las comparaciones del aceite.
10. Por último, debemos ingresar en la tabla de resultados el código 200140 en la columna de identificación del equipo, con esta función nos indicara el gráfico con las alarmas.

En el anexo C se muestran las ilustraciones con los pasos indicados anteriormente con una muestra utilizada en el laboratorio.

En la tabla 1-3 se indican las propiedades evaluadas y sus unidades.

Tabla 1-3: Pruebas de equipos de laboratorio.

Equipo	Parámetro	Unidad
Densímetro	Densidad	g/cm ³
FluidScan	Integridad del fluido	Adimensional
	Oxidación	Abs/0,1mm
	TAN (número de ácidos totales)	mgKOH/g
	Agua	ppm
Oil View Check	Dieléctrico	F/m
	Índice de contaminación	Adimensional
	Índice de desgaste	Adimensional
	Índice químico	Adimensional

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

3.3.2. Procedimiento, equipos y materiales para los análisis en un laboratorio certificado

Los procedimientos para los análisis de aceite del laboratorio requieren de una muestra aproximadamente de 75 ml. de aceite, con una etiqueta que indica los detalles del equipo y el uso del aceite lubricante, los equipos y materiales del laboratorio para hacer el análisis de pruebas son confidenciales.

En el capítulo 2.14 se explican las normas utilizadas para realizar los ensayos, a continuación, se explica brevemente la información que se puede extraer del análisis de aceite.

3.3.2.1. Niveles de desgaste

Es un análisis elemental en el cual se indican diferentes elementos de la tabla periódica en unidades de partículas por millón, para un análisis más exhaustivo se deben agrupar para conocer sus tendencias en función al desgaste o aditivos que presenta el aceite, los elementos que se presentan son Cobre, Hierro, Cromo, Aluminio, Plomo, Estaño, Silicio, Sodio, Potasio, Molibdeno, Plata, Titanio, Vanadio, Manganeso, Cadmio, Calcio, Fósforo, Zinc, Magnesio, Bario y Boro.

3.3.2.2. Condición/contaminación

En el apartado de condición obtenemos el valor de viscosidad a una temperatura de 100°C con unidades en centistokes y un análisis infrarrojo con unidades de Absorbancia/longitud de onda (abs/0,1mm) en oxidación y sulfatación.

En el apartado de contaminación se evidencia si el aceite contiene agua o refrigerante con resultados de afirmación o negación.

3.3.2.3. Conteo de partículas ISO 4406

Código de 3 números, bajo formato el formato (R4/R6/R14) donde:

El 1^{er} número es un código para partículas/ml > 4 micrones

El 2^{do} dígito es un código para partículas/ml > 6 micrones

El 3^{er} dígito es un código para partículas/ml > 14 micrones

3.4. Límites condenatorios críticos para aplicar en el análisis de aceite

Es difícil generalizar con respecto a los límites de un equipo, para ello se debe conocer las especificaciones del fabricante del equipo con el tipo de aceite utilizado, existen normativas y compañías que evalúan e indican los valores permisibles para el correcto funcionamiento de un aceite lubricante como se muestra en las tablas.

Cada fuente maneja un criterio diferente sobre los límites máximos y mínimos de un aceite industrial que aplica en función de la aplicación y objetivo de esta. Pero cada una logra aportar información importante con el fin de conocer cuál es el límite adecuado para interpretar un análisis de aceite desde el enfoque proactivo, como se muestra en las tablas a continuación.

Tabla 2-3: Valores máximos o mínimos permisibles para diferentes pruebas de laboratorio bajo las normas ASTM.

Características físicas o químicas	Método ASTM	Evaluación de la característica	Valor máximo o mínimo permisible	Causa posible	Observaciones
Viscosidad SSU/100° o 210 °F Cst/40° o 100°C	D88 D45	Alta	25% en aumento	Oxidado Contaminado con materiales solidos Contaminado con otros de mayor viscosidad	Es uno de los parámetros influyentes para determinar el estado del aceite
		Igual	-	En Buen estado Oxidado o diluido en la misma proporción	
		Baja	15% de disminución	Contaminado con otro aceite de menor viscosidad.	
Número de neutralización (TAN) mgKOH/gr aceite usado	D-664 D-974	Alto	Incremento de 0,3 en aceites EP para reductores	Oxidado	Factor importante donde indica el grado de oxidación del aceite.
Agua y sedimentos % Vol. (ppm)	D-95 D-96	Alto	0,2% de incremento	-	-
Rigidez dieléctrica KV.	D-877 D-1816	Baja	18 KV	Contaminación con agua	Cuando llegue a ese valor se puede reacondicionar el aceite o cambiarlo si lleva mucho tiempo en servicio.

Fuente:(Albarracín, 2006, p. 187).

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En la siguiente tabla se muestra los límites condonatorios de la compañía Detroit Diesel, los cuales se interpretan como alarmas para ayudar a la interpretación de los resultados. Estos límites son comúnmente establecidos por los estudios realizados en grandes compañías con índices de la degradación del aceite.

Tabla 3-3: Interpretación del análisis de la muestra de aceite lubricante, según Detroit Diesel Co.

Origen del problema	Característica analizada	Normal. No se requiere acción	Límite. Tomar muestras adicionales	Alto. Corregir
Oxidación excesiva	Viscosidad	Menos del 15%	15 % por debajo 30% por encima	Mas del 30%
Fugas de agua	Agua libre	Ninguno		Cualquiera
	Inhibidor de cromo	0 a 20 ppm	20 a 40 ppm	Sobre 40 ppm
	Inhibidor de boro	0 a 10 ppm	10 a 20 ppm	Sobre 20 ppm
Contaminado	Aluminio	-	5 ppm Máximo	-
	Zinc	0 a 10 ppm	10 ppm	-
Contaminación del aceite	Plata	0 a 1 ppm	1 a 2 ppm	Sobre 2 ppm
Desgaste	Cromo	0 a 10 ppm	10 a 20 ppm	Sobre 20 ppm
	Cobre	0 a 75 ppm	75 a 150 ppm	Sobre 150 ppm
	Hierro	0 a 75 ppm	75 a 125 ppm	Sobre 125 ppm

Fuente:(Albarracín, 2006, p. 157).

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En el motorreductor FALK modelo 2090FC2B9.257 se consideran análisis para el cambio del lubricante donde se recomienda revisar el estado del aceite en intervalos de horas. A continuación, en la tabla 4-3, se presentan las pautas enumeradas por el fabricante del motorreductor que pueden usarse para indicar cuando cambiar el lubricante.

Tabla 4-3: Análisis y cambio de lubricante según el fabricante del reductor de velocidad.

Prueba	Límite
Contenido de agua	Superior a 500 PPM (0,05%)
Contenido de hierro	Supera las 150 PPM
Silicio (Polvo/Suciedad)	Supera las 25 PPM
Contenido de cobre	Supera las 75 PPM
TAN (Número de Acidez Total)	Aumento del 50% por encima de la muestra de referencia del aceite nuevo
Viscosidad	Cambia más de $\pm 15\%$
Código de contaminación de partículas	Excede 25/22/18 para tamaños de partículas $\geq 4/ \geq 6/ \geq 14$ micrones, respectivamente según ISO 4406

Fuente: (Rexnord, 2015, p. 8)

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Existen límites condenatorios correspondientes al aceite con características mínimas para su funcionamiento, muchos fabricantes de maquinaria industrial insertan las especificaciones de aceites en diferentes sistemas, por lo tanto, obliga a conocer su viscosidad equivalente. A continuación, en la ilustración 11-3, se presenta la tabla de equivalencias entre los diferentes sistemas de clasificación de la viscosidad.

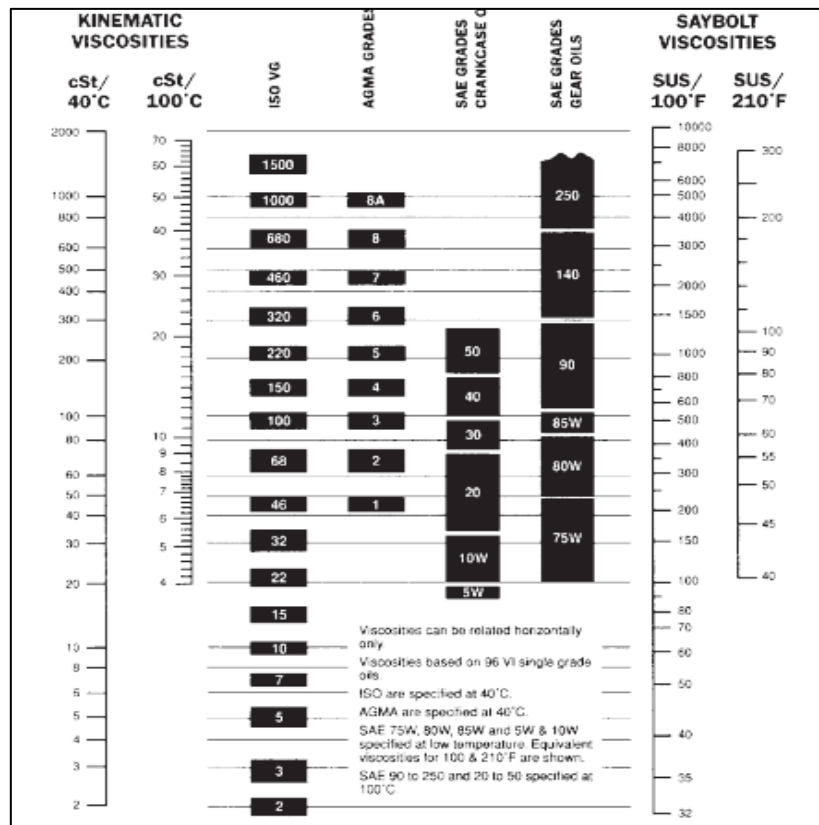


Ilustración 11-3: Sistema de clasificación de la viscosidad.

Fuente: (Bloch, 2009, p. 54).

En la tabla 5-3 se indican las equivalencias que se relacionan con el aceite estudiado en el presente trabajo.

Tabla 5-3: Equivalencias entre los diferentes sistemas de clasificación de la viscosidad.

Grado ISO	Grado ASTM	Grado AGMA	Grado SAE			
			Motor		Engranajes	
			Unigrado	Multigrado	Unigrado	Multigrado
220,220EP	1000	5,5EP	50	-	90	85W-90
320,320EP	1500	6,6EP	-	-	-	85W-140
460,460EP,460C	2150	7,7EP,7C	-	-	140	-

Fuente: (Albarracín, 2006, p. 67).

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

La viscosidad del aceite Gearbox EP 320 es equivalente al grado ASTM 1500, Grado AGMA 6EP y grado SAE para engranajes multigrado 80W-140.

La comparación entre los límites anteriormente mencionados permitirá identificar los valores ideales de los límites críticos que aplicaremos, interpretando los resultados que estén acorde a la necesidad de la empresa y que logren ser un indicador para la mejora del mantenimiento.

Se logro constatar e identificar cada fuente de información en base a la necesidad de este trabajo establecimos los límites proactivos.

Tabla 6-3: Límites para cajas automáticas VOITH.

Elemento	Límite superior	Unidades de medida
Silicio	25	ppm
Sodio	15	ppm
Potasio	15	ppm
Oxidación	20	abs/0,1mm
Cobre	300	ppm
Hierro	150	ppm
Cromo	10	ppm
Aluminio	45	ppm
Estaño	30	ppm
Molibdeno	10	ppm

Fuente: (Calderón y López, 2016, p. 45)

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Los niveles de limpieza que expresa la norma ISO 4406 teniendo en cuenta el mecanismo que se está lubricando y tipo de película lubricante se indica en la tabla 7-3 esta información fue proporcionada por el grupo SKF.

Tabla 7-3: Límites condenatorios de la norma ISO 4406.

Niveles de ISO 4406	Caja reductora	
	Alta velocidad	Baja Velocidad
ISO > 4 Normal	20	21
ISO > 6 Normal	18	19
ISO > 14 Normal	16	17
ISO > 4 Precaución	21	22
ISO > 6 Precaución	19	20

ISO > 14 Precaución	17	18
ISO > 4 Crítico	22	23
ISO > 6 Crítico	20	21
ISO > 14 Crítico	18	19

Fuente: (SKF, 2023, p. 1).

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En la tabla 8-3 se indican los tipos de alarmas de ensayos, que se referencian como limites condenatorios. Esta información es proporcionada por el grupo SKF.

Tabla 8-3: Límites condenatorios de grupo SKF.

Parámetro	Unidad	Crítico	Precaución	Normal
Aditivos	Porcentual	± 50	± 25	Línea base
Desgaste	Estadística	$+2 \sigma$	$+1 \sigma$	$< +1 \sigma$
Oxidación Sulfatación	Porcentual	± 75	± 25	Línea base
Fe	Estadística	$+2 \sigma$	$+1 \sigma$	Promedio
Número de ácidos totales (TAN)	Absoluto	$1.0 > base$	$0.2 > Inflexión$	Punto de inflexión
Ferroggrafía	Cualitativo	NA	NA	-

Fuente: (SKF, 2023, p. 3).

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En la tabla 9-3 se resumen los límites condenatorios mencionados anteriormente, con el fin de obtener parámetros ordenados y una mejor visualización.

Tabla 9-3: Comparación de límites condenatorios.

Límites condenatorios								
Normal	Precaución SKF	Crítico SKF	Unidades	ASTM	Detroit Diesel Co.	VOITH	Fabricante	Propiedades/elementos
			Centistokes (Cst)	Porcentual +25% - 15%	Porcentual +30% - 15%		Porcentual $\pm 15\%$	Viscosidad a 100°C
			(mgKOH/g)	Porcentual +30%			Porcentual +50%	TAN

Según el fabricante del equipo Oil View Check un cambio de 0,10 en el dieléctrico con referencia a la muestra de aceite nueva es un cambio grande.							Dieléctrico	
Porcentual Base	Porcentual $\pm 25\%$	Porcentual $\pm 75\%$	Partículas por millón (PPM)			20	Oxidación	
								Sulfatación
Porcentual Base	Porcentual -25%	Porcentual -50%				10		Molibdeno
								Calcio
								Fósforo
					10			Zinc
								Magnesio
					20			Boro
						15		Sodio
						15		Potasio
NA	NA				5			Aluminio
							25	Silicio
							500	Agua
Estadística Promedio	Estadística $+1\sigma$	Estadística $+2\sigma$					150	Hierro
Estadística $<+1\sigma$	Estadística $+1\sigma$	Estadística $+2\sigma$					75	Cobre
					10		Cromo	
					30		Estaño	
				2			Plata	
							Titanio	
							Vanadio	
21/19/17	22/20/18	23/21/19	Micras (μ)			25/22/18	Código ISO de limpieza	

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En la tabla 10-3 se han comparado los límites condensorios y de mayor influencia para el estudio del monitoreo del lubricante escogiendo los máximos y mínimos permisibles con el fin de obtener valores máximos de confiabilidad y centrar el estudio con el mínimo error tolerable de las muestras.

