

Estudio de la degradación de aceites lubricantes en un mecanismo de transmisión por engranajes con base en las variables de la lubricación por salpicadura.

Jhon Alex Rueda Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico.

Director

Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra

Doctor en Ingeniería de materiales.

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela De Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

Agradecimientos

Al culminar este importante proceso de formación profesional, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las personas que fueron pilares fundamentales en mi camino.

Primero, quiero agradecer al profesor Óscar Bohórquez por su invaluable apoyo, paciencia y dedicación. Su guía y consejos fueron esenciales para la elaboración de esta tesis. Su conocimiento y experiencia me brindaron la dirección y el impulso necesarios para alcanzar mis objetivos.

De manera especial, agradezco a mis padres, Olga Lucía Rodríguez y José Alexander Rueda, por su apoyo incondicional. Su amor, comprensión y confianza en mí, fueron el motor que me impulsó a seguir adelante en los momentos difíciles. Gracias por ser mi bastón y por nunca dejarme renunciar a mis sueños.

También quiero expresar mi profunda gratitud a mi abuelo, José de Jesús Rueda Arenas. Su apoyo fundamental, su alegría constante y su ejemplo de vida me inspiraron a perseguir mis metas con tenacidad y optimismo.

A mis tíos, abuelos, abuelas, familiares cercanos y amigos, les agradezco sus consejos, su apoyo y su aliento constante. Cada palabra de aliento y cada gesto de apoyo fueron un faro que me guio en este camino.

A mis amigos Dayanna y Miguel, les agradezco por estar siempre presentes en mi camino. Su amistad incondicional me brindó la fuerza y la motivación necesarias para mantenerme enfocado en mis objetivos universitarios.

Finalmente, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi pareja, Karol Daniela Cáceres. Su apoyo constante, su amor incondicional y su capacidad para darme fuerzas en los

momentos difíciles fueron esenciales para alcanzar este logro. Su presencia en mi vida es un regalo invaluable.

Gracias a todos ustedes por ser parte de este logro tan importante para mí. Su apoyo y cariño fueron fundamentales para alcanzar este peldaño en mi vida profesional.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	13
1. Planteamiento del problema.....	14
2. Marco Teórico.....	15
2.1 Lubricación.....	16
2.1.1 Tipos de lubricantes.....	16
2.1.1.1 Lubricantes líquidos.....	16
2.1.1.2 Lubricantes sólidos.....	17
2.1.1.3 Lubricantes gaseosos.....	17
2.1.2 Tipos de película lubricante.....	17
2.1.2.1 Película sólida.....	17
2.1.2.2 Película semisólida.....	18
2.1.2.3 Película fluida.....	18
2.1.2.4 Película elasto-hidrodinámica.....	18
2.1.3 Parámetros de los aceites lubricantes.....	19
2.1.3.1 Viscosidad.....	19
2.1.3.2 Calidad.....	19
2.1.3.3 Composición.....	19
2.1.3.4 Estado físico.....	20
2.1.4 Clasificación de las técnicas de lubricación.....	21
2.1.4.1 Lubricación por salpique.....	21
2.1.4.2 Lubricación por neblina de aceite.....	22
2.1.4.3 Lubricación por dispensador de goteo.....	23

2.1.4.4 Lubricación por engrase.....	23
2.1.5 Propiedades Fisicoquímicas De Los Aceites Lubricantes	23
2.1.5.1 Viscosidad.....	23
2.1.5.2 Índice de viscosidad.....	24
2.1.5.3 Temperatura.....	24
2.1.5.4 Índice de acidez.....	24
2.2 Engranajes.....	24
2.2.1 Engranajes con ejes paralelos.....	24
2.2.2 Engranajes con ejes que se cortan.....	25
2.2.3 Engranajes con ejes que no se intersecan ni son paralelos.....	25
2.2.4 Engranajes rectos.....	25
2.2.5 Temperatura de operación en la caja de engranajes.....	28
2.3 Normativas.....	28
2.3.1 Norma ASTM D4057-22.....	28
2.3.2 Norma ASTM D4840-99.....	29
2.3.3 Norma ASTM D5854-19.....	29
2.3.4 Norma ASTM D6595-22.....	29
2.3.5 Norma ASTM D445.....	29
2.3.6 Norma ISO 4406.....	30
2.3.7 Norma ASTM D664.....	30
2.3.8 Norma ASTM D6304.....	30
2.3.9 Norma ASTM D7690.....	30
2.3.10 Norma ASTM E2412.....	30

2.3.11 Norma ASTM D5185	31
3. Justificación	31
4. Objetivos.....	32
4.1 Objetivo General.....	32
4.2 Objetivos Específicos	32
5. Metodología.....	33
5.1 Diseño Experimental.....	33
5.1.1 Diagnóstico y adaptaciones del equipo usado en el estudio	34
5.1.2 Monitoreo de temperatura y registro de tiempo.....	39
5.1.3 Parámetros de los ensayos	40
5.1.4 Procedimiento para la ejecución de los ensayos	43
5.1.4.1 Verificación y limpieza del equipo.....	43
5.1.4.2 Llenado de aceite hasta 20 milímetros de altura.....	43
5.1.4.3 Extracción y etiquetado de la muestra de aceite 20 milímetros de altura.....	45
5.1.4.4 Limpieza del equipo y llenado de aceite hasta 35 milímetros de altura.....	46
5.1.4.5 Extracción y etiquetado de la muestra de aceite de 35 milímetros de altura.....	48
5.1.4.6 Limpieza del equipo y llenado de aceite hasta 50 milímetros de altura.....	48
5.1.4.7 Extracción y etiquetado de la muestra de aceite de 50 milímetros de altura.....	50
6. Resultados y discusiones	50
6.1 Temperatura.....	51
6.2 Viscosidad.....	54
6.3 Ferrografía de lectura directa.....	55
6.4 Rastreo de elementos	57

6.5 Número ácido.....	59
6.6 Prueba de Karl Fischer.....	60
7. Conclusiones.....	62
Referencias Bibliográficas.....	66
Apéndices.....	71

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Variación de la viscosidad en función del cambio de volumen de aceite</i>	55
Tabla 2 <i>Lectura de la ferrografía según la variación de volumen</i>	56
Tabla 3 <i>Rastreo de los principales elementos en el aceite lubricante en partes por millón</i>	58
Tabla 4 <i>Variación del número ácido en función del aumento de altura.</i>	59
Tabla 5 <i>Humedad presente en el aceite lubricante</i>	61

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Lubricación por salpique</i>	21
Figura 2 <i>Terminología de los dientes de engranes rectos</i>	26
Figura 3 <i>Partes del banco de pruebas</i>	35
Figura 4 <i>Engranajes rectos acoplados en el banco de pruebas</i>	36
Figura 5 <i>Tapa de acrílico</i>	37
Figura 6 <i>Papel húmedo</i>	38
Figura 7 <i>Silicona RTV</i>	38
Figura 8 <i>Circuito electrónico</i>	39
Figura 9 <i>Niveles de aceite</i>	41
Figura 10 <i>Nivel de aceite con altura de 20 milímetros</i>	44
Figura 11 <i>Inspección visual del ensayo con una altura de 20 milímetros</i>	45
Figura 12 <i>Extractor de aceite</i>	46
Figura 13 <i>Formato de etiqueta</i>	46
Figura 14 <i>Nivel de aceite con altura de 35 milímetros</i>	47
Figura 15 <i>Inspección visual del ensayo con una altura de 35 milímetros</i>	48
Figura 16 <i>Nivel de aceite con altura de 50 milímetros</i>	49
Figura 17 <i>Inspección visual del ensayo con una altura de 50 milímetros</i>	50
Figura 18 <i>Monitoreo de temperatura del aceite con una altura de 20 milímetros</i>	52
Figura 19 <i>Monitoreo de temperatura del aceite con una altura de 35 milímetros</i>	53
Figura 20 <i>Monitoreo de temperatura del aceite con una altura de 50 milímetros</i>	53
Figura 21 <i>Desgaste total en función del aumento de volumen de aceite</i>	57

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Código de lectura de temperatura y tiempo.....	71
Apéndice B. Formato de identificacion de variables.....	72
Apéndice C. Ficha tecnica del aceite.....	74
Apéndice D. Reporte de condición del aceite.....	76

Resumen

Título: Estudio de la degradación de aceites lubricantes en un mecanismo de transmisión por engranajes con base en las variables de la lubricación por salpicadura.

Autor: Jhon Alex Rueda Rodríguez

Palabras Clave: Aceite Lubricante, Engranajes, Salpicadura.

Descripción: El presente proyecto estudió la degradación del aceite Mobilube HD 85W-140 el cual fue sometido a trabajo en un mecanismo de transmisión por engranajes, los cuales se lubricaban mediante salpicadura, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas del lubricante según la altura del aceite puesto que esta variaba entre muestras, contrastando las diferencias en el deterioro del aceite. Teniendo el propósito claro, se realizaron diversas modificaciones al banco y se adaptó para evitar las fugas y la contaminación, de esta forma se ejecutaron los ensayos garantizando que se cumplieran las normativas aplicadas al trabajo y en consecuencia que las muestras objeto de análisis fueran representativas y así obtener resultados válidos. Las diferentes pruebas ejecutadas en el laboratorio permitieron establecer como las propiedades del aceite se modificaron al pasar 50 horas, además se llevó a cabo un monitoreo continuo de la temperatura de operación. Al concluir el estudio se definió que la cantidad de aceite influye en la vida útil del aceite y el desgaste de los engranajes, siendo la altura intermedia la que mejor desempeñó el trabajo en los ensayos y en el mismo sentido se estableció cuales variables generaron contaminación en el aceite y sus posibles causas. Estas conclusiones tienen como objetivo prevenir fallos inesperados y paradas de la maquinaria, así como prolongar la vida útil del mecanismo de transmisión por engranajes.

Trabajo de grado.

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica.

Director: Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra. Doctor en Ingeniería de materiales.

Abstract

Title: Study the degradation of lubricating oils in a gear transmission mechanism based on splash lubrication variables.

Author: Jhon Alex Rueda Rodríguez

Keywords: Lubricating Oil, Gears, Splash.

Description: This project studied the degradation of Mobilube HD 85W-140 oil which was subjected to work in a gear transmission mechanism, which were lubricated by splashing, the physicochemical properties of the lubricant were evaluated according to the height of the oil as this varied between samples, contrasting the differences in the deterioration of the oil. With the purpose in mind, various modifications were made to the bench and it was adapted to avoid leaks and contamination, thus ensuring that the tests were carried out in compliance with the regulations applied to the work and, consequently, that the samples analysed were representative and that valid results could be obtained. The different tests carried out in the laboratory made it possible to establish how the properties of the oil changed after 50 hours, and continuous monitoring of the operating temperature was also carried out. At the end of the study it was defined that the quantity of oil influences the useful life of the oil and the wear of the gears, being the intermediate height the one that performed best in the tests and in the same sense it was established which variables generated contamination in the oil and its possible causes. These conclusions are aimed at preventing unexpected failures and machine downtime, as well as prolonging the service life of the gear transmission mechanism.

Degree Work.

Faculty of Physicochemical Engineering. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra. PhD in Materials Engineering.

Introducción.

En el contexto histórico de la industria, el mantenimiento de la maquinaria ha estado evolucionando desde la revolución industrial donde se empezó a trabajar con mecanismos que requerían de preservación, a raíz de esto se ha buscado mejorar los métodos que se implementan para dictaminar, prevenir y anticipar los fallos que se presentan en los procesos productivos aplicados en los distintos sectores manufactureros.

En la industria se busca generar valor o riqueza, a través del manejo de los recursos disponibles para el cumplimiento de los retos de la organización encargada de proveer un servicio o un bien. Según Navarro & Pastor (1997) en la administración del mantenimiento, el presupuesto se puede clasificar en costos fijos, costos variables, costos financieros y costo de la no disponibilidad, los costos fijos comprenden las acciones planeadas y los gastos de uso de los dispositivos requeridos para llevar a cabo estas tareas. Los costos variables representan los gastos sin planeación, generalmente se incurre en estos gastos cuando se presentan fallas o averías inesperadas. Los costos financieros hacen referencia a la inversión de repuestos, materia prima, maquinaria de repuesto para mejorar la confiabilidad entre otros y por ultimo está el rubro más relevante en los costos pero al que menos atención se le presta en las empresas (Mora, 2009), es el costo de la no disponibilidad por falla, este es el valor resultante de no poder utilizar la maquina cuando es requerida a raíz de fallas imprevistas.

Las empresas buscan ser competitivas, sostenibles y confiables, y la gestión de activos es clave para lograrlo. Analizar cómo la lubricación por salpicadura afecta la degradación del aceite y el desgaste en engranajes, buscando optimizar su vida útil y contribuir a la eficiencia de las empresas es crucial para la industria que se desempeña en este campo. El desgaste y la fricción son fenómenos físicos directamente relacionados con la degradación de los lubricantes en

mecanismos de transmisión por engranajes. El desgaste se refiere a la pérdida de material de las superficies metálicas en contacto, mientras que la fricción es la fuerza que se opone al movimiento relativo entre estas superficies.

El desgaste abrasivo es el más común en los engranajes, debido a la presencia de partículas contaminantes en el aceite. La fricción, por otro lado, genera calor que puede aumentar la temperatura del aceite y acelerar su degradación (Hutchings & Shipway, 2017).

Los aceites lubricantes son utilizados para reducir el desgaste y la fricción en los mecanismos de transmisión por engranajes, su degradación se produce con el tiempo y que puede ser causado por diferentes factores, como la oxidación, la contaminación, la temperatura y la presión. La degradación del aceite puede afectar a sus propiedades y provocar un aumento anormal del desgaste y la fricción.

1. Planteamiento del problema.

La tribología es la ciencia y la ingeniería del contacto, la fricción, lubricación y desgaste de superficies en movimiento, esta disciplina científica interdisciplinaria es crucial para comprender y adaptar el comportamiento de la maquinaria en diversas áreas como el diseño, el control de ruido, la creación de lubricantes según la aplicación, entre otras. Con base a lo descrito se infiere que la tribología se hace presente en este estudio ya que maneja lubricación por salpicadura entre engranajes. Mediante la tribología se establecen las propiedades fisicoquímicas del lubricante, las cuales son objeto de interés para el desarrollo del trabajo.

Realizar un estudio tribológico de un aceite lubricante provee información de sus propiedades fisicoquímicas, mediante configuraciones previamente planeadas en los ensayos, se expone a diferentes condiciones, con el fin de evaluar el comportamiento del lubricante en

términos de fricción, desgaste y lubricación y como se diferencian a medida que varían los parámetros del experimento.