Cabe destacar que se tomó como valores primordiales a los parámetros del fabricante del motorreductor.

Tabla 10-3: Límites permisibles en las muestras de aceite.

Parámetro	Evaludador	Valor	
Viscosidad	Fabricante FALK	Máximo/Mínimo	15% del valor de referencia

TAN	Fabricante FALK	Máximo	50% del valor de referencia
Agua	Fabricante FALK	Máximo	500 ppm
Cobre	Fabricante FALK	Máximo	75 ppm
Hierro	Fabricante FALK - Metodología SKF	Máximo	150- Estadístico
Silicio	Fabricante FALK	Máximo	25 ppm
Código ISO limpieza	Fabricante FALK	Máximo	25/22/18
Oxidación	Metodología SKF	Máximo	Normal: línea base Precaución: $\pm 25\%$ Crítico: $\pm 75\%$
Sulfatación	Metodología SKF	Máximo	
Cromo	VOITH	Máximo	10 ppm
Estaño	VOITH	Máximo	30 ppm
Sodio	Metodología SKF	Mínimo	Normal: línea base Precaución: - 25% Crítico: - 75%
Potasio	Metodología SKF	Mínimo	
Zinc	Metodología SKF	Mínimo	
Boro	Metodología SKF	Mínimo	
Molibdeno	Metodología SKF	Mínimo	
Calcio	Metodología SKF	Mínimo	
Fósforo	Metodología SKF	Mínimo	
Magnesio	Metodología SKF	Mínimo	
Aluminio	Detroit Diesel Co.	Máximo	
Plata	Detroit Diesel Co.	Máximo	2 ppm
Dieléctrico	Fabricante del equipo Oil View Check	Máximo/Mínimo	0,1 del valor de referencia

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

3.5. Caracterización del aceite mineral GEARBOX 320 EP

La caracterización del aceite nuevo Gearbox 320 EP se realizó en base a la información proporcionada por el fabricante y con la utilización de los equipos de laboratorio de la Facultad de Mecánica para tabular los datos referenciales y poder comparar con los límites máximos permitidos, de esta manera se conoce si el lubricante está en óptimas condiciones o existen alertas para el cambio.

3.5.1. *Propiedades iniciales del aceite nuevo aportadas por el catálogo del fabricante*

Para conocer la información del aceite GEARBOX EP refiérase al capítulo número dos en el apartado 2.5 Aceite Gearbox EP. A continuación, en la tabla 11-3 se indican las propiedades más relevantes del aceite utilizado en la máquina.

Tabla 11-3: Propiedades del aceite mineral Gearbox EP 320.

Característica	Valor	Unidad de medida
Grado ISO VG	320	-
Grado SAE	80W140	-
AGMA Rating	6 EP	-
Viscosidad @100°F	1678	SUS
Viscosidad @210°F	147	SUS
Viscosidad @100°C	30	Cst
Viscosidad @40°C	320	Cst
Índice de Viscosidad	129	-
Timken OK	70	Lb

Fuente: Especificaciones técnicas Gearbox EP 320

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

3.5.2. *Propiedades iniciales del aceite nuevo aportadas por laboratorio privado*

En el laboratorio privado fue analizada una muestra nueva del aceite usado en el motorreductor, por lo tanto, se conoció cuáles son sus principales características, a continuación, en la tabla 12-3 se presentan los resultados.

Tabla 12-3: Propiedades del aceite nuevo aportadas por el laboratorio certificado.

Nivel de desgaste	
Hierro	15 ppm
Estaño	1 ppm
Sodio	3 ppm
Potasio	1 ppm
Molibdeno	415 ppm
Calcio	26 ppm
Fósforo	551 ppm
Zinc	18 ppm

Magnesio	3 ppm
Boro	2 ppm
Condición	
Viscosidad a 100 °C	25.29 Cst
Contaminación	
Oxidación	3 (abs/0,1mm)
Sulfatación	15 (abs/0,1mm)

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

3.5.3. *Propiedades iniciales del aceite nuevo aportadas por los equipos de laboratorio*

En el laboratorio de tribología de la facultad de mecánica se encuentran tres equipos que se utilizaron para encontrar los valores del aceite nuevo.

3.5.3.1. *Análisis con FluidScan*

El aceite que se está usando es GEARBOX 320, en el motorreductor FALK, el cual se lo analiza para conocer sus propiedades iniciales, con el analizador FluidScan donde se lograron obtener los siguientes resultados mostrados en la tabla 13-3.

Tabla 13-3: Propiedades del aceite nuevo.

Prueba	Valor	Unidades
Integridad del fluido	90,6	[-]
Oxidación	2,7	abs/0,1mm
TAN	0,93	mgKOH/g
Viscosidad	320	Cst
Agua	73	PPM
Densidad	0,8794	g/cm ³

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Con los datos arrojados por el espectrómetro infrarrojo y el densímetro se obtuvo los datos iniciales del aceite, que sirvieron para conocer el comportamiento y la degradación del lubricante a lo largo del tiempo y con los datos se dio una interpretación y evaluación.

3.5.3.2. *Análisis con el densímetro*

El dato entregado por el densímetro en la muestra nueva del aceite mineral Gearbox 320 EP es de 0,8794 cabe destacar que la temperatura ambiente cuando se realizó la toma de muestra fue de

24,2 grados centígrados.

3.5.3.3. Análisis con el Oil View Check

El equipo Oil View Check entrega índices de contaminación, desgaste y químicos los cuales los compara con su base de datos y las alarmas de los aceites según el tipo de aplicación o uso y entrega un reporte, para el caso del aceite GEARBOX 320 EP se obtuvo el valor 2,23 que corresponde al dieléctrico, mientras tanto que los resultados de los índices entregados fueron de cero, esto es debido a que el aceite es nuevo.

3.6. Ejecución de la toma de muestras

Para la toma de muestras se utilizó el método de la bomba de muestreo, es el método más confiable debido a que el aceite se extrae cuando el equipo se encuentra a su temperatura de operación, por medio de una manguera nueva hacia un recipiente limpio y hermético, de esta manera no existen contaminantes en el aceite y los resultados en los análisis son exitosos.

En la toma de muestras se debe tener en cuenta los protocolos para poder efectuar un correcto análisis de aceite, con una muestra exitosa se podrá obtener resultados veraces que determinará el estado del aceite para la toma de decisiones.

Un análisis exitoso del aceite se debe a un muestreo correcto cumpliendo con una obtención máxima de información y siguiendo una frecuencia adecuada del muestreo.

3.6.1. Muestreo con manguera y bomba de vampiro

El muestreo con la bomba de vampiro es el método con un menor riesgo de contaminación debido a que la succión se realiza con una manguera que ingresa por el medidor de aceite hasta la mitad entre el cárter y el nivel del lubricante, este muestreo se realizó utilizando los materiales que se mencionaron en el apartado 3.2. En la Ilustración 12-3 se observa el proceso para la succión del lubricante en un reductor de velocidad.

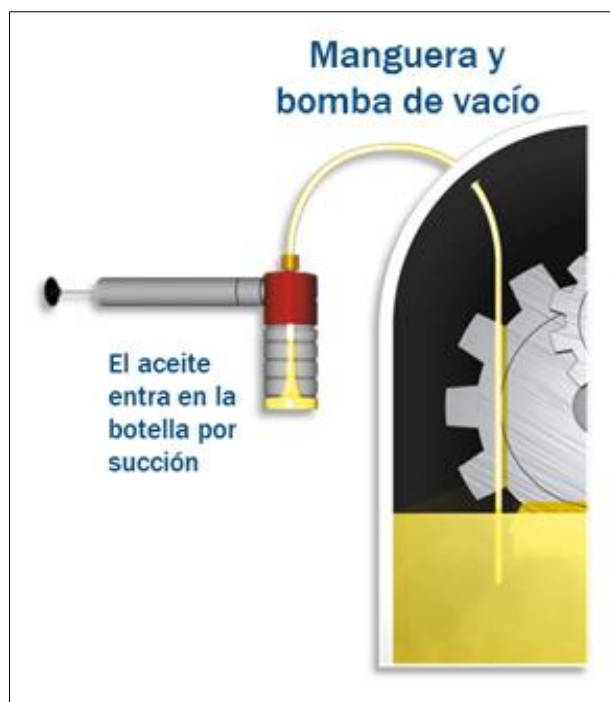


Ilustración 12-3: Muestreo con manguera y bomba de vampiro

Fuente: (Noria, 2014, p. 2).

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Es el método adecuado ya que se puede obtener una muestra limpia y libre de impurezas que podrían dar un resultado incorrecto del análisis. Con la obtención de la muestra de un equipo la manguera deberá ser desechada y remplazada con una nueva este procedimiento se lo realizará para cada una de las muestras evitando así la contaminación.

Para la exitosa toma de muestras en el aceite se tomará en cuenta que la bomba de vampiro se encuentre limpia y sin restos de contaminantes, de esa manera se podrán obtener resultados técnicos y específicos de la muestra tomada del cárter del reductor de velocidad liberando los contaminantes que puedan existir en el ambiente al momento del muestreo. Para la toma de muestras el reductor de velocidad debe estar a su temperatura de operación.

Con el punto de succión identificado se procede a limpiar la superficie para evitar el ingreso de contaminantes como se muestra en la Ilustración 13-3.



Ilustración 13-3: Limpieza de la superficie en la bayoneta

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Con la bomba tipo vampiro libre de impurezas se acopló el envase plástico y se lo enrosca.



Ilustración 14-3: Acople del envase plástico

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Se insertó la manguera de 5/16 de pulgada a la bomba de vampiro, asegurando que sobresalga unos 3 milímetros aproximadamente, y apretando la tuerca de retención.



Ilustración 15-3: Acople de la manguera con la bomba de vampiro

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Se corto el tubo de plástico aproximadamente 20 centímetros más con referencia a la medida de la varilla de medición de esta manera se alcanza a llegar al centro del reservorio y se logra tener una distancia prudencial para bombear el aceite con la bomba de vampiro.

Se inserta la manguera por el medidor del aceite (Bayoneta) hasta aproximadamente la mitad entre el cárter y el nivel del aceite. Se procede a succionar el aceite del reductor manteniendo la bomba en posición horizontal, activando el efecto de vacío de esta. Verter el aceite en el envase y completarlo hasta unos tres cuartos aproximadamente el cual es el nivel requerido de la muestra.



Ilustración 16-3: Toma de muestra del aceite

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Se extrae el tubo de la bomba de vampiro y se lo desecha, debido a que ya se encuentra contaminado con el aceite. Se retira el envase plástico de la bomba de vampiro y se coloca la tapa, asegurándose que no ingresen contaminantes al envase.



Ilustración 17-3: Sellado del envase y desecho de manguera

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Se debe asegurar los datos en el envase de la muestra con la información pertinente en el membrete de la extracción del aceite, para posteriormente enviarlos al laboratorio.

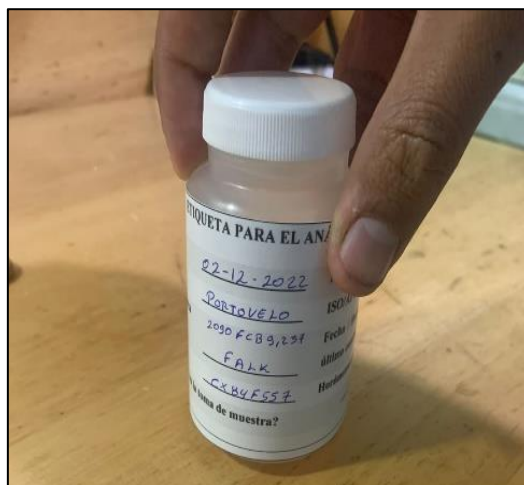


Ilustración 18-3: Adosado de membrete

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En otros casos cuando el aceite trabaja bajo condiciones anormales o críticas, se debe colocar datos adicionales que muestren información precisa de su uso como la presencia de alta cantidad

de espuma, emulsiónamiento, variación de color y olores anormales como el quemado en aceites industriales, a gasolina entre otros.

3.7. Realización de las pruebas en el laboratorio de tribología

La evaluación del estado del aceite lubricante en este apartado comprende el análisis de las propiedades de viscosidad, densidad, contaminación por agua, nivel de limpieza, análisis elemental, TAN (Número de ácido total) y la integridad del fluido, haciendo un estudio comparativo con los límites condinatorios o de envejecimiento por normas y compañías internacionales y el fabricante.

En la tabla 14-3 se indican el número muestras con su respectiva información.

Tabla 14-3: Identificación de las muestras.

Aceite	Fecha	Número de muestra	Número de horas del equipo	Número de horas del aceite
Gearbox 320 EP	13/6/2022	1	20834,55	0
Gearbox 320 EP	13/6/2022	2	25640,46	4805,91
Gearbox 320 EP	22/7/2022	3	26357,2	5522,65
Gearbox 320 EP	6/9/2022	4	27032,04	6197,49
Gearbox 320 EP	7/10/2022	5	27682,34	6847,79
Gearbox 320 EP	2/12/2022	6	28705,19	7870,64
Gearbox 320 EP	4/1/2023	7	29189,19	8354,64

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Con los equipos del laboratorio de tribología de la facultad de mecánica y con los estudios complementarios realizados por una empresa privada de análisis de aceite, se logró analizar siete muestras de aceite de las cuales una muestra contiene el aceite nuevo.

3.8. Análisis con la Metodología SACODE

El análisis de aceite es una prueba múltiple de laboratorio que se usa para monitorear la condición de lubricante usado en las máquinas. El estudio de estos resultados de laboratorios se obtiene información importante que permite tomar decisiones respecto al aceite, es por ello que debemos optar por una metodología que permita clasificar los resultados.