El análisis de aceite es una de las técnicas utilizadas en la industria para llevar a cabo un monitoreo a la maquinaria y debe ser utilizada para diagnosticar a los equipos, esto se debe a que el lubricante posee gran información acerca de la máquina donde está siendo utilizado. Este método abarca la evaluación del estado del aceite, en consecuencia, se puede dictaminar si es pertinente hacer un cambio del mismo, o si es apto para seguir prestando el servicio, también puede detectar contaminación en el aceite, lo cual puede agudizar otros fallos y por último detecta desgaste anormal en el sistema (Tormos, 2013).

Con base en lo anteriormente dicho se plantea cuáles serán las propiedades fisicoquímicas influyentes del lubricante que cambian, a medida que el volumen de aceite con el que se trabaja aumenta. Adicionalmente se pueden generar dudas sobre cuáles de los parámetros de ensayo previamente definidos generan un desgaste mayor en el lubricante afectando su vida útil. Por último, es importante entender desde la teoría los elementos involucrados en el experimento, cuáles variables se verán involucradas, que tipos existen, y como afecta la selección de determinadas condiciones en los resultados.

2. Marco Teórico

En esta sección se estudian los conceptos claves de la investigación, con el objetivo de construir una base sólida para analizar e interpretar los resultados y así mismo poder comprender el problema abordado en el estudio. Se examinan en detalle el campo de la tribología, que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación. Se analizarán los distintos métodos de lubricación, los tipos de lubricantes disponibles, sus parámetros y sus propiedades fisicoquímicas.

También se profundiza en los engranajes, componentes mecánicos en los que la fricción y el desgaste son factores críticos. Se analizan las normas ASTM que estandarizan los procedimientos para evaluar el estado del aceite, las cuales son necesarias para garantizar que los ensayos realizados y su posterior análisis brinden información relevante y segura acerca de la condición del aceite.

2.1 Lubricación

La lubricación es una técnica fundamental en la tribología, y tiene aplicaciones en una amplia gama de campos. La comprensión de los principios de la lubricación es fundamental para el diseño y la operación de máquinas junto a sus componentes, con el objetivo de desarrollar un funcionamiento eficiente y duradero. La correcta aplicación de la lubricación logra reducir la fricción y el desgaste de los componentes involucrados, mejora la eficiencia y la vida útil de la maquinaria y ayuda a reducir el ruido y vibraciones en los sistemas (Menezes et al., 2013).

2.1.1 Tipos de lubricantes

Los lubricantes están formados principalmente por aceites base, que representan el 90% de su composición, los aditivos, que representan el 10% restante. Los aditivos se utilizan para mejorar las propiedades del lubricante, como su resistencia a la corrosión, su capacidad para disipar el calor o su capacidad para reducir la fricción. La formulación exacta de un lubricante depende de su aplicación específica. En general hay tres categorías de lubricantes, líquido, sólido y gaseoso.

2.1.1.1 Lubricantes líquidos. Este tipo de lubricantes suele ser fluidos viscosos que requieren sistemas de bombeo circulatorio o sistemas mecánicos rotativos, como cojinetes o engranajes, para distribuir el fluido por todo el sistema. Los lubricantes líquidos se utilizan para reducir la fricción entre las superficies en actividad, lo que ayuda a prolongar la vida útil de los

componentes y a evitar daños. También ayudan a eliminar el calor, la suciedad y los residuos del desgaste, lo que ayuda a proteger los componentes y a mantener su funcionamiento eficiente (Albarracin, 2008).

2.1.1.2 Lubricantes sólidos. Estos tipos de lubricantes generalmente son polvos o semisólidos en forma de grasa. Una de sus principales ventajas con respecto a las otras alternativas es que ofrecen temperaturas de tentativa lubricación de hasta 623,15 kelvin (Menezes et al., 2013).

2.1.1.3 Lubricantes gaseosos. Estos tienen una menor viscosidad y capacidad calorífica comparados con los lubricantes líquidos y sólidos. Los sistemas que implementan lubricantes gaseosos se caracterizan por reducir casi toda la fricción y desgaste. Generalmente son usados en aplicaciones de alta precisión como en dispositivos médicos o de metrología. Algunos ejemplos puntuales son el aire, los gases técnicos, el vapor y los vapores de metal líquido (Lentini et al., 2018).

2.1.2 Tipos de película lubricante.

El lubricante se aplica a mecanismos que tienen superficies en desplazamiento reduciendo el rozamiento y el desgaste generado por el contacto al que se ven sometidos, la película que se adhiere entre los componentes es el segmento del lubricante que trabaja para facilitar el movimiento entre ellos, existen diversos tipos de películas lubricantes a continuación se enumeran las principales.

2.1.2.1 Película sólida. En este caso el lubricante se solidifica entre las superficies. Este tipo de película es muy resistente al desgaste, pero también es muy rígida y puede dificultar el movimiento. Se basa en la aplicación de un agente que se volatiliza, dejando como residuo una película sólida en las superficies, esta lubricación es más resistente a fugas y a contaminación.

Las moléculas de estos productos se alojan en las irregularidades de las superficies metálicas, rellenando y emparejando sus cavidades. Esto permite reducir la fricción y el desgaste, prolongando la vida útil de los componentes. Es usada en equipos industriales, maquinaria aeroespacial, componentes de vehículos eléctricos, entre otras aplicaciones (Scharf & Prasad, 2013).

2.1.2.2 Película semisólida. Este tipo de película se forma cuando el lubricante se vuelve viscoso, pero no llega a solidificarse. Es más gruesa y más resistente que una película líquida, menos fluida. Las películas semisólidas se utilizan en aplicaciones donde se requiera resistencia al desgaste pero que también sea flexible. Por ejemplo, se pueden utilizar en juntas rotativas y otros componentes que están expuestos a vibraciones o impactos (Albarracín, 2008).

2.1.2.3 Película fluida. En este caso el lubricante líquido aporta grosor y viscosidad para mantener separadas las caras que entran en contacto, maneja un desgaste y una fricción mínima, por ende, resulta atractivo para implementar en la mayoría de aplicaciones de la industria. Se puede formar de manera hidrodinámica a través del movimiento de las superficies lubricadas convergiendo en un punto, generando una presión que permite mantener estas superficies distanciadas o de forma hidrostática mediante el bombeo a presión de un fluido entre las superficies (Pirro et al., 2001).

2.1.2.4 Película elasto-hidrodinámica. Es un estado de lubricación hidrodinámica que se caracteriza por la deformación elástica de las irregularidades de ambas superficies, debido a la carga que actúa sobre ellas. En este caso la presión hidráulica de la película lubricante es lo suficientemente alta como para separarlas (Montoro, 2005).

2.1.3 Parámetros de los aceites lubricantes.

Estos se clasifican para ayudar a los usuarios a seleccionar el aceite lubricante según la necesidad, es decir según la aplicación hay una variedad de parámetros que hay que determinar para escoger el correcto, los ítems más determinantes se mencionan a continuación.

2.1.3.1 Viscosidad. Este parámetro cuantifica la resistencia de un material al movimiento. Los aceites lubricantes con mayor viscosidad son más espesos y proporcionan una mejor protección contra el desgaste. Los aceites lubricantes con menor viscosidad tienen mayor fluidez y permiten un mejor funcionamiento de los componentes. Generalmente el valor de referencia de viscosidad se mide en centistokes a 40 grados Celsius. (Menezes et al., 2013)

2.1.3.2 Calidad. Según el instituto americano del petróleo, la calidad de un aceite lubricante se mide en función de su capacidad para proteger los componentes contra el desgaste, la corrosión y otros daños. Los aceites lubricantes de mayor calidad suelen tener mayor costo. Esta clasificación se da según las condiciones de uso, designado por dos letras, la primera letra señala para que tipo de máquina es el aceite, la segunda nombra la exigencia en el servicio. Los aceites para motores de gasolina se identifican con la letra "S", los aceites para motores Diesel se identifican con la letra "C". La segunda letra indica el rendimiento del aceite, comenzando por la letra "A" para el rendimiento más bajo y continuando en orden alfabético a medida que aumenta el rendimiento(American Petroleum Institute, 2023).

2.1.3.3 Composición. Los aceites lubricantes se componen de una base y de aditivos. La base es el componente principal del aceite y suele ser un hidrocarburo. Los aditivos son sustancias que se añaden al aceite para mejorar sus propiedades, como la resistencia al desgaste, la estabilidad térmica o la protección contra la corrosión.

Su clasificación de acuerdo al origen del aceite es mineral, sintético y vegetal. El aceite de origen mineral se subdivide según la procedencia del crudo, en parafínicos cuyo índice de viscosidad es elevado, baja volatilidad y bajo poder disolvente, naftenicos con una densidad elevada, bajo índice de viscosidad, volatilidad y un gran poder disolvente y aromáticos cuya densidad es superior a los anteriormente mencionados y con un índice de viscosidad considerablemente bajo (Montoro, 2005).

El aceite de base sintética proviene de fluidos de síntesis orgánica que son mezclados para obtener lubricantes mejorados, compuestos principalmente de hidrocarburos sintéticos, diésteres, poliolésteres, poliglicoles, siliconas.

Por último, se tiene el aceite de base de origen vegetal el cual proviene de procesos de refinado de semillas de soja, girasol, maíz o canola. Su cualidad más destacada es la biodegradabilidad y su desventaja es el coste elevado.

Los aditivos que se añaden a las bases para mejorar las propiedades del lubricante, según la necesidad de la aplicación, estos se pueden clasificar en mejorador del índice de viscosidad el cual cumple la función de mejorar la relación temperatura-viscosidad del lubricante, el regulador del punto de congelación buscando reducir el punto de congelación dificultando la cristalización, los antioxidantes que evitan la oxidación del aceite debido a altas temperaturas y a la presencia del aire, el antidesgaste que protege del desgaste por abrasión, antiespumantes y la extrema presión la cual tiene como objetivo principal reducir el rozamiento y la protección de las superficies.

2.1.3.4 Estado físico. Los aceites lubricantes pueden ser líquidos, semisólidos o sólidos. Los líquidos son los más comunes y se utilizan en la mayoría de las aplicaciones. Los semisólidos son más resistentes al desgaste que los líquidos, pero también son más difíciles de

aplicar. Los sólidos se utilizan en aplicaciones donde la lubricación líquida no es posible, como en entornos con altas temperaturas o presiones(Menezes et al., 2013).

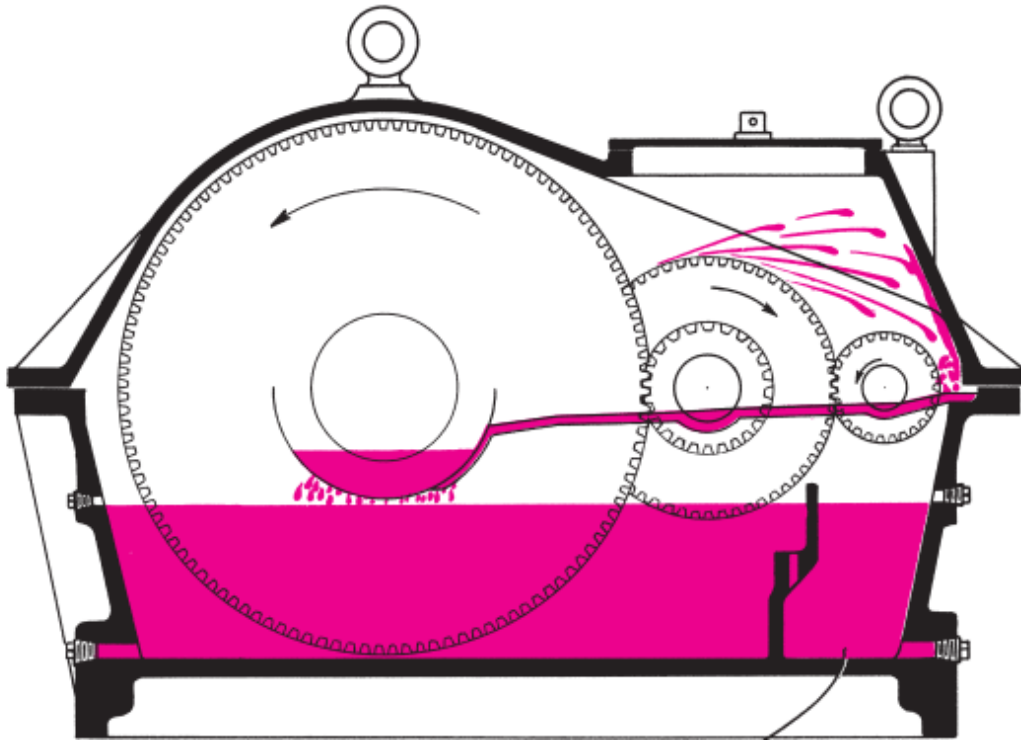
2.1.4 Clasificación de las técnicas de lubricación.

Debido a que el mecanismo de transmisión usado en el estudio son engranajes rectos, la técnica de lubricación debe ser conveniente para el equipo, buscando eliminar el contacto entre engranajes y así disminuir el desgaste derivado de la fricción, en la industria es usual encontrar las siguientes técnicas de lubricación.

2.1.4.1 Lubricación por salpique. Es un sistema sencillo y económico, idóneo para lubricaciones que no requieren de precisión alta, en el que los engranajes se sumergen en un baño de aceite y la lubricación se basa en el movimiento de las partes para salpicar las zonas que requieren lubricación (Neurouth et al., 2017), como se puede ver en la Figura 1.

Figura 1

Lubricación por salpique



Nota. Figura de ejemplo de lubricación por salpique (p.252). Tomado de Lubrication

Fundamentals, por Pirro et al., 2001.

La lubricación por salpique es altamente usada en la industria en cajas de engranaje con velocidad intermedia-baja, esta técnica se utilizó en el banco de pruebas planteado para este estudio, este método fue la base para desarrollar los ensayos requeridos ya que el proceso metodológico empleado consistió en la variación del nivel del aceite alojado en la parte inferior de la caja.

2.1.4.2 Lubricación por neblina de aceite. Este sistema es una alternativa eficiente y precisa, consiste en atomizar el lubricante en la caja de engranajes en una corriente de aire comprimido seco. Las gotas de aceite depositadas sobre los dientes de engranaje proporcionan una lubricación efectiva sin arrastre de aceite (Kettleborough, 1994).