En los reportes de los análisis de aceite es muy común que las personas dirijan su atención directamente a los datos de desgaste. Esto no es lo más conveniente, pues de ser así, el enfoque sería hacia los efectos y no hacia las causas. Todo esto significa una cuantiosa pérdida de tiempo, energía, administración y recursos. El presente trabajo se centra justamente en cómo se deben interpretar los resultados y con ello, obtener el máximo beneficio del análisis de aceite.

La metodología SACODE aporta las bases adecuadas para realizar una correcta interpretación de los resultados del análisis de aceites través de un orden sistemático. La metodología SACODE cuenta con las siglas que indica un orden de tres categorías las cuales sirven para revisar el análisis: SA para “Salud”, CO para “Contaminación” y DE para “Desgaste” (Pozo et al., 2014, p. 207).

A continuación, se explica con detenimiento cada etapa.

3.8.1. Salud (SA)

Son aquellos cambios relacionados con el aceite y están conformados por las siguientes propiedades:

Viscosidad, número de ácidos totales (TAN), oxidación, sulfatación, contenido de aditivos (P, Zn, Ca, Mg, etc.).

3.8.2. Contaminación (CO)

Son todos los contaminantes expuestos en el lubricante los cuales son: agua, hollín, partículas de tierra y polvo (Si), solventes, combustibles, otros aceites lubricantes, refrigerante, etc.

El aceite lubricante cuando se contamina afecta a la máquina y puede resultar un grado alto de daño, con la contaminación de partículas sólidas, fluidos o gases inmersos en el equipo.

Los tipos de contaminantes que se pueden encontrar en el lubricante son los presentados en la tabla 15-3.

Tabla 15-3: Tipos de contaminantes.

Partículas duras	Contaminantes blandos
Silicio	Agua
Metales brillantes	Aire
Metales negros	Compuesto derivado de la degradación del aceite: - Lodo - Barniz
Herrumbre	
Fibras	
Finos	

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

La contaminación del aceite es una de las principales causas para el deterioro del aceite, en la tabla 16-3 se muestra las principales causas.

Tabla 16-3: Problemas y causas de la contaminación.

Problemas	Causas
Aumento de la viscosidad	Contaminación con sólidos, polvo, agua, productos de la oxidación o agregación de aceite con mayor viscosidad.
Gran contenido de insolubles	Contaminación con sólidos, polvo y metales.
Gran contenido de agua	Contaminación con agua o aire húmedo.

Fuente: (Infraspeak, 2013, p. 109)

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

3.8.3. *Desgaste (DE)*

En los análisis de aceite existen elementos metálicos o partículas procedentes del equipo los cuales se los considera como desgaste, estos se encuentran en suspensión en el aceite, como Fe, Cu, Pb, Cr, Al, Sn, Ni, etc.

Para el análisis del hierro se utiliza la metodología SKF la cual incluye un análisis estadístico el cual permite conocer el comportamiento de elemento en función al tiempo. A continuación, en la Ilustración 19-3 se presenta los pasos para su aplicación.

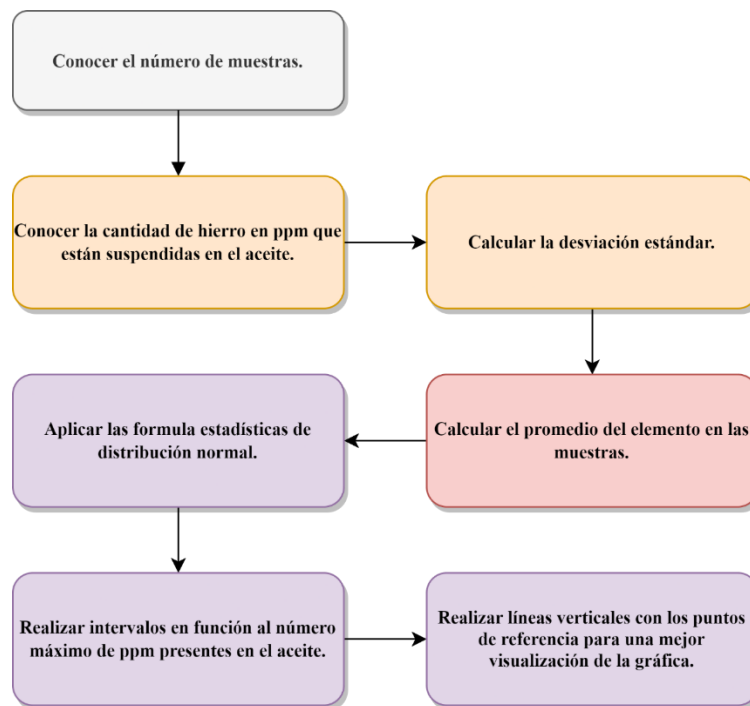


Ilustración 19-3: Pasos para realizar análisis estadístico

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Tabla 17-3: Valores estadísticos de hierro.

Número de muestra	Hierro (Fe) (PPM)	Desviación estándar	Promedio \bar{Fe}	$(Fe - \bar{Fe})^2$	Sigma σ^2	Sigma σ
1	15	7	26	121	46,16 \approx 46	6,782 \approx 7
2	17	7	26	81	46,16 \approx 46	6,782 \approx 7
3	25	7	26	1	46,16 \approx 46	6,782 \approx 7
4	31	7	26	25	46,16 \approx 46	6,782 \approx 7
5	31	7	26	25	46,16 \approx 46	6,782 \approx 7
6	17	7	26	81	46,16 \approx 46	6,782 \approx 7
7	34	7	26	64	46,16 \approx 46	6,782 \approx 7

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Los intervalos se realizan en base al número máximo de partículas por millón que presenta el elemento, pero como recomendación se debe sobrepasar este número para una mejor visualización de la curva estadística.

Tabla 18-3: Distribución normal de hierro.

Intervalos	Distribución normal
0	$5,75528 \times 10^{-5}$
1	$9,68449 \times 10^{-5}$
2	0,00015967
⋮	⋮
48	0,00040825
49	0,00025793
50	0,00015967

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Los valores que se indican en la tabla 19-3 se grafican en un plano cartesiano el cual mostrara una distribución normal.

Tabla 19-3: Valores de referencia de hierro.

Leyenda	Eje x	Eje Y
Hierro referencia	15	0
	15	0,01658
Hierro promedio	26	0
	26	0,05699
Hierro máximo	34	0
	34	0,02966
Sigma σ^2	33	0
	33	0,03456
Sigma σ	40	0
	40	0,00771

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Por último, se deben graficar los siguientes puntos, los cuales formaran una línea vertical, esta servirá para visualizar de manera gráfica el análisis estadístico. En el capítulo 4 se mostrará la gráfica con los datos calculados anteriormente.

3.9. Análisis de aceite lubricante mediante la metodología SACODE

Se realizo un análisis de aceite para determinar el comportamiento del aceite como sus anomalías en él, como materias extras procedentes de varios orígenes del reductor de

velocidad, las partículas que se pueden encontrar mediante un análisis de aceite son elementos metálicos o de óxidos metálicos, partículas de agua y silicio que es el resultado de polvo atmosférico.

La presencia de contaminantes en el lubricante, generan diversos problemas en los equipos de transmisión de potencia, debido a eso se toma en cuenta que los contaminantes pueden llegar a originarse de cualquier lugar. Esto indica que pueden atacar a la superficie lubricada que tiene como protección la película de aceite, perjudicando así a la vida del lubricante en su funcionamiento.

El análisis de aceite nos permite tener datos del estado actual del reductor de velocidad, ayudándonos a predecir futuros daños como la generación de gastos, paradas inesperadas, bajo rendimiento del reductor y acortando la vida de los elementos internos.

3.10. Parámetros para analizar

El aceite lubricante consta de parámetros fisicoquímicos característico para cuidar el reductor de velocidad. Los parámetros para analizar los podemos observar en la tabla 17-3, estos parámetros se diferencian de acuerdo con las normas, compañías internacionales y recomendaciones que presenta el fabricante del motorreductor que han desarrollado estudios con límites condenatorios o de envejecimiento con base en la degradación del aceite.

Tabla 20-3: Parámetros para interpretar del análisis del aceite.

Parámetro para analizar	Unidad de medida
Cobre (Cu)	ppm
Hierro (Fe)	ppm
Cromo (Cr)	ppm
Aluminio (Al)	ppm
Silicio (Si)	ppm
Molibdeno (Mo)	ppm
Plata (Pb)	ppm
Zinc (Zn)	ppm
Boro (B)	ppm
Agua	ppm
Viscosidad	Cst
Nivel de limpieza	Código ISO 4406

Número de acidez total (TAN)	mgKOH/g
Dieléctrico	F/m
Densidad	g/cm ³

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

El fabricante del reductor recomienda varios tipos de lubricante a utilizar, con estudios realizados en su máquina para conocer las prestaciones y necesidades en su reductor de velocidad. El tipo de lubricante se recomienda según el tipo de reductor, sus características y su uso. La calidad del lubricante se decide en función al fabricante o en base a las organizaciones internacionales aceptadas que lograron estudios en el campo lubricacional.

En el análisis de aceite de este motorreductor se consideraron los siguientes parámetros y límites dentro de la metodología SACODE, como se evidencia en la tabla 18-3.

Tabla 21-3: Estructura de técnica SACODE.

SACODE	Parámetros	Límites condenatorios
	Viscosidad	Se considera límites condenatorios del fabricante.
Salud	Densidad	No especifica.
	Dieléctrico	Se consideran los límites condenatorios aportados por el equipo.
	TAN	Se considera límites condenatorios del fabricante.
	Oxidación	Se consideran los límites de la metodología SKF.
	Sulfatación	Se consideran los límites de la metodología SKF.
	Zinc	Se consideran los límites de la metodología SKF.
	Boro	Se consideran los límites de la metodología SKF.
	Calcio	Se consideran los límites de la metodología SKF.
	Magnesio	Se consideran los límites de la metodología SKF.
	Fósforo	Se consideran los límites de la metodología SKF.
	Molibdeno	Se consideran los límites de la metodología SKF.
	Sodio	Se consideran los límites de la metodología SKF.
Potasio	Se consideran los límites de la metodología SKF.	
Contaminación	Agua	Se considera límites condenatorios del fabricante.
	Silicio	Se considera límites condenatorios del fabricante.
	Aluminio	Se considera límites condenatorios de Detroit Diésel.
Desg aste	Cobre	Se considera límites condenatorios del fabricante.
	Hierro	Se considera límites condenatorios del fabricante y la

		metodología SKF.
	Cromo	Se consideran los límites de VOITH.
	Plata	Se considera límites condenatorios de Detroit Diésel.
	Estaño	Se consideran los límites de VOITH.

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En las tablas anteriores no se encuentran los valores del Oil View Check esto es debido a que el equipo tiene incorporado una base de datos de alarmas las cuales las compara con el aceite usado y emite un gráfico con valores y alertas de la condición del aceite.

3.11. Interpretación de los análisis de laboratorio

Los análisis de laboratorio son una importante herramienta para el mantenimiento, es por ello que se deben conocer los conceptos para interpretar y correlacionar las diferentes pruebas efectuadas (Albarracín, 2006).

Se debe tener en cuenta que los resultados de las pruebas efectuadas para conocer la degradación de aceite deben ser comparados con límites que establezcan la vida útil del lubricante, es por ello que en el capítulo 4 se van a presentar los resultados detallados obtenidos en las pruebas de laboratorio para cada propiedad analizada.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El siguiente capítulo presenta una serie de datos recopilados con 7 muestras de aceite y sus análisis respectivos con el fin de monitorear el lubricante y además se mencionan las anomalías encontradas en cada parámetro. La información se organizó mediante la metodología SACODE que presenta resultados de salud, contaminación y desgaste en el aceite utilizado. Además, se incorpora un manual de lubricación para el equipo con los pasos y funciones específicas para un procedimiento exitoso.

4.1. Salud del lubricante

En la tabla 1-4 se presentan los resultados de la salud presente en las muestras de aceite.

Tabla 1-4: Resultados de la salud del aceite.

Número de muestra	Número de horas	Viscosidad	Dieléctrico	Número de ácidos totales (TAN)	Oxidación	Sulfatación
1	0	25,29	2,23	0,93	2,7	15
2	4805,91	23,72	2,23	0,64	3,5	12
3	5522,65	23,7	2,23	0,64	3,6	12
4	6197,49	24,02	2,23	0,63	3,5	12
5	6847,79	23,97	2,23	0,69	3,75	13
6	7870,64	23,78	2,23	0,61	3,7	12
7	8354,64	23,82	2,23	0,61	3,7	12

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

4.1.1. Análisis de viscosidad

La viscosidad es el parámetro más importante para conocer el estado actual del aceite lubricante, los parámetros mínimos que establecen Detroit Diésel, ASTM y el fabricante del motorreductor es de un valor del 15% como valor máximo y mínimo de la viscosidad de referencia, la cual

mediante pruebas de laboratorio se determinó un valor de 25,29 cSt y los límites máximos y mínimos están dados por 29,083 cSt y 21,495 cSt respectivamente.

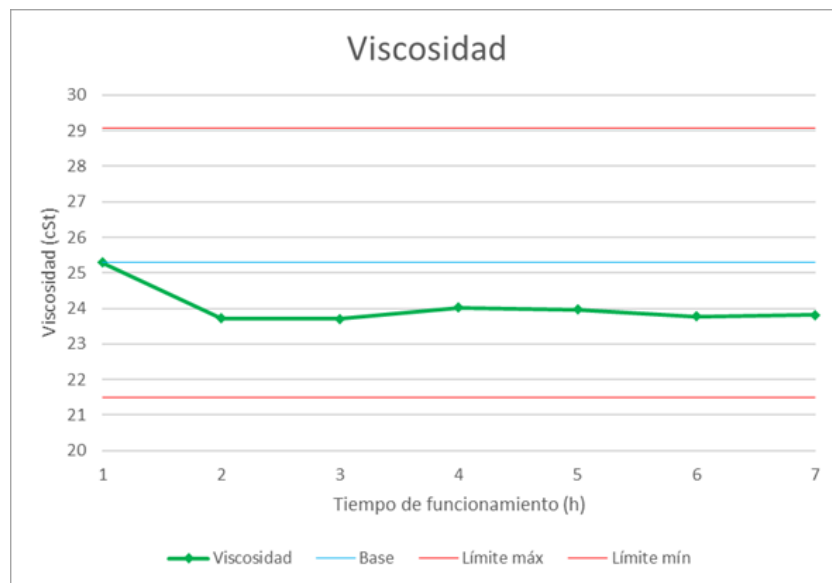


Ilustración 1-4: Gráfica de viscosidad

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Con los resultados obtenidos, se observa en la Ilustración 1-4 como los valores se encuentran en el rango permisible que delimita el fabricante, de esta manera se acepta el cumplimiento del parámetro de viscosidad del aceite. Cabe destacar que a medida que la viscosidad del aceite disminuye, la distancia entre las superficies lubricadas se acortan ambas superficies se acorta.