2.1.4.3 Lubricación por dispensador de goteo. Este método se basa en bombear aceite desde un depósito a través de una tubería hasta el goteador ubicado en la parte superior de las piezas, este se encuentra graduado mediante una válvula de agua la cual regula las gotas que deben lubricar las partes del sistema que lo requieran (Castañeda & Castillo, 1990).

2.1.4.4 Lubricación por engrase. Esta técnica consiste en lubricar las superficies que se encuentran en contacto, buscando reducir la fricción y el desgaste mediante un proceso de engrase. Con este método se lubrican piezas que no pueden ser lubricadas por otros métodos, como las cadenas, los engranajes y los cojinetes de deslizamiento (Lugt, 2009).

2.1.5 Propiedades Fisicoquímicas De Los Aceites Lubricantes

La selección de un aceite lubricante para un par de engranajes es fundamental para garantizar su correcto funcionamiento y prolongar la vida útil. La elección del lubricante depende de la actividad que se va a realizar. La caracterización de los aceites lubricantes comprende un gran número de propiedades fisicoquímicas, que son de interés cuando se realizan ensayos sobre estos ya que con base en estos se puede obtener información de interés.

Algunas de las principales propiedades que se encuentran en los lubricantes se mencionan a continuación.

2.1.5.1 Viscosidad. Esta es la propiedad más determinante en un aceite lubricante, esta se puede definir como la resistencia a fluir y como una medida de rozamiento entre moléculas. La viscosidad es un parámetro de selección y una propiedad fisicoquímica, es usado como parámetro de selección ya que esta es una variable que se utiliza para elegir el aceite para una aplicación específica, mientras las propiedades fisicoquímicas son características inherentes del lubricante, por ende, no pueden ser modificadas o eliminadas ya que hacen parte de su naturaleza (Pirro et al., 2001).

2.1.5.2 Índice de viscosidad. Se conoce como la relación entre la viscosidad y la temperatura del aceite, con este índice se mide la capacidad de un aceite para mantener su viscosidad a diferentes temperaturas, un índice alto refleja la capacidad de lubricar a temperaturas altas (Verdier et al., 2009).

2.1.5.3 Temperatura. Esta propiedad es una variable crítica en la operación del sistema. Los lubricantes vienen con un punto de inflamación y un punto de congelación correspondiente, depende del uso y zona donde se vaya a usar, tener conocimiento de la temperatura de operación del sistema es crucial para la elección del lubricante (Pirro et al., 2001).

2.1.5.4 Índice de acidez. Es una medida de la cantidad de ácidos grasos libres presentes en una grasa o aceite (Fox & Picken, 1991).

2.2 Engranajes.

Los engranajes son mecanismos constituidos por dos o más ruedas dentadas acopladas entre ellas, generalmente denominadas como piñón y corona, debido a que una genera el movimiento motriz y la otra se ve conducida respectivamente.

Los engranajes son sistemas mecánicos utilizados como mecanismo de transmisión de potencia, son uno de los sistemas más utilizados en la industria ya que son eficientes y precisos.

Según la necesidad que se presente o la función que se deba desempeñar se selecciona el tipo de engrane, no existe un engrane ideal ni perfecto, según la situación existe un engranaje más adecuado que el resto, según Dudley (1973) se encuentran divididos en tres tipos de engranes según sus ejes y a partir de esto se deriva una lista de cada uno.

2.2.1 Engranajes con ejes paralelos.

Estos se subdividen en:

- Engranajes rectos externos e internos.

- Engranajes helicoidales externos e internos.
- Engranajes espina de pescado externos e internos.

2.2.2 Engranajes con ejes que se cortan.

Estos se subdividen en:

- Engranaje cónico recto, de diente zero, y de diente espiral.
- De cara
- De diente ahusado

2.2.3 Engranajes con ejes que no se intersecan ni son paralelos.

- Helicoidales con ejes que se cruzan
- Sinfín envolvente sencillo
- Sinfín envolvente doble
- Hipoides
- Espiroides
- Planoides
- De diente ahusado
- De cara
- Helicones

2.2.4 Engranajes rectos.

El tipo de engranaje de interés es el de dientes rectos, debido a que el estudio se desarrolló con este tipo de engranajes para establecer su relación con la lubricación empleada y como se degradan las partes involucradas a medida que se desarrolla el ensayo, esta información es de interés ya que se conoce que un posible fallo de engranajes puede recaer en la afectación generada por las propiedades fisicoquímicas del lubricante empleado e igualmente su eficiencia

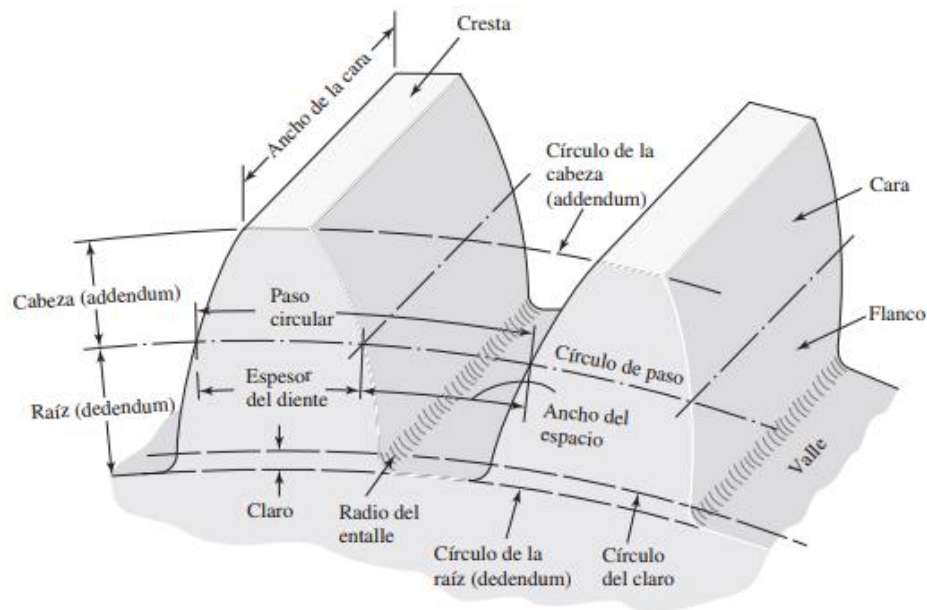
puede disminuir debido a la técnica de lubricación utilizada en el sistema (Townsend et al., 1989).

Los engranajes rectos poseen dientes paralelos al eje de rotación y se usan para transmitir movimiento de un eje a otro eje paralelo, es utilizado para proporcionar velocidad y una relación de par constantes.

Los ángulos de presión más usados son 14, 20 y 25 grados, entre más pequeño sea el ángulo de presión mayor es la relación de contacto con el perfil haciendo la acción del diente más silencioso, sin embargo, su capacidad de transmitir potencia disminuye (Dudley, 1973). En la Figura 2 se puede apreciar la nomenclatura de los dientes de engranajes rectos.

Figura 2

Terminología de los dientes de engranes rectos



Nota. Tomado de Diseño en ingeniería mecánica (p.649), por Budynas & Keith Nisbett, 2012.

Según Budynas & Keith Nisbett (2012) los términos que se tienen presente para entender los engranajes son el círculo de paso el cual es un círculo teórico que se utiliza como base para

los cálculos. Su diámetro es el diámetro de paso. Los círculos de paso de dos engranajes acoplados son tangentes entre sí.