4.1.2. Análisis de dieléctrico

Los valores del dieléctrico en los análisis de aceite se refieren a Faradios/metro, en la muestra nueva se presenta un valor referencial de 2,23 F/m y el límite condensatorio que indica el equipo Oil View Check en su base de datos es de máximo 0,1 por encima y mínimo de 0,1 por debajo del valor referencial de la muestra.

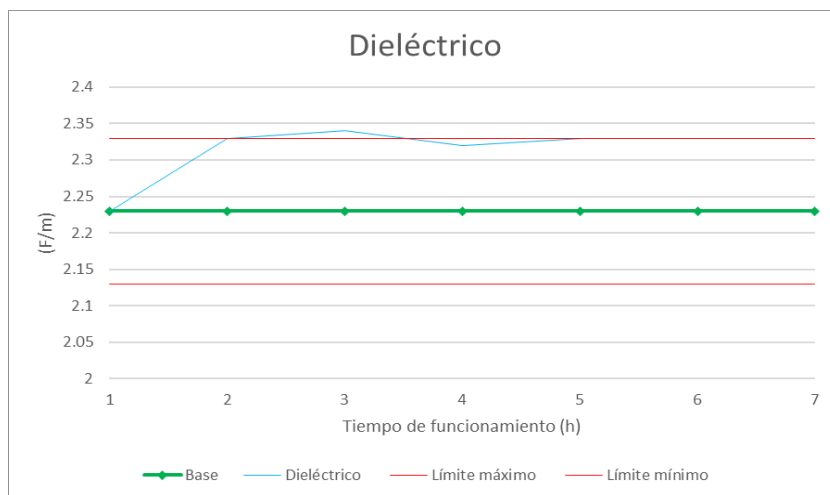


Ilustración 2-4: Gráfica de dieléctrico

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

La mayoría de los aceites lubricantes tienen un valor de dieléctrico de 2,1 a 2,4 F/m. Al comparar el dieléctrico de muestra de aceite de referencia, un cambio de 0,02 sería insignificante pero el valor de la muestra número 3 con un valor de 5522,65 horas, alcanza un valor máximo de 0,11 por encima de la referencia, podría ser causado por el valor del TAN, oxidación o incluso la dilución del combustible pudo haber cambiado la constante dieléctrica.

4.1.3. Análisis de TAN

Los valores del número de ácidos totales (TAN) en los análisis de aceite tiene como unidad mgKOH/g, en la muestra nueva se presenta un valor referencial de 0,93 y el límite condensorio que indica el fabricante del motorreductor es de un máximo del 50% mientras tanto que las normas ASTM su valor máximo es del 30%, ambos por encima del valor de referencia del aceite nuevo, los datos se obtuvieron en el equipo FluidScan.

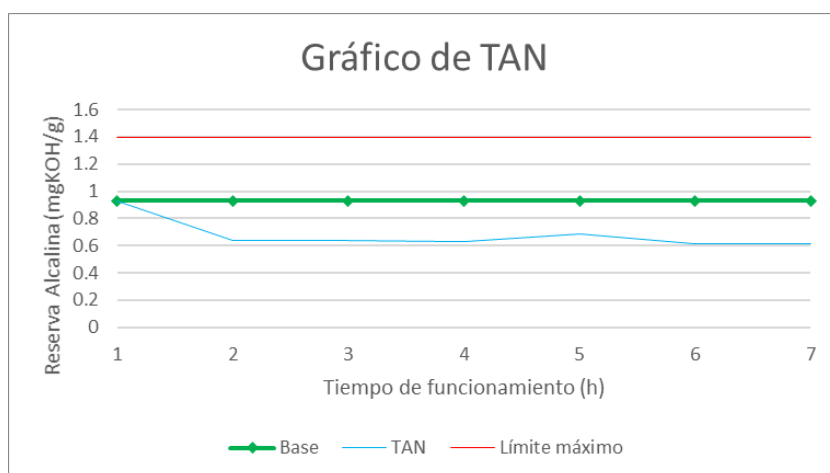


Ilustración 3-4: Gráfica de número de ácidos totales

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

El fluido mostrado en la Ilustración 3-4 tiene un valor que inicialmente disminuye con el servicio, a medida que se agota lentamente su paquete de aditivos ácidos. La reducción del número de ácidos totales (TAN) indica el agotamiento de algunos aditivos de extrema presión (EP), como el molibdeno y fósforo.

Es una importante propiedad de calidad para muchos tipos de aceites, ya que puede afectar la estabilidad y vida útil del producto. Los aceites con un alto TAN pueden ser más susceptibles a la oxidación y degradación, lo que puede resultar en una disminución de la calidad del aceite y una reducción de su vida útil.

4.1.4. Análisis de oxidación y sulfatación

Estos tres parámetros son los que indican la salud del lubricante, los cuales intervienen en la disminución de la reserva alcalina, muchas de las veces no se les asigna límites condenatorios, pero su evolución puede mostrar problemas internos del lubricante.

Los valores iniciales de oxidación del aceite nuevo tienen un valor 3 abs/0,1 mm, el cual nos informa de una oxidación prematura del aceite por malas prácticas de almacenamiento.

Para evitar la oxidación y la sulfatación del aceite, es importante utilizar aceites de alta calidad y cambiar el aceite regularmente. También es importante evitar la exposición del aceite a altas temperaturas y a impurezas, y utilizar- filtros de aceite de alta eficiencia para eliminar las partículas y otros contaminantes.

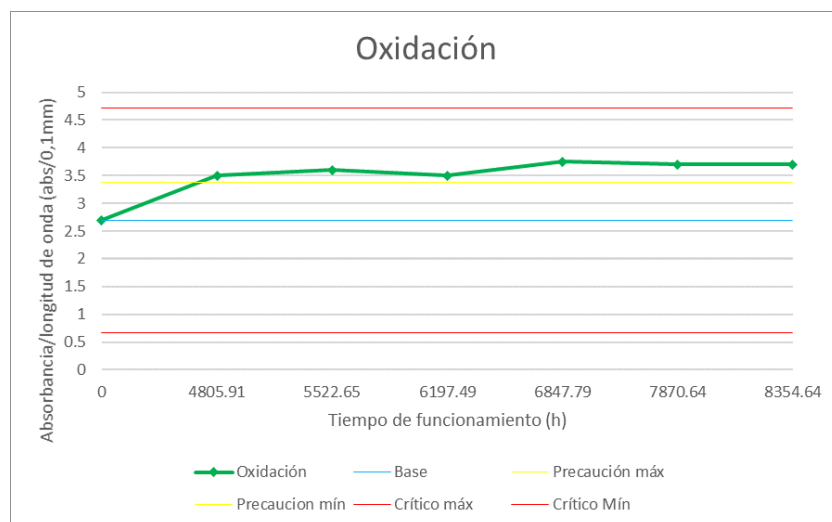


Ilustración 4-4: Gráfica de oxidación

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En la Ilustración 4-4 se observa que el aceite tiene un valor de oxidación inicial de 2,7 abs/0,1mm el cual puede ser por malas prácticas de almacenamiento, al no tener un límite de envejecimiento se puede observar como el valor de oxidación alcanza a crecer un máximo de 1,05 abs/0,1mm del valor de referencia.

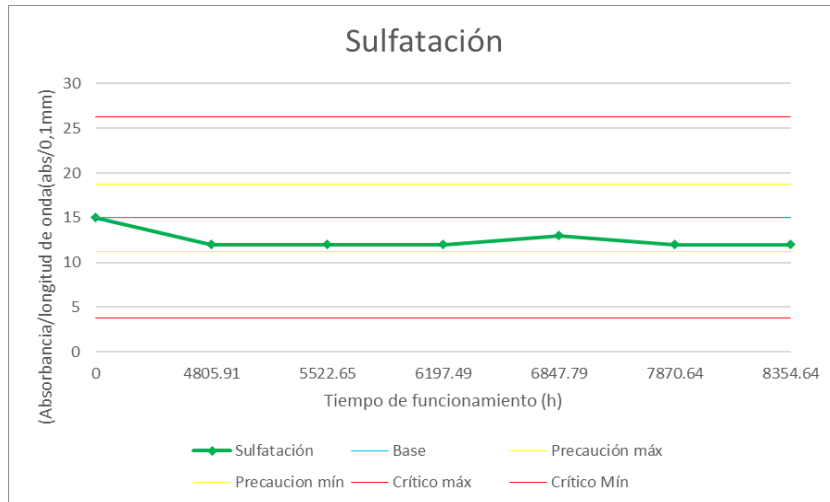


Ilustración 5-4: Gráfica de sulfatación

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

El parámetro de sulfatación del aceite lubricante va directamente relacionado con los parámetros anteriores de glicol, oxidación y presencia de agua, por lo que tomando en cuenta que se encontraban dentro de los rangos permisibles, se deduce que el motorreductor se encuentra sin degradación excesiva del aceite.

4.1.5. Análisis de molibdeno, calcio, fósforo, zinc, magnesio, boro, sodio y potasio

Los límites condinatorios de los aditivos, que maneja el fabricante y la compañía Detroit Diésel son altos, por lo tanto, no es recomendable superar estos valores ya que no permitirá el control desde un enfoque proactivo, pero cabe destacar que los valores indicados por los autores son para un análisis general de un lubricante, en este estudio se analizó los elementos en función a una muestra de referencia del aceite nuevo y mediante porcentajes se observó el límite de cada elemento. Los valores entregados de los análisis de aceite permitirán diagnosticar de una manera oportuna y rápida la degradación del aditivo.

La fuente de SKF indica los límites de normal, precaución y crítico en función a su valor referencial de cada elemento, el aceite contiene un paquete de aditivos y la caída de esta concentración indica un deterioro del aceite, la tabla 2-4 indica los valores porcentuales mínimos de los aditivos.

Tabla 2-4: Límites condenatorios de aditivos.

Límites condenatorios			Elemento	Número de horas						
Normal	Precaución SKF	Crítico SKF		0	4805	5522	6197	6847	7870	8354
Porcentual Base	Porcentual -25 %	Porcentual -50 %	Molibdeno	415	3	3	4	3	12	20
			Calcio	26	13	3	39	1	3	2
			Fósforo	551	127	133	153	141	85	154
			Zinc	18	16	0	19	5	0	0
			Magnesio	3	12	0	0	0	0	0
			Boro	2	0	2	1	1	2	2
			Sodio	3	0	0	0	1	0	0
			Potasio	1	0	1	1	1	1	1

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

A continuación, se presentan las gráficas de cada elemento los cuales corresponden a la aditivación del aceite.

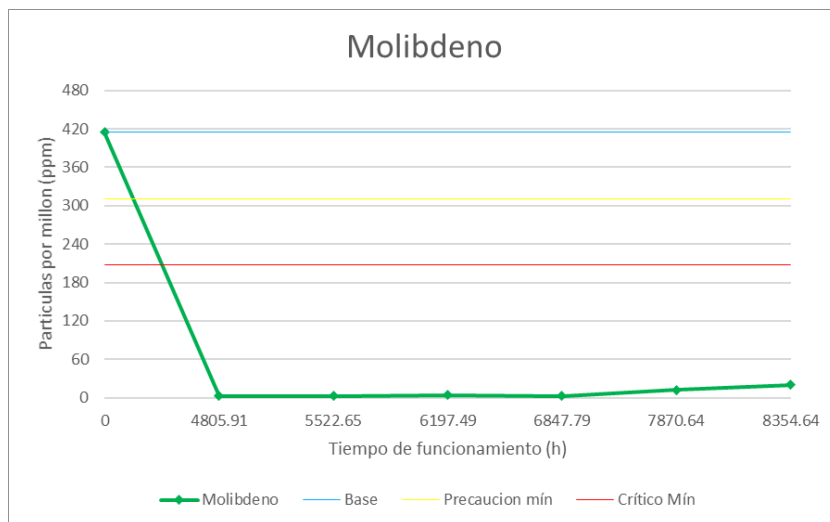


Ilustración 6-4: Gráfica de molibdeno

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En la Ilustración 6-4 se observa como el molibdeno el cual es un aditivo de extrema presión tiene valores casi nulos, con un decaimiento excesivo, por ende, el aceite ya no cumple con la función de inhibir la corrosión en el motorreductor.

Para conocer el horómetro exacto donde pudo haber fallado el aditivo de molibdeno es necesario conocer la ecuación de la recta entre la muestra virgen y la primera, conociendo los datos entre cada muestra se concluye con la ecuación:

$$y - 415 = -0,085x$$

Donde:

y: representa las partículas por millón del molibdeno

x: Representa el tiempo de funcionamiento en horas

Conociendo que el aditivo se encuentra en estado crítico con 207 partículas por millón aproximadamente, se debe reemplazar la formula anterior para conocer el número de horas de funcionamiento en la cual fallo el elemento.

$$x = \frac{207 - 415}{-0,085} = 2421,23 \text{ horas}$$

En base a los resultados calculados anteriormente se puede verificar que el elemento de molibdeno dejo de actuar como un aditivo aproximadamente a las 2421,236 horas.

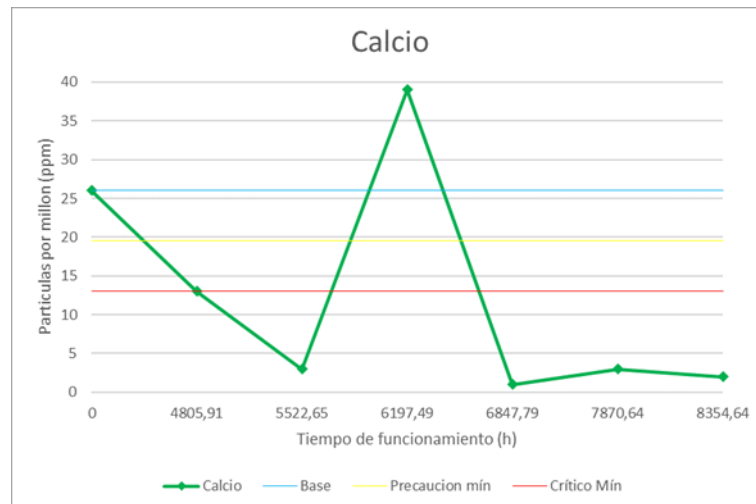


Ilustración 7-4: Gráfica de calcio

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En la Ilustración 7-4 se observa como el calcio empezó con su valor referencial de 26 PPM y a medida del tiempo empieza a disminuir, en las 6197,49 horas se observa como el calcio aumenta hasta un valor de 39 PPM esto se dio por reposición del aceite, con el aumento de horas en funcionamiento del aceite se observa que excede el límite crítico, esto quiere decir que ya no cumple la función de detergente, dispersante e incrementador de alcalinidad.

Utilizando el mismo principio de análisis de molibdeno se puede obtener el número de horas en base a la gráfica, para el calcio se encontró que el horómetro estuvo aproximadamente a 4805,91 horas, la cual coincide con la primera muestra analizada del aceite usado.

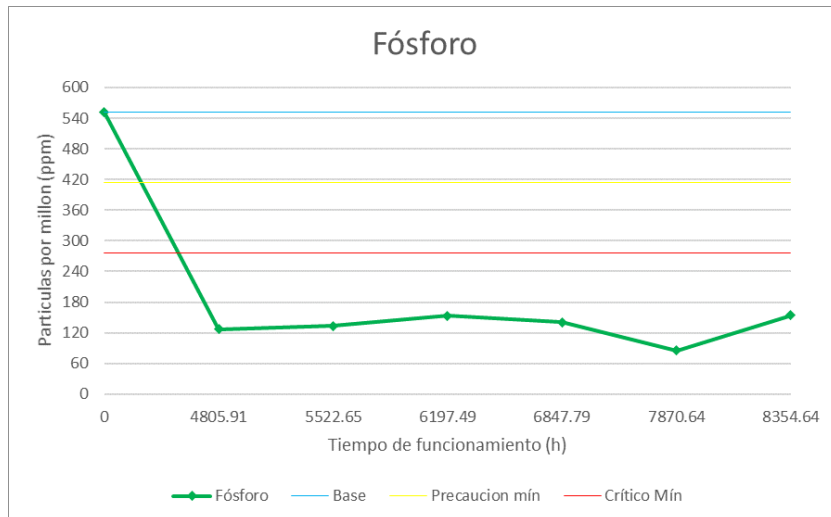


Ilustración 8-4: Gráfica de fósforo

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En la Ilustración 8-4 el fósforo decae hasta pasar el límite crítico, es decir el aditivo de extrema presión ya no cumple la función de antidesgaste en la máquina.

Utilizando el mismo principio de análisis de molibdeno se puede obtener el número de horas en base a la gráfica, para el fosforo se encontró que el horómetro estuvo aproximadamente a 3130,68 horas, esto significa que en ese valor el fosforo sobrepaso el límite crítico.

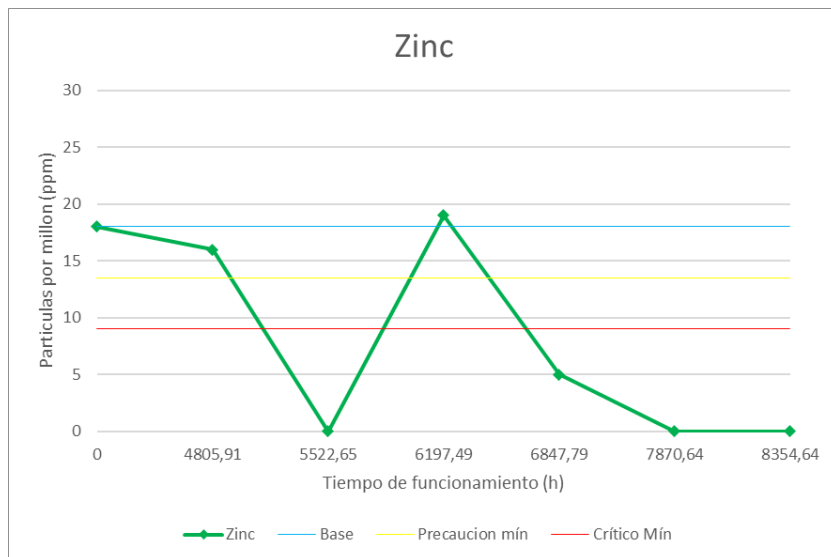


Ilustración 9-4: Gráfica de zinc

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En la Ilustración 9-4 el zinc decrece hasta las 5522,65 horas y se incrementa en 6197,49 horas esto es debido a una reposición del aceite y a medida que el aceite sigue en funcionamiento este

excede el límite crítico, por lo cual ya no está cumpliendo su función de antidesgaste, antioxidante e inhibidor de corrosión.

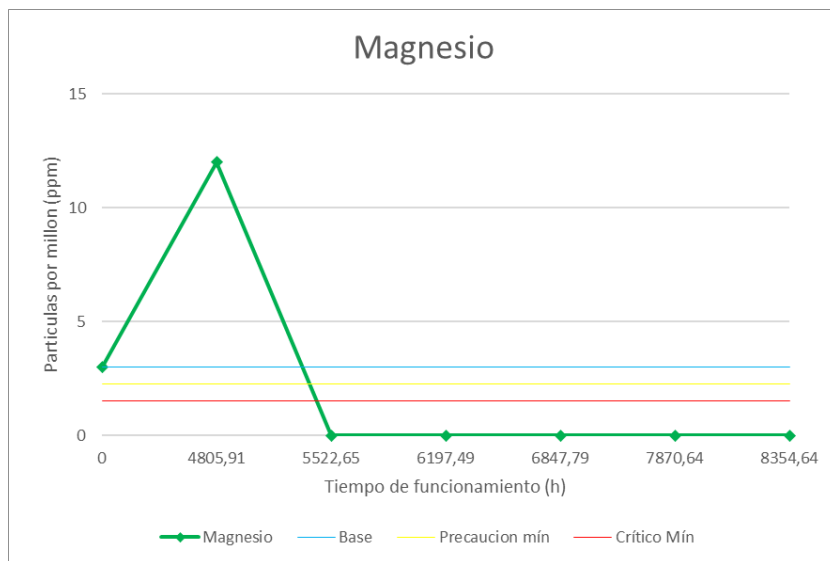


Ilustración 10-4: Gráfica de magnesio

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En la Ilustración 10-4 se observa como en las 4805,91 horas tiene un pico máximo de 12 PPM esto puede ser debido a una reacción química dentro del aceite, a medida que el lubricante sigue en funcionamiento el magnesio excede el límite crítico, por lo tanto, ya no actúa como un detergente, dispersante o incrementador de alcalinidad.

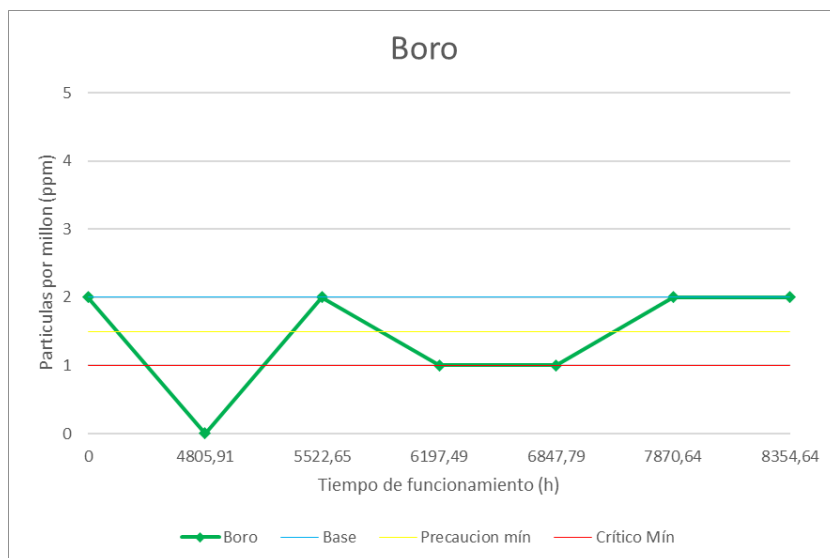


Ilustración 11-4: Gráfica de boro

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En la Ilustración 11-4 se observa como en las 4805,91 horas el boro ya no tiene el valor mínimo para actuar como un detergente, dispersante y antioxidante, pero se observa en la gráfica que en las reposiciones de aceite el boro alcanzo el valor mínimo para seguir cumpliendo con sus funciones en el lubricante.

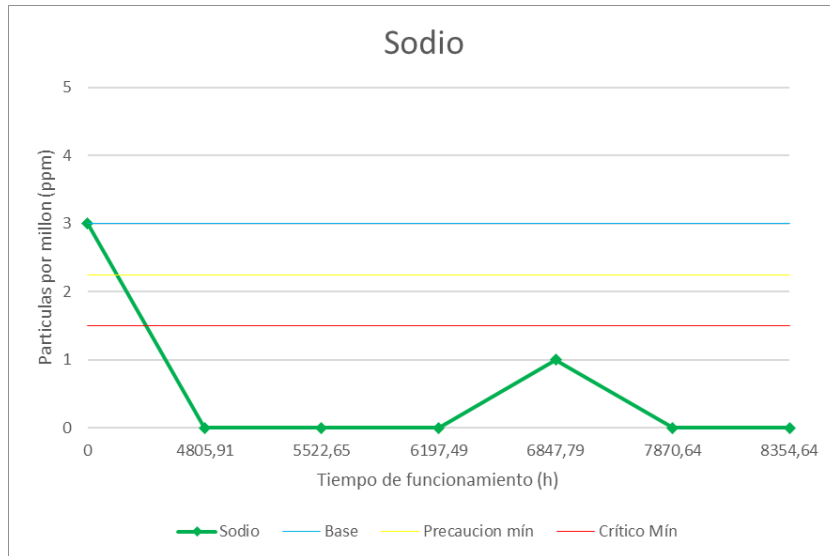


Ilustración 12-4: Gráfica de sodio

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

El sodio actúa como un aditivo inhibidor de corrosión en el aceite, en la Ilustración 12-4 se observa como el sodio ha perdido sus propiedades de inhibición. Cabe destacar que en las 6847,79 horas existe un aumento de 1 PPM esto puede darse a tolerancias del equipo o una reposición del aceite.

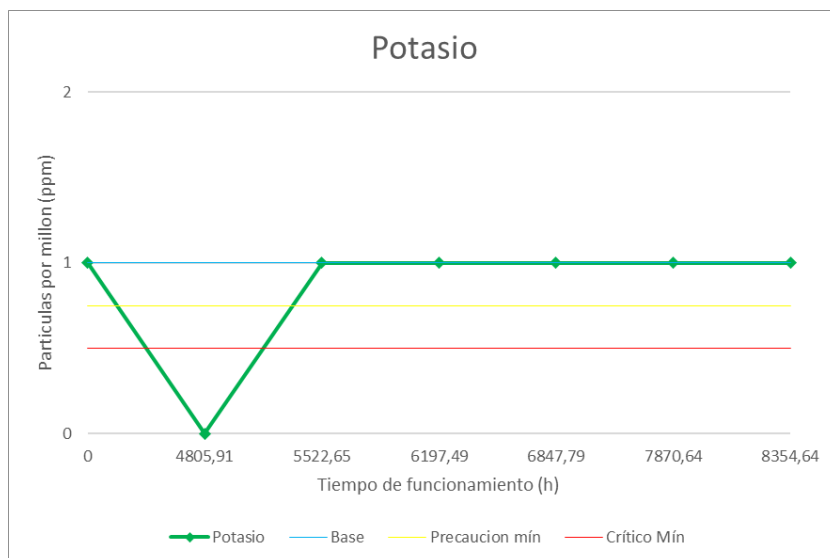


Ilustración 13-4: Gráfica de potasio

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

El elemento de potasio acta como un aditivo, en la Ilustración 13-4 se observa como su línea base es de 1 PPM y en la primera muestra tomada a las 4805,91 horas está por debajo de su límite mínimo este valor puede darse por una tolerancia en el equipo, el potasio al igual que el sodio acta como un inhibidor de corrosión.

4.2. Contaminación del lubricante

En la tabla 3-4 se presentan los resultados de la contaminación presente en las muestras de aceite. Cabe destacar que los elementos mencionados en la tabla anterior tienen límites condenatorios en función a diferentes autores. A continuación, se detalla cada uno de los elementos que causa contaminación en el aceite.

Tabla 3-4: Resultados de la contaminación del aceite.

Número de muestra	Número de horas	Aluminio	Silicio	Agua	Código de limpieza
1	0	0	0	73	
2	4805,91	0	1	134	23/21/14
3	5522,65	1	6	134	
4	6197,49	0	6	127	23/22/19
5	6847,79	0	6	122	23/22/20
6	7870,64	1	3	153	23/22/16
7	8354,64	1	6	138	

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

4.2.1. Aluminio

Los óxidos de aluminio presentes en el medio ambiente suelen estar asociados con la contaminación por silicio (suciedad).

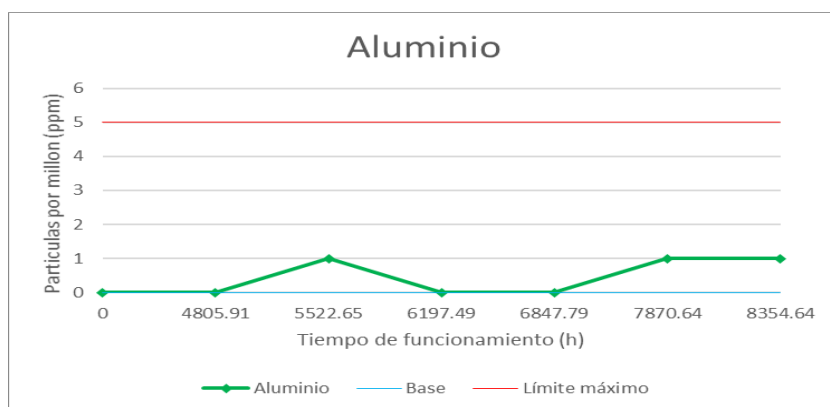


Ilustración 14-4: Gráfica de aluminio

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

La Ilustración 14-4 indica las partículas por millón de aluminio, normalmente los elementos internos de un motorreductor que contienen este elemento son los bujes, la compañía Detroit Diesel especifica un límite máximo de 5 PPM en la muestra de aceite, por lo consiguiente el elemento no alcanza su límite máximo, obteniendo como valores máximos de 1 PPM en las muestras.