El piñón es el engranaje más pequeño de los dos acoplados, mientras que el engranaje más grande se conoce como rueda. El paso circular p es la distancia medida sobre el círculo de paso, desde un punto en un diente hasta un punto correspondiente en un diente adyacente. Por lo tanto, el paso circular es igual a la suma del espesor del diente y del ancho del espacio.

El módulo m representa la relación entre el diámetro de paso y el número de dientes. La unidad de longitud comúnmente utilizada es el milímetro. El módulo indica el tamaño de los dientes en unidades del SI.

El paso diametral P se calcula mediante la relación entre el número de dientes en el engranaje y el diámetro de paso. Por lo tanto, es el inverso del módulo. Debido a que el paso diametral se utiliza solo en el sistema inglés, se expresa en dientes por pulgada.

La distancia entre la cresta y el círculo de paso determina la cabeza también llamada adendum relacionada con la letra a . La raíz o dedendum notado con la letra b se define como la distancia desde el fondo hasta el círculo de paso. La altura total “ ht ” es la suma de la cabeza y la raíz.

El círculo del claro es un círculo tangente al círculo de la raíz del engrane acoplado. El claro c se calcula como la diferencia entre la raíz de un engrane dado y la cabeza de su engrane acoplado. El huelgo se determina por la diferencia entre el ancho del espacio de un diente y el grosor o espesor del diente de acoplamiento, medido en los círculos de paso.

La comprensión de la terminología de los dientes de engranes rectos es útil para el diseño, el análisis y el ensayo con engranajes, en un experimento tribológico se utiliza para

describir las condiciones de contacto entre los dientes, lo que permite identificar los factores que influyen en la fricción, el desgaste y el ruido.

2.2.5 Temperatura de operación en la caja de engranajes

La temperatura de operación difiere de la temperatura ambiente ya que mientras se ejecutan trabajos la temperatura aumenta respondiendo a la agitación y al rozamiento. Monitorear la temperatura de operación es importante ya que cualquier irregularidad inesperada se verá reflejada en este parámetro, la contaminación o presencia de partículas extrañas pueden derivar en un aumento inesperado de la temperatura sobrepasando la temperatura estimada. La temperatura máxima que se puede alcanzar en la parte externa del mecanismo es 50 °C, si la tendencia refleja que se va a sobrepasar, se debe analizar si se origina por exceso de fricción, lo cual podría exponer una mala lubricación (Albarracin, 2008) y se deben tomar acciones para que no persista la falla, lo anterior se afirma con base en la curva tribológica negativa de un mecanismo, ya que esta se proyecta sobrepasando la propensión al desgaste especificada por los fabricantes debido a múltiples causas que desencadenaran en averías y desgaste anormal en las piezas, debido a esto mediante la curva se analiza la tendencia anormal en los diferentes parámetros y se corrige de manera anticipada.

2.3 Normativas.

Las normas sirven para establecer estándares de calidad, seguridad y rendimiento en los análisis de aceites lubricantes y en los diferentes procesos que se relacionan con la determinación del estado del aceite, las normas que se ven involucradas en este estudio son:

2.3.1 Norma ASTM D4057-22

Describe los procedimientos y equipos para obtener muestras manuales de aceite lubricante, garantizando que se obtengan de manera representativa y que puedan analizarse con precisión

para determinar su calidad y propiedades. Esta norma proporciona directrices sobre los artefactos que son permitidos para almacenar, transportar, extraer el fluido, manteniendo la calidad en el muestreo (ASTM INTERNATIONAL, 2022).

2.3.2 Norma ASTM D4840-99

Establece el procedimiento para mantener un programa de cadena de custodia de muestras. La cadena de custodia garantiza la integridad de una muestra desde el momento en que se recoge hasta el momento en que se analiza, mediante los procedimientos según la norma (ASTM INTERNATIONAL, 2018).

2.3.3 Norma ASTM D5854-19

Describe los procedimientos de manipulación, mezcla y acondicionamientos necesarios para garantizar que una muestra representativa de aceite lubricante se transfiera desde el recipiente de muestra hasta el aparato analítico (ASTM INTERNATIONAL, 2019).

2.3.4 Norma ASTM D6595-22

Evalúa el estado de los equipos mecánicos mediante el análisis de los metales de desgaste y contaminantes presentes en los aceites lubricante. Los resultados del ensayo proporcionan información sobre el estado de las superficies en contacto, el funcionamiento del equipo y la necesidad de mantenimiento (ASTM INTERNATIONAL, 2022).

2.3.5 Norma ASTM D445

Se utiliza para medir la viscosidad cinemática de los lubricantes, que es una medida de la resistencia de un líquido al flujo. La viscosidad cinemática se calcula dividiendo la viscosidad dinámica por la densidad del líquido (ASTM INTERNATIONAL, 2023).

2.3.6 Norma ISO 4406

Es una norma internacional que define un código para clasificar la limpieza de los fluidos hidráulicos en función del número de partículas sólidas que contienen. El código ISO 4406 se basa en el recuento de partículas por mililitro de fluido hidráulico (International Organization for Standardization, 2021).

2.3.7 Norma ASTM D664

Determina el índice de acidez del aceite lubricante, esta es una medida de la cantidad de ácidos presentes, los cuales causan corrosión y desgaste (ASTM INTERNATIONAL, 2019).

2.3.8 Norma ASTM D6304

Se implementa para la determinación del agua en el aceite lubricante mediante valoración coulombimétrica de Karl Fischer (ASTM INTERNATIONAL, 2020).

2.3.9 Norma ASTM D7690

Es un método para la caracterización microscópica de partículas de lubricante mediante ferrografía analítica, la cual es una técnica usada para analizar las partículas de desgaste y contaminación presentes (ASTM INTERNATIONAL, 2021).

2.3.10 Norma ASTM E2412

Se realiza el monitoreo de la condición de los aceites lubricantes mediante el análisis de tendencias con espectrometría infrarroja. El espectro infrarrojo es un patrón único de absorción de la luz infrarroja por parte de los diferentes grupos funcionales presentes en el material (ASTM INTERNATIONAL, 2023b).

2.3.11 Norma ASTM D5185

Esta norma determina los elementos aditivos, metales de desgaste y contaminantes en aceites lubricantes usados y en aceites base mediante espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ASTM INTERNATIONAL, 2018).

3. Justificación

El mantenimiento es una actividad esencial para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos industriales. Realizarlo correctamente previene a los equipos de sufrir desgaste prematuro lo cual puede provocar fallas y paradas no programadas, estas pueden afectar la producción, los activos y la productividad de las empresas. En este proyecto de investigación se estudió la degradación en aceites lubricantes para engranajes, analizando las propiedades fisicoquímicas a través del tiempo estipulado y las variaciones de altura del nivel de aceite.

La correcta aplicación de lubricación en maquinaria industrial genera beneficios como la reducción de fricción y desgaste en las piezas, sin embargo se debe tener presente que con el paso del tiempo el aceite se degrada debido a la función que realizan y esto deriva en un deterioro del mismo, dificultando que cumpla las funciones de la misma forma y sin un correcto monitoreo de este puede conllevar a fallas y daños en los equipos, es por esto que el análisis de aceites y su estudio de las propiedades puede lograr detectar averías inesperadas en los componentes y deterioro excesivo del lubricante anticipando fallos fatales en la maquinaria y los costos que esto implica además de reducir las interrupciones no programadas (Tormos, 2013).

Con base en lo anterior se concluye que realizar estudios de aceites lubricantes en los equipos contribuye positivamente a la industria dado que este método predictivo estudia la evolución temporal de los parámetros para vincularlos con las fallas que ocurren siendo superior a otros tipos de mantenimiento ya que la velocidad con la que se obtiene la información es

inmediata, esto resulta pertinente para mejorar la operación en los sectores manufactureros (Navarro & Pastor, 1997).

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Desarrollar el estudio de la degradación de un aceite lubricante en un mecanismo de transmisión por engranajes con base en las variables presentes en la lubricación por salpicadura a través de la caracterización de sus propiedades fisicoquímicas.

4.2 Objetivos Específicos

Identificar los factores de contaminación y degradación en las propiedades fisicoquímicas que indican el estado del aceite usado en el mecanismo de transmisión por engranajes con lubricación por salpicadura, basado en la literatura y antecedentes.

Desarrollar el procedimiento de monitoreo de la condición del aceite lubricante operando en el mecanismo de transmisión por engranajes con lubricación por salpicadura basándose en las normas ASTM D4057-22 y ASTM D5854-19 para realizar el muestreo en la experimentación, para la caracterización de las propiedades fisicoquímicas del lubricante.

Evaluar el comportamiento de las propiedades fisicoquímicas del lubricante en la condición de operación establecida conforme varía el nivel de aceite lubricante en el sistema de lubricación por salpicadura en un mecanismo de transmisión de potencia por engranajes.

5. Metodología.

5.1 Diseño Experimental

En este apartado del proyecto se definió el procedimiento para el muestreo, su procesamiento y su análisis posterior, como primera medida se realizó un diagnóstico del banco de pruebas que emplea un mecanismo de transmisión con engranajes lubricando por salpicadura, con el fin de determinar si requiere intervención en la sección de los engranajes, además de esto se establecieron las diferentes variables que se trabajaron en el estudio y su manejo dentro de la investigación para obtener resultados acordes a las premisas planteadas.

La experimentación se realizó mediante la aplicación de la normativa ASTM y la normativa ISO, para garantizar la confiabilidad y exactitud de la investigación, cada normativa empleada contribuyó a la implementación de procedimientos adecuados en cada etapa del estudio. La norma ASTM D4057-22 sirvió para la obtención de las muestras, garantizando su validez en el estudio, tanto en la extracción, manipulación y transporte de las muestras. Así mismo las normas estandarizan los procedimientos que evalúan las propiedades fisicoquímicas de los aceites lubricantes. La norma ASTM D6595-22 analiza el desgaste y los contaminantes presentes. La norma ASTM D445 mide la viscosidad del lubricante, la propiedad más importante de este. La norma ASTM D664 determina el número ácido presente en la muestra. La norma ASTM D6304 se implementa para determinar la humedad presente en el aceite. La norma ASTM D7690 realiza la ferrografía analítica del lubricante, para diferenciar el tamaño de las partículas

contaminantes, su influencia en el aceite y determinar el desgaste total. Por último, la norma ISO 4406 fue la normativa que se basa en el recuento de partículas por medio de fluido hidráulico. La aplicación de estas normas asegura la calidad y la seguridad de los aceites lubricantes, ratifica la validez de los resultados obtenidos, permite la detección de problemas y previene probables fallos.

5.1.1 Diagnóstico y adaptaciones del equipo usado en el estudio

Los bancos experimentales se usan para someter los mecanismos de la industria a distintas variables, simulando las condiciones de operación real, estudiando cómo se desempeñan con los parámetros que se establezcan, como el tipo de aceite, el nivel del lubricante, las velocidades de giro, entre otras, además de poder monitorear la temperatura y las propiedades del aceite lubricante. Estos ensayos y sus posteriores análisis se realizan para determinar cuáles configuraciones plantean un mejor comportamiento de las partes involucradas.

Los bancos de ensayo para engranajes permiten evaluar el rendimiento de lubricantes en condiciones controladas. Esto es importante porque las condiciones reales de operación pueden ser difíciles y costosas de replicar. Los bancos de ensayo también pueden utilizarse para validar los resultados obtenidos teóricamente garantizando que los lubricantes sean efectivos en condiciones reales.

Se utilizó un banco de pruebas experimentales para engranajes rectos, donde se ejecutaron los ensayos para el estudio de la degradación del aceite lubricante Mobilube HD 85W-140, el grado del aceite de un lubricante hace saber la viscosidad del mismo, un aceite con mayor grado es más espeso y fluirá más lentamente que uno de menor viscosidad. Este parámetro sirve para escoger el aceite indicado, en el caso del lubricante 85W-140, señala que

tiene una viscosidad de 85 cSt a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una viscosidad de 140 cSt a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y sirve para trabajar con ejes y engranajes entre otras aplicaciones.

El banco consta de un motor eléctrico de 2 HP y una velocidad de 1800 RPM, chumaceras tipo brida ovaladas NTN, acople flexible de torsión de tipo araña, ejes de acero 1045, soportes, chumaceras para la caja, además de un par de engranajes rectos de 31 y 23 dientes y de diámetros primitivos de 93 y 63 mm respectivamente, como se puede ver en la Figura 3 y Figura 4.

Figura 3

Partes del banco de pruebas

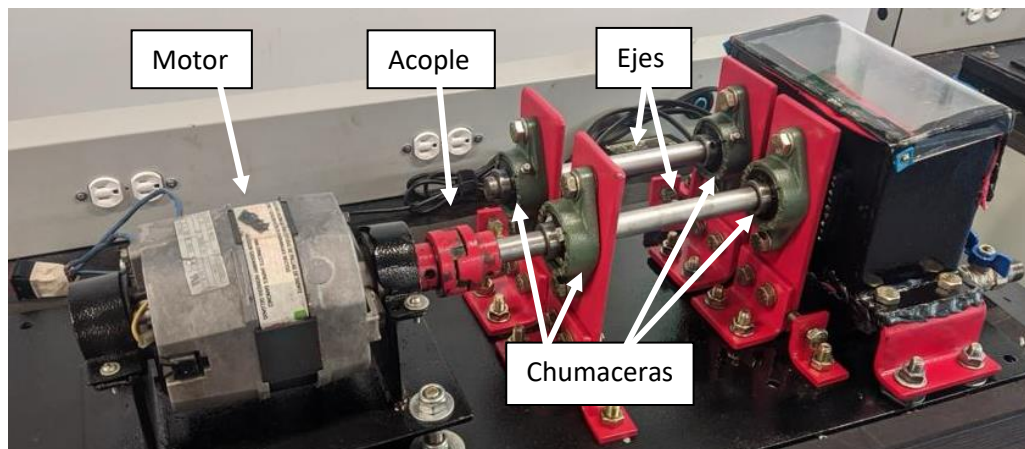
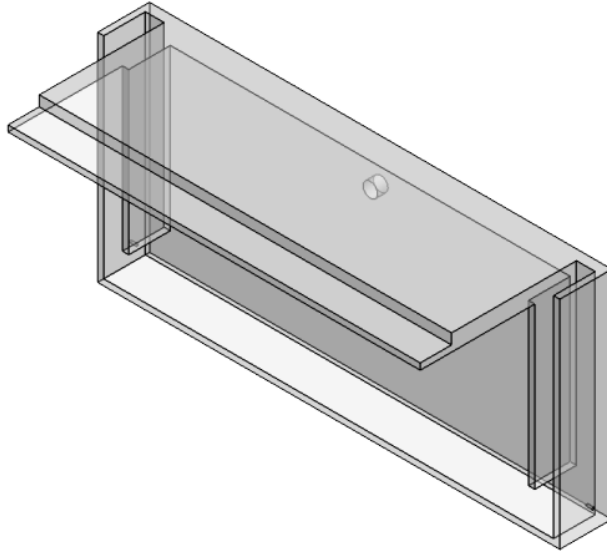