4.2.2. Silicio

El silicio es uno de los agentes más dañinos, el cual perjudica al aceite lubricante teniendo una degradación prematura, los límites establecidos por las fuentes muestran un rango máximo permisible de 25 partículas por millón si se excede este valor se deben a condiciones anormales o agresivas que están presentes en la máquina, un factor para un índice alto es la saturación de polvo.

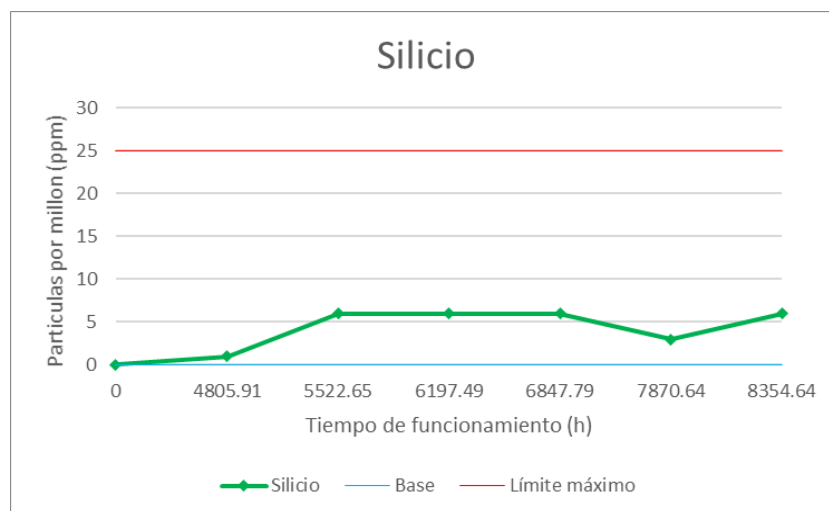


Ilustración 15-4: Gráfica de silicio

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

El contenido de silicio en las muestras de aceite se debe al ingreso de partículas de tierra o polvo, en las muestras analizadas se observa como el elemento no supera el límite máximo de 25 PPM permisible dado por el fabricante.

4.2.3. Agua

Los valores de agua en los análisis de aceite se refieren a partículas por millón, en la muestra nueva con el analizador FluidScan se presenta un valor referencial de 73 ppm y su límite condensorio máximo indicado por el fabricante es de 500 ppm, por encima de ese valor se deben tomar acciones.

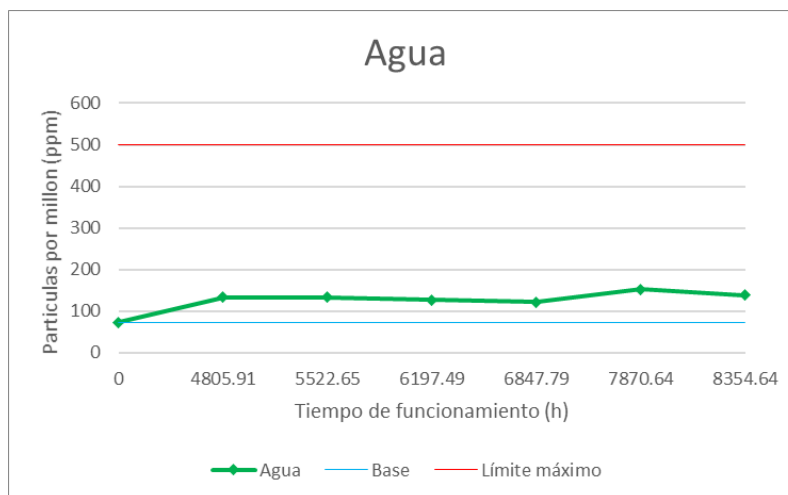


Ilustración 16-4: Gráfica de agua

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

El agua es un contaminante prácticamente intolerable en los aceites esto es debido a que produce oxidación y en consecuencia una degradación temprana del lubricante. La evaluación de este parámetro se encontró en un rango normal.

En los análisis de aceite complementarios que se realizaron en un laboratorio certificado se indicó como negativo la presencia de agua, esto es debido a que la cantidad de agua es irrelevante en los resultados.

4.2.4. Código de limpieza

En la tabla 4-4 se presentan el tamaño de partículas y la cantidad de estas con su respectivo código ISO en base a la norma ISO 4406, que expresa únicamente los tamaños de 4/6/14 micrones.

Tabla 4-4: Códigos y tamaños de limpieza de las muestras de aceite.

Tamaño	4805,91 horas	Código ISO	6197,49 horas	Código ISO	6847,79 horas	Código ISO	7870,64 horas	Código ISO
4μ	43831	23	46028	23	44217	23	43648	23
6μ	10718	21	31927	22	30871	22	24863	22
10μ	359		12404		13864		3677	
14μ	92	14	3802	19	5488	20	551	16
18μ	18		1364		1964		131	
21μ	12		940		1232		69	
38μ	2		184		127		4	
50μ	1		120		82		2	

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

El fabricante del motorreductor indica un código de limpieza ISO el cual comprende valores de los tamaños de partículas que vienen dado en tres números adimensionales separados, los cuales se interpretan en una tabla estándar ISO 4406, para el fabricante no podrán superar el código 22/22/18, como se indica en la tabla 5-4.

Tabla 5-4: Límites de limpieza del fabricante

Tamaño (micras)	Máximo de análisis de aceite		Fabricante	
	Partículas	ISO	Partículas	ISO
4	44217	23	160000-320000	25
6	30871	22	20000-40000	22
14	5488	20	1300-2500	18

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Con los resultados obtenidos se observa como las partículas de 14 micras superan el límite establecido por el fabricante.

Los límites especificados por grupo SKF indican tres niveles, donde se muestran límites normales, de precaución y críticos, en la tabla 6-4 se exponen los valores.

Tabla 6-4: Límites de limpieza de SKF

Tamaño	Máximo de análisis de aceite		Límites SKF					
	Partículas	ISO	Partículas normales	ISO	Partículas precaución	ISO	Partículas críticas	ISO
4 μ	44217	23	10000-20000	21	20000-40000	22	40000-80000	23
6 μ	30871	22	2500-5000	19	5000-10000	20	10000-20000	21
14 μ	5488	20	640-1300	17	1300-2500	18	2500-5000	19

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Se observa en la tabla anterior como las partículas de 4,6 y 14 micrones se encuentran en un límite crítico, por lo anterior mencionado se muestra que existe una contaminación con las partículas de 14 micras. Generalmente estas partículas son generadas en el arranque por el desgaste adhesivo de los componentes internos.

Cabe destacar que la disminución de partículas en las diferentes muestras de aceite es debido a

una filtración que realiza el equipo.

4.3. Desgaste

En la tabla 7-4 se presentan los resultados del desgaste presente en las muestras de aceite.

Tabla 7-4: Resultados de partículas de desgaste del aceite.

Límites condenatorios			Elemento	Número de horas						
Normal	Precaución SKF	Crítico SKF		0	4805	5522	6197	6847	7870	8354
Estadística Promedio	Estadística +1 σ	Estadística +2 σ	Hierro	15	3	3	4	3	12	20
Estadística < +1 σ	Estadística +1 σ	Estadística +2 σ	Cobre	0	0	1	0	0	1	1
			Cromo	0	0	0	0	0	0	0
			Estaño	1	0	0	0	0	1	1
			Plata	0	0	1	0	0	1	1

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En la tabla anterior se indica los diferentes tipos de elementos que interfieren en el desgaste del motorreductor, valorados en partículas por millón siendo el hierro el metal principal debido a sus valores elevados respecto al resto. Cabe destacar que los elementos de cobre, cromo, estaño y plata no presentan valores significativos en el deterioro del equipo.

4.3.1. Hierro

El hierro es generalmente el elemento más abundante en los reductores de velocidad por el cual suele ser el de mayor presencia dentro de un análisis de aceite. Las fuentes indican valores promedios críticos que están entre las 150 partículas por millón según recomienda el fabricante. Los valores mayores indicados anteriormente demostrarían un desgaste en la máquina y comprometerían seriamente el lubricante y la vida útil del motorreductor. Conociendo los valores de hierro es necesario realizar un análisis más exhaustivo mediante cálculos estadísticos, en la Ilustración 17-4 se observa una distribución normal con límites de precaución, críticos, valores promedios, base y máximo del elemento.



Ilustración 17-4: Gráfica de hierro

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Las partículas de hierro normalmente son desprendidas de los engranajes y cojinetes. Para las muestras de aceite cabe destacar que el aceite nuevo tiene 15 PPM, por lo que es anormal, esto puede ser debido a una mala práctica de extracción del aceite con la bomba de vampiro.

Se observa como el valor máximo del hierro esta entre los límites de precaución y crítico, por lo tanto, se deberá estar alerta a los próximos análisis de aceite.

4.3.2. *Cobre*

Los valores de cobre en partículas por millón máximos recomendado por el fabricante del motorreductor es de 75, en los análisis de aceite se encuentran valores bajos del elemento es por ello por lo que el cobre no presenta riesgo en el desgaste del equipo en función al tiempo. Cabe destacar que el cobre en el interior del motorreductor se encuentra generalmente en bujes.

4.3.3. *Cromo*

El cromo es un elemento que se encuentra frecuentemente en los cojinetes, para los análisis de aceite no se encontraron partículas, esto significa que las partes internas del equipo no están desprendiendo el elemento.

4.3.4. *Estaño*

En las muestras se observa como en el análisis del aceite nuevo existe un valor de 1 PPM esto

pudo deberse a una tolerancia, error del equipo o una mala práctica de la extracción del aceite. El estaño generalmente se encuentra en los cojinetes internos del motorreductor, en la tabla 7-4 se puede observar cómo no existen indicios de este elemento hasta las 6847,79 horas de funcionamiento.

4.3.5. Plata

El elemento de plata es un metal de desgaste el cual se corroe junto con el Zinc, según la fuente de Detroit diésel el valor máximo permisible es de 2 partículas por millón. En la tabla 7-4 se observan los valores máximos.

La plata generalmente se encuentra en el interior de un motorreductor con los elementos de cojinetes, bujes, sellos o recubrimientos de otros elementos internos, los valores de plata coinciden con el valor promedio, este elemento se comporta normal en función al tiempo de uso del lubricante.

La siguiente tabla indica el comportamiento de cada parámetro estudiado en el monitoreo del aceite Gearbox 320 EP con bases fundamentales en la metodología SACODE.

Tabla 8-4: Resultados de las propiedades y elementos estudiados en el análisis de aceite.

Propiedad o elemento	Base	✓	✗	Observaciones
Parámetro de Salud				
Viscosidad	25,29	✓		Valores adentro del rango permisible del aceite.
Dieléctrico	2,23	✓		El valor de dieléctrico se encuentra en el límite máximo permitido por el fabricante del equipo.
Número de ácidos Totales (TAN)	0,93		✗	Valores inferiores al límite mínimo permisible por disminución de la aditivación.
Oxidación	2,7	✓		Valores adentro del rango permisible del aceite.
Sulfatación	15	✓		Valores adentro del rango permisible del aceite.
Molibdeno	415		✗	El aditivo no cumple con las especificaciones mínimas para su funcionamiento.
Calcio	26		✗	El aditivo no cumple con las especificaciones mínimas para su funcionamiento.
Fósforo	551		✗	El aditivo no cumple con las especificaciones

				mínimas para su funcionamiento.
Zinc	18		x	El aditivo no cumple con las especificaciones mínimas para su funcionamiento.
Magnesio	3		x	El aditivo no cumple con las especificaciones mínimas para su funcionamiento.
Boro	2	✓		Al ser un aditivo con bajo valor en el aceite no se encuentra con cambios significativos.
Sodio	3		x	El aditivo no cumple con las especificaciones mínimas para su funcionamiento.
Potasio	1	✓		Al ser un aditivo con bajo valor en el aceite no se encuentra con cambios significativos.
Parámetro de contaminación				
Aluminio	0	✓		No presenta índice de contaminación en el aceite.
Silicio	0	✓		No presenta índice de contaminación en el aceite.
Agua	73	✓		No presenta índice de contaminación en el aceite.
Código de limpieza	normal		x	Las partículas de 14 micras presentan una contaminación, su posible cause se debe al arranque del equipo.
Parámetro de desgaste				
Hierro	15		x	Las partículas de hierro no superan el límite máximo establecido por el fabricante, pero cabe destacar que la presencia de hierro en el aceite nuevo es anormal esto pudo ser debido a un mal almacenamiento del lubricante o malas prácticas de extracción.
Cobre	0	✓		No presenta índice de desgaste en el aceite.
Cromo	0	✓		No presenta índice de desgaste en el aceite.
Estaño	1	✓		No presenta índice de desgaste en el aceite.
Plata	0	✓		No presenta índice de desgaste en el aceite.

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En la tabla 8-4 se observan como las propiedades más importantes se encuentran en el rango normal de funcionamiento con excepción del número de ácidos totales (TAN) la cual presenta un decaimiento en función al número de horas de trabajo esto fue debido a la pérdida de aditivos en el aceite, por lo consiguiente este es un indicativo de que la aditivación del aceite ya no cumple con los parámetros mínimos que aseguren la vida útil del motorreductor. Cabe destacar que la contaminación no está influyendo en los límites permisibles, pero el código de limpieza presenta

una anomalía que puede deberse a los consecutivos arranques de la máquina.

El desgaste del equipo no presenta riesgos, pero existe una contaminación en la muestra 0 (muestra virgen) del hierro que puede afectar en los análisis de aceite al ser perjudicial ya que se contara con una muestra ineficiente y con resultados alterados por una contaminación inicial, estas partículas desprendidas pueden causar una oxidación prematura del aceite, así como también una rayadura de los elementos internos del motorreductor.

En base a los cálculos obtenidos de las gráficas de los aditivos se pudo encontrar un número de horas referencial donde los elementos de aditivación del aceite excedieron su límite crítico, a continuación, en la tabla 9-4 se indican los valores.

Tabla 9-4: Fallo en la aditivación del aceite.

Aditivo	Número de horas límite
Molibdeno	2421,23 horas
Calcio	4805,91 horas
Fosforo	3130,68 horas

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

En base a la tabla 9-4 se observa que los aditivos se desgataron aproximadamente a las 2421 horas, esto lo ratifica el fabricante del equipo el cual menciona en su manual y uso de la máquina que el cambio de aceite debe realizarse cada 6 meses o 2500 horas de funcionamiento, también especifica que si el equipo funciona en un atmosfera demasiado húmeda, química o cargada de polvo su cambio de lubricante debe realizarse entre los 3 a 4 meses o 1500 a 2000 horas, todas estas recomendaciones se las hacen si no existe un análisis de aceite. Para este caso específico se logró demostrar que los aditivos del aceite llegaron a un máximo de 2421,23 horas, aproximándose a lo descrito por el fabricante.

4.4. Programa de lubricación

Un manual sobre análisis de aceites es una guía para entender y utilizar el análisis de aceite como una herramienta de mantenimiento predictivo en la industria. El análisis de aceite es una técnica utilizada para detectar la presencia de partículas metálicas, contaminantes y otros problemas que puedan estar presentes en el aceite de una máquina.

Los procedimientos y metodologías específicas pueden variar dependiendo de los objetivos, el tipo de equipo y el tipo de aceite que se analiza. Sin embargo, hay varias organizaciones y

empresas que han desarrollado sus propios procedimientos y guías para el análisis de aceite, y que pueden ser utilizados como referencias útiles.

Procedimiento de muestreo:

- Siga los procedimientos de muestreo adecuados y las técnicas adecuadas de manejo de muestras al recolectar muestras de lubricante.
- Los usuarios deben tener procedimientos escritos para garantizar que las muestras se tomen de manera consistente y de acuerdo con las buenas prácticas de limpieza.
- Para obtener tendencias confiables, las muestras deben tomarse de la misma manera cada vez.
- Se debe recopilar información sobre el entorno operativo, los registros de cambio de aceite y los servicios de mantenimiento para cada elemento o sistema (SKF, 2020).

Muestras representativas

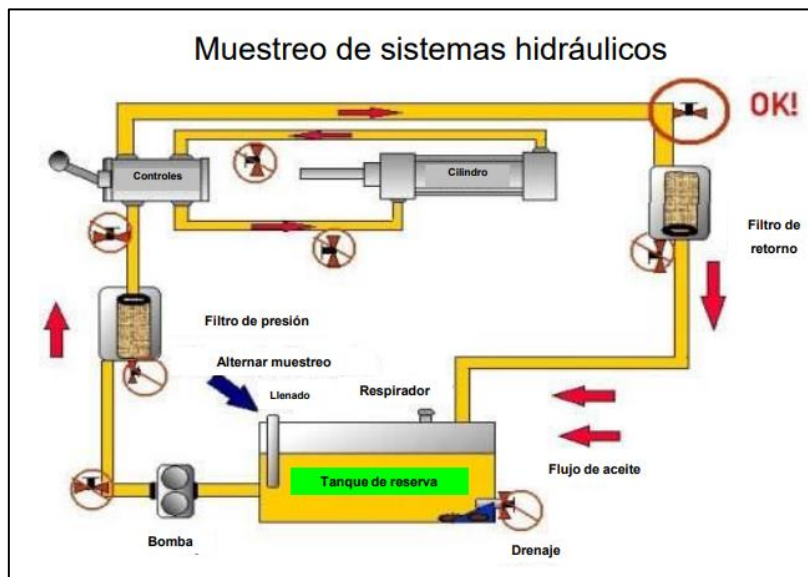


Ilustración 18-4: Gráfica de muestreo de sistemas hidráulicos

Fuente: (SKF,2023)

Recipiente de muestra

Las muestras deben colocarse en recipientes limpios o en los proporcionados por el laboratorio o el proveedor de servicios. 100-120ml (4-5oz): Polietileno, PET, Vidrio.

- Alrededor del 70 % lleno
- Tapa de sujeción - para envío y muestreo

- Es posible que algunos recipientes de plástico no sean aceptables para las pruebas de punto de inflamación (de acuerdo con la norma ASTM D92) porque las sustancias volátiles pueden escapar a través de las paredes del recipiente. Muestreo del suministro de aceite fresco
- Evite la contaminación cruzada
- Debe tomarse desde el punto más indicativo donde los residuos y la contaminación del agua son más graves (por ejemplo, el fondo de un camión cisterna).
- Si se sospecha de un producto no homogéneo, tome una muestra de varios tambores (ASTM D4057) o incluso una muestra de cada tambor (SKF, 2020).

Puntos de muestreo en un sistema hidráulico:

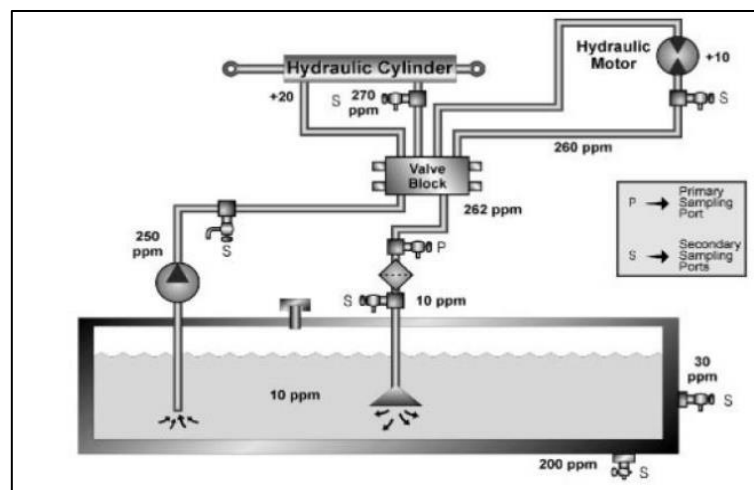


Ilustración 19-4: Gráfica de punto de muestro de sistema hidráulicos. Frecuencia de muestreo

Fuente: (SKF,2023)

En resumen, los puntos clave son:

El punto principal para un exitoso análisis de aceite se basa en la toma de muestras, estas deben seguir un protocolo para su correcto muestreo, es necesario verificar que tipo de pruebas son las necesarias para poder evaluar el funcionamiento del lubricante.

Verificar que los aditivos se encuentren entre los límites establecidos para su correcto funcionamiento, esto es debido a que son parte fundamental para un buen desarrollo del aceite lubricante.

Verificar que el valor del número de ácidos totales (TAN) no disminuya de su valor original, si

este decrece de su valor actual significaría que la aditivación del aceite presenta problemas su formulación.

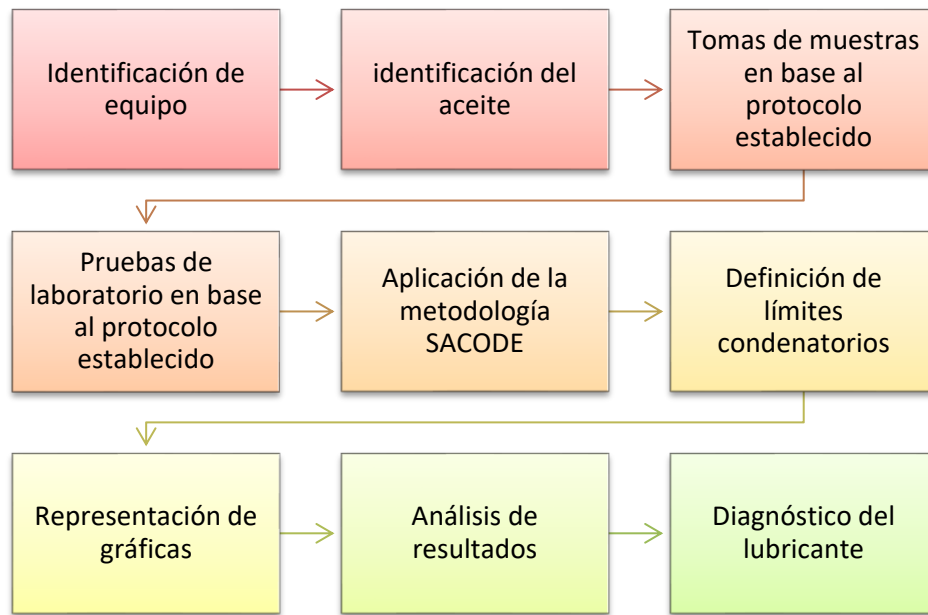


Ilustración 20-4: Procedimiento de programa de lubricación

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

Tabla 10-4: Planificación del programa de lubricación.

Programa de lubricación	
0 horas	Limpieza del equipo Revisión del equipo Extracción de muestra 0
500 horas	Revisión de nivel de aceite Extracción de muestra 1
1000 horas	Revisión de nivel de aceite Extracción de muestra 2 Revisión del equipo
1500 horas	Revisión de nivel de aceite Extracción de muestra 3
2000 horas	Revisión de nivel de aceite Extracción de muestra 4 Revisión del equipo
2500 horas	Revisión de nivel de aceite Extracción de muestra 5

Realizado por: Arias, Yorki, 2023

CONCLUSIONES

El lubricante que se utiliza en el motorreductor FALK es un aceite mineral Gearbox con un grado de viscosidad de 320 cSt a 40 grados centígrados con aditivos de extrema presión, la aditivación está conformada con los elementos de molibdeno y fósforo, el aceite está diseñado para reducir el rozamiento y en consecuencia economizar energía además de proteger las superficies de fuertes cargas, las pruebas que se necesitaron para un análisis exitoso fueron: viscosidad, contaminación por medio de infrarrojo, número de ácidos totales, dieléctrico, código de limpieza ISO y cantidad de agua.

Se logro conocer las propiedades iniciales del aceite nuevo Gearbox 320 EP, mediante un análisis elemental se conoció la aditivación del aceite, el cual cumplía con las exigencias de los aditivos de extrema presión como el molibdeno y el fósforo que presentaron 415 y 551 ppm respectivamente, además del calcio, zinc magnesio, boro y partículas contaminantes, también se conoció su valor de viscosidad de 25.29 cSt a 100°C , dieléctrico de 2.23 F/m , número de ácidos totales de 0.93 mgKOH/g, oxidación, sulfatación y agua los cuales se encontraron en rangos normales de funcionamiento. Cabe destacar que el aceite presento un comportamiento anormal con 15 partículas por millón de hierro, esto se pudo dar a una mala práctica de almacenamiento o extracción.

Se logró la toma de 6 muestras de aceite con un periodo de inicial de 4805,91 horas en la primera y 8354,64 horas de la última muestra dando como resultado un estudio total de 3548.73 horas en un periodo de 205 días, además se tomó una muestra de aceite nuevo para el monitoreo y comparación de los análisis, donde se pudo monitorear mediante cada muestra de aceite analizada con los equipos de los laboratorios una tendencia para cada propiedad o elemento estudiado.

Se concluyo que el paquete de aditivos de extrema presión que comprende los elementos de molibdeno y fosforo ya no cumple con la función de prevenir el contacto entre los metales en movimiento esto se evidencio en la cantidad de partículas por millón que difieren del límite máximo permisible, es por ello que puede existir un deterioro de las superficies en los dientes de los engranajes.

Al realizar los análisis de salud en base a la metodología SACODE donde se pudo evidenciar los parámetros de viscosidad, oxidación y sulfatación los cuales se encuentran en óptimas condiciones para su funcionamiento, pero dentro del paquete de aditivos existen elementos que ayudan a un mejor desempeño del aceite para mantener la vida útil de los componentes de la

máquina, estos elementos en base al tiempo de uso del aceite han decrecido siendo críticos, es por ello que el aceite debió cambiarse cuando la aditivación fallo.

En los análisis de contaminación se pudo encontrar que los elementos de aluminio, silicio y las partículas agua no superan los límites críticos, esto indica una buena impermeabilización y limpieza del equipo por parte de la empresa, en cambio con el código de limpieza supera el límite establecido por el fabricante y la bibliografía SKF, siendo las partículas de 10 micras las que se encuentran superando el límite crítico, esto regularmente se da debido al arranque del equipo.

Se pudo evidenciar que existen partículas de hierro en la muestra de aceite nueva en los análisis de desgaste, esto pudo ser debido a una mala manipulación, almacenamiento o extracción del lubricante. Por otro lado, en aceite usado, se pudo evidenciar que los elementos que comprenden el desgaste no superan el límite crítico entregado por el fabricante y tampoco sobrepasan el nivel estadístico el cual se basa en las horas de funcionamiento.

Se logro conocer que el aceite lubricante ya no es apto para su funcionamiento en el motorreductor esto fue debido a su disminución de aditivos y su bajo número de ácidos totales que presentaron las muestras, cabe destacar que la viscosidad se mantiene en los límites normales especificados por el fabricante.

Se obtuvo un programa de lubricación acorde a las necesidades de la empresa con el objetivo de regular los análisis de aceite y la interpretación enfocada en sus principales características para el correcto funcionamiento del lubricante, cabe destacar que el intervalo de lubricación se mantenga acorde a los resultados arrojados por los análisis teniendo énfasis en las principales características del aceite y aplicando la metodología SACODE.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que las muestras y análisis de aceite se realicen en intervalos de 500 horas, para conocer el comportamiento, de esta manera se proveerá una programación efectiva del mantenimiento.

Para un análisis de aceite exitoso existe una gran variedad de factores, entre los más relevantes son tener una bomba de vampiro limpia y desinfectada, utilizar siempre una manguera nueva y con una longitud adecuada para la extracción del aceite, mantener limpia la entrada de toma de muestra, utilizar un envase plástico hermético nuevo, comprobar que el membrete posea toda la información necesaria para el análisis. Cabe destacar que es recomendable utilizar una muestra de referencia para conocer las alteraciones que se presentan con el aceite usado.

Verifique qué lubricantes se utilizan realmente en los equipos de la planta y también asegúrese de que estos lubricantes se manipulen correctamente desde el área de almacenamiento hasta el equipo donde se usarán. Si el lubricante no se manipula adecuadamente, podría haber contaminación que altere los resultados de los ensayos de aceites, creando confusión tanto para el laboratorio como para el personal de la planta.

Se recomienda proveer entrenamiento proactivo en el área de mantenimiento o con el personal a cargo para crear concientización y fomentar que el departamento de compras asista al entrenamiento.

Se recomienda utilizar un aceite sintético Gearbox 320 EP debido a que estos presentan intervalos de cambio del lubricante con una extensión máxima de hasta 8000 horas dependiendo de las temperaturas y las condiciones de operación. Se recomendará para este tipo de lubricante realizar las mismas pruebas de análisis de aceite para optimizar la vida útil del aceite y el rendimiento de la transmisión.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBARRACÍN, P.** *Tribología y Lubricación Industrial y Automotriz* [en línea]. Colombia, 2006. [Consulta: 15 de octubre 2022]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/521262174/Libro-Tribologia-y-Lubricacion-Industrial-y-Automotriz-v2-2>.
- ALTMANN, C.** El análisis de aceite como herramienta del mantenimiento predictivo en flotas de maquinaria pesada [En línea] (Trabajo de titulación) Universidad de Uruman, Paraguay. 2016. pp. 286. [Consulta: 16 de octubre 2022]. Disponible en: <http://www.mantenimientomundial.com/notas/0607lubricacion.pdf>.
- ÁLVAREZ, A.** Tribología: Fricción, desgaste y lubricación. [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Central de La Villas, Santa Clara, Cuba. 1999. pp. 156-254. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/188165705/I-Parte-Tribologia-Friccion-Desgaste-y-Lubricacion-by-Emilio-Augustu-Alvarez-pdf>.
- ALVAREZ, E.** Metodología de diagnóstico basado en Análisis Discriminante para motores de combustión interna como una herramienta del mantenimiento predictivo mediante análisis de aceites lubricantes [En línea]. (Maestría) Universidad Mayor de San Andrés, LaPaz, Bolivia. 2019. pp. 178. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <file:///C:/Users/Dell/Downloads/TM-2417.pdf>.
- AMÉSQUITA, J.** Análisis de detección de fugas de aceite en los reductores de velocidad de una prensa de lavado [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú. 2019. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/01c3a5c8-2c49-4a54-9745-6fa893fcd2ee/content>.
- AMETEK, S.** *FluidScan 1000 Series*. [blog]. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <https://www.spectrosci.com/product/fluidscan-1000-series---handheld-infrared-oil-analyzer>.
- ANTAMBA, J; et al.**, "Salud del lubricante y comportamiento de los aditivos en vehículos tipo turismo". Revista CTU [en línea], 2021 (Ecuador) 8 (2). [Consulta: 21 de octubre 2022].

Disponible en:
<https://incyt.upse.edu.ec/ciencia/revistas/index.php/rctu/article/view/620/526>

ARELLANO, G. Incremento de la resistencia al desgaste de un acero AISI 4140 por medio de un tratamiento termoquímico de difusión de boro [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestría) Instituto Politécnico Nacional, México, 2017. pp. 164. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/25942/ArellanoOrtizGabriel2016MCenIM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

ASTM. *Clasificación estándar de lubricantes fluidos industriales por sistema de viscosidad* [blog]. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <https://www.astm.org/d2422-97r18.html>.

BENÍTEZ, L. "Las fallas en los engranajes". Revista Nacional de Colombia [en línea], 1985, (Colombia). [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <file:///C:/Users/Dell/Downloads/Dialnet-LasFallasEnLosEngranajes-4902861.pdf>.

BLOCH, H. *Practical lubrication for industrial facilities* [en línea]. Londres: Fairmont Press, 2009. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <https://books.google.com/cu/books?id=aECNDBbw6e8C&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>.

CALDERÓN, P. & LÓPEZ, M. Plan de monitoreo y control a través de los análisis de aceite para motor y transmisión de vehículos articulados mercedes para la empresa sistemas operativos móviles - SOMOS K. S. A. [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. 2016. pp. 64. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/4790/CalderónCamachoPaublaAndrea2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

CENGUEL, Y. & CIMBALA, J. *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications* [en línea]. Translated by Víctor Campos. México: Mc Graw Hill, 2006. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <https://www.udocz.com/apuntes/51530/mecanica-de-fluidos-fundamentos-y-aplicaciones-yunus-cengel-y-john-cimbala-primera-edicion>.

CHERRES, D. & ÑAUTA, J. Estudio de implementación del sistema de mantenimiento predictivo en la compañía ecuatoriana del caucho erco [En línea] (Trabajo de titulación).

Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. 2015. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/11282/1/UPS-CT005547.pdf>.

COTRINA, H. Evaluación de los parámetros de degradación de aceite como herramienta de gestión del mantenimiento de motores Diesel-Unimaq SA [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad César Vallejo, Cajamarca, Perú. 2016. pp. 109. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/8820/cotrina_ch.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

DELGADO, E; et al. "Cuantificación de los principales contaminantes en los aceites usados antes y después del proceso de tratamiento y recuperación para las empresas Ecolcin y Proptelma S.A.". Investigación científica y tecnológica [en línea], 2008, (Colombia) 66(9). [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <file:///C:/Users/Dell/Downloads/Dialnet-CuantificacionDeLosPrincipalesContaminantesEnLosAc-6684811.pdf>

DONALDSON. *Conozca los códigos de limpieza ISO* [blog]. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <https://www.donaldson.com/es-mx/engine/filters/technical-articles/understanding-iso-cleanliness-codes/>.

EUROLAB. *Método de prueba estándar ASTM D445 para calcular la viscosidad dinámica y la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos* [blog]. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <https://www.laboratuar.com/es/testler/astm-testleri/astm-d445-seffaf-ve-opak-sivilarin-kinematik-viskozitesi-ve-dinamik-viskozitenin-hesaplanmasi-icin-standart-test-yontemi/#:~:text=La norma ASTM D445 especifica,viscosímetro capilar de vidrio calibrado.>

FLORES, M. Uso del lubricante en minibuses del servicio público en la ciudad de la Paz [en línea] (Trabajo de titulación). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. 2012. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/15208/EG-1107-Flores Poma%2C Mario.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

FONG, W; et al. "Caracterización físico-química de aceites usados de motores para su reciclaje". Revista Scielo [en línea], 2017, (Colombia) 15(2), pp. 135-144. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v15n2/1692-8261-prosp-15-02->

00135.pdf

GÓMEZ, Y. Contribución al desarrollo y mejora para la cuantificación de la degradación en aceites lubricantes usados de MCI A a través de la técnica de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) [En línea] (Trabajo de titulación). (Doctorado) Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. 2013. pp. 265. [Consulta: 21 de octubre 2022]. Disponible en: <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=%2BLPAPUF9kdo%3D>.

GOODING, N. *Lubricación Industrial* [en línea]. Bogotá - Colombia: Garavito, 2009. [Consulta: 28 de octubre 2022]. Disponible en: https://kupdf.net/download/lubricacion-industrial_5afb9dc7e2b6f51c1e4e123e_pdf.

HACH, L. *Total Acid Number (TAN) (ASTM D664)* [en línea]. Washington - USA: Hach Lange GmbH, 2016. [Consulta: 2 de octubre 2022]. Disponible en: <file:///C:/Users/Dell/Downloads/DOC316.52.93095.pdf>.

HELLOAUTO. *Lubricación por salpicadura* [blog]. [Consulta: 28 de octubre 2022]. Disponible en: <https://helloauto.com/glosario/lubricacion-por-salpicadura>.

INFRASPEAK. *Lubricantes RALLOY Manual Técnico* [blog]. [Consulta: 04 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://blog.infraspeak.com/es/analisis-de-aceite/>.

KLINGELNBERG, J. *Bevel Gear Fundamentals and Applications* [en línea]. Germany: Hastmuth Muller, 2016. [Consulta: 04 de noviembre 2022]. Disponible en: <http://uigearlab.com/wp-content/uploads/bevel-gear-2016.pdf>.

MANG, T. & DRESEL, W. *Lubricants and Lubrication* [en línea]. Weinheim: Wiley VCH, 2007. [Consulta: 04 de noviembre 2022]. Disponible en: https://web.archive.org/web/20151017234727id_/http://d-nb.info:80/979608708/04

MARTINS, M. "Lineamientos AGMA para lubricación de engranajes". ExxonMobil [en línea], 2010, (España) 8(4), pp. 167. [Consulta: 04 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/409026783/Lineamientos-AGMA-para-Lubricacion-de-Engranajes-pdf>.

- MOTT, R.** *Mecanica de Fluidos* [en línea]. México: Perason Educación, 2006. [Consulta: 04 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://avdiaz.files.wordpress.com/2008/10/fluidos-mott-6ed.pdf>.
- NORIA.** *Entendiendo los grados de viscosidad SAE para lubricantes de motor* [blog]. [Consulta: 16 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://noria.mx/lublearn/entendiendo-los-grados-de-viscosidad-sae-para-lubricantes-de-motor/>.
- OILV.** "OilView Quick-Check User Manual". MJR Technologies LLC [en línea], 2010, (United State of America) 127(3). [Consulta: 16 de noviembre 2022]. Disponible en: <http://site.jjstech.com/pdf/OilView/OilViewQuickCheckManual.pdf>.
- OLARTE, W; et al.** "Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria". . Scientia et Technica1 [en línea], 2010, (Colombia) 16(45), pp. 223 - 226. [Consulta: 16 de noviembre 2022]. ISSN 0122-1701. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84917249041.pdf>.
- POZO, J; et al.** "Análisis de aceite en motores de combustión interna estacionarios de planta de generación de energía eléctrica". Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia [en línea], 2014, (Maracaibo) 37(3), pp. 206 - 212. [Consulta: 16 de noviembre 2022]. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702014000300003&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- RADOSAVLJEVIĆ, S; et al.** "Determination of power losses in worm gear reducer". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [en línea], 2018, (Serbia). [Consulta: 16 de noviembre 2022]. ISSN 1757-899X. DOI 10.1088/1757-899X/393/1/012050. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/393/1/012050>.
- REXNOR.** *Falk UltraMax Gear Drives Installation & Maintenance Instructions* [blog]. [Consulta: 16 de noviembre 2022]. Disponible en: https://www.rexnord.com/contentitems/techlibrary/documents/318-100_manual.
- SCHARLAB.** *ASTM D95. Aparato para ensayo de determinación de agua en productos del petróleo por destilación* [blog]. [Consulta: 21 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://scharlab.com/productos-producto-catalogo-productos-detalle-articulo.php?c=18&sc=293&p=8796>.

TERADILLOS, J. & CIRIA, J. "Todo sobre la lubricación de las turbinas y su mantenimiento a través del análisis del aceite". Ingeniería y gestión de mantenimiento [en línea], 2003, (Colombia), 6(32), pp. 59-67. [Consulta: 21 de noviembre 2022]. Disponible en: https://lubrication-management.com/wp-content/uploads/sites/3/2014/07/Análisis_aceite_turbinas_ES.pdf.

TORRES, M. Caracterización, especificación y aplicaciones de normas para lubricantes automotores, industriales y embarcaciones [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. 2011. [Consulta: 21 de noviembre 2022]. Disponible en: https://biblioteca.semisud.org/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=286333.

TRUJILLO, M. Determinar la diferencia de aceite mineral vs sintético en un vehículo liviando en el tiempo de 800 horas [En línea] (Trabajo de titulación). Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador. 2016. [Consulta: 21 de noviembre 2022]. Disponible en: https://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/14109/1/65748_1.pdf.

WIDMAN. *Lubricantes, Refrigerantes y Aditivos* [blog]. [Consulta: 21 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.widman.biz/Productos/productos.php>.

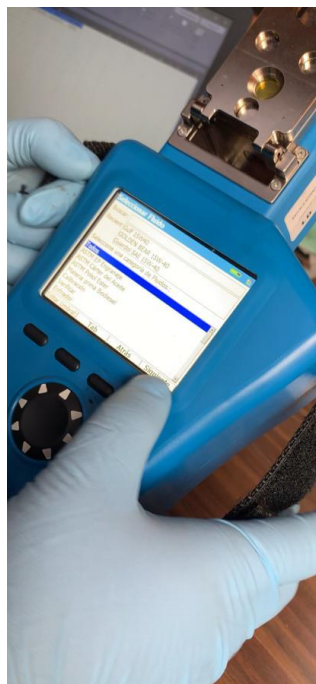
ZEBALLOS, A. Plan de mantenimiento proactivo centrado principalmente en el análisis de aceite en los reductores de velocidad utilizados para calentamiento y enfriamiento uniforme en turbinas de gas de la central termoeléctrica en Puerto Bravo, Mollendo- Arequipa [en línea] (Trabajo de titulación). Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile. 2021. [Consulta: 21 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.oducal.com/Record/ir-UCSM-10494>.

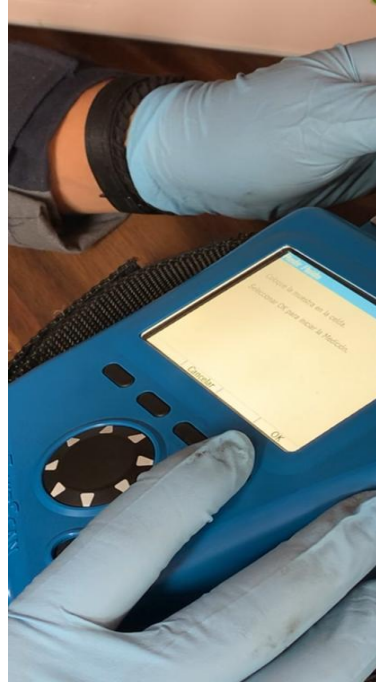
ANEXOS

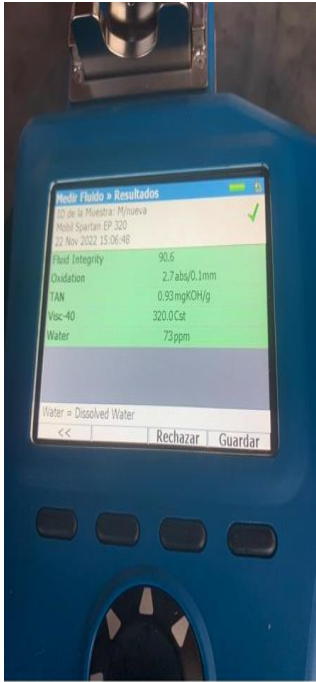
ANEXO A: ANÁLISIS DE ACEITE CON EL DENSÍMETRO.



ANEXO B: ANÁLISIS DE ACEITE CON EL EQUIPO DE FLUIDSCAN







ANEXO C: ANÁLISIS DE ACEITE CON OIL VIEW CHECK