Figura 4

Engranajes rectos acoplados en el banco de pruebas



Se observó un correcto funcionamiento de los engranajes, los dientes engranaron de forma idónea. Con base en esto, la modificación que se realizó fue la tapa de acrílico para evitar fugas de aceite durante la ejecución de los ensayos, debido a que la tapa original permitía que se escapara el aceite con facilidad. Se diseñó una tapa nueva en acrílico en SolidWorks como se puede ver en la Figura 5, permitiendo visibilidad de los engranajes y del aceite garantizando que el nivel del aceite se mantenga. Sin embargo, a pesar de esta modificación se registraron dos posibles puntos de fuga, el sistema de drenaje y los espacios que quedan entre la caja y la tapa.

Figura 5*Tapa de acrílico*

Nota. La figura representa el modelo hecho en SolidWorks de la caja de acrílico usada en este estudio.

El sistema de drenaje no se encontraba ajustado apropiadamente, por lo que se evidenciaban filtraciones en esa zona, se solucionó sellando el agujero que funciona como desagüe en el fondo de la caja con papel húmedo, un laminado recubierto y ligado químicamente, con flexibilidad y resistencia mecánica el cual funcionó como empaquetadura y sellándolo con silicona RTV roja “LOCTITE SI 596” la cual forma una unión de caucho de silicona resistente e impermeable al aceite, en las Figura 6 y Figura 7 respectivamente, se puede ver gráficamente los implementos usados para evitar las fugas de lubricante. La caja de acrílico se diseñó para restringir el escape de aceite lo máximo posible, sin embargo, se seguía fugando por los orificios que quedaban entre la tapa y la caja, se selló mediante papel húmedo y silicona roja, eliminando así los puntos de fuga y como resultado se pudo proceder a ejecutar los ensayos.

Figura 6

Papel húmedo



Nota. Figura de ejemplo del papel usado en el estudio como empaquetadura. Tomado de SEALCO. <https://cisealco.com/producto/papel-humedo/>

Figura 7

Silicona RTV



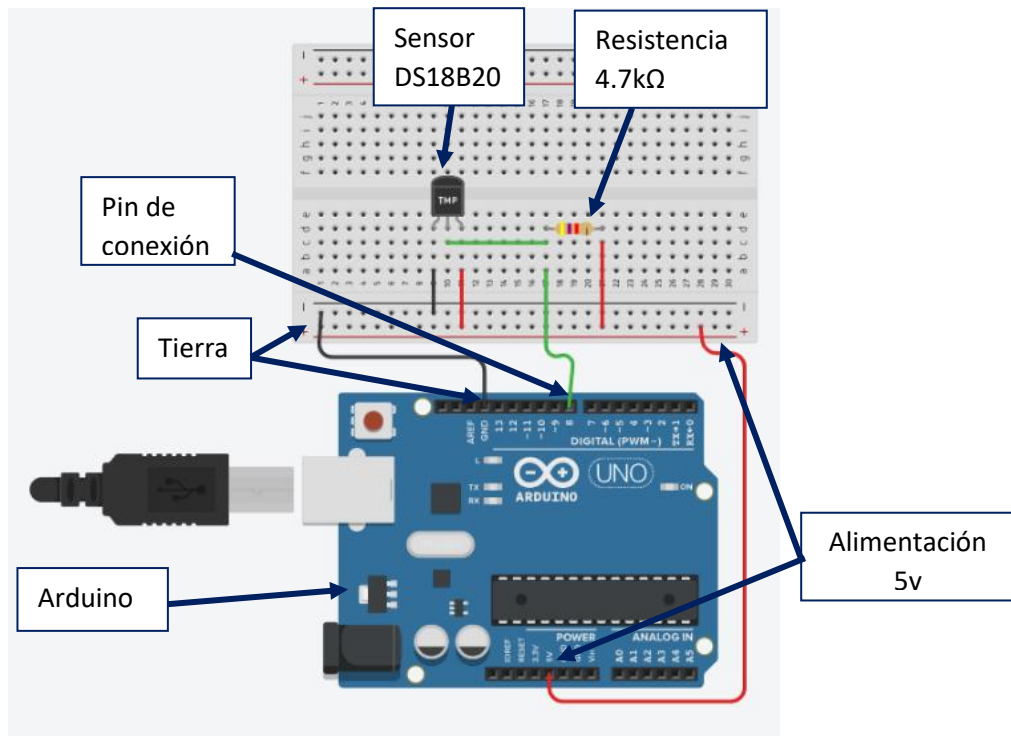
Nota. Figura de ejemplo de la silicona usada en el estudio como sellador. Tomado de LHENRIQUES/Loctite. <http://www.lhenriques.com/loctite/>

5.1.2 Monitoreo de temperatura y registro de tiempo.

Se incorporó un sensor de temperatura DS18B20, este es sumergible en fluidos ya que se encuentra encapsulado, por lo que es ideal en esta aplicación puesto que el salpique del aceite no afectara el registro de datos, realizando una conversión analógica a digital mediante un microcontrolador Arduino uno y un circuito como el de la Figura 8, monitoreando la temperatura del aceite según avanzaba el tiempo.

Figura 8

Circuito electrónico.



Nota. La figura representa el circuito utilizado para el monitoreo y registro de datos. Diseñado mediante la aplicación TINKERCAD.

El código utilizado se presenta en el Anexo A, este necesitó la inclusión de bibliotecas para su correcto funcionamiento, la biblioteca “Wire.h” se utilizó para la comunicación I2C, la biblioteca “DallasTemperature.h” se utilizó para comunicarse con el sensor de temperatura

DS18B20, la biblioteca “Time.h” se utilizó para el seguimiento del tiempo y la biblioteca “TimeLib.h” se utilizó para proporcionar funciones de tiempo adicionales.

Se definió una constante llamada ONE_WIRE_BUS y le asigna el pin al que está conectado el sensor de temperatura Dallas DS18B20.

Las líneas “float Celsius = 0; y String hora = "";” declaran dos variables, Celsius y hora. La variable Celsius se utiliza para almacenar la lectura de temperatura del sensor de temperatura Dallas DS18B20, y la variable hora se utiliza para almacenar una representación de cadena de la hora actual.

La función “setup ()” se llama una vez al inicio del programa. Esta función inicializa el objeto “sensors” y configura la comunicación serial.

La función “loop ()” se llama repetidamente mientras se ejecuta el programa. Esta función lee la temperatura del sensor DS18B20 y convierte la temperatura a grados Celsius, formatea la hora actual como una cadena e imprime la hora y la temperatura en el monitor serie. El programa luego retrasa 600 segundos antes de repetir el bucle.

5.1.3 Parámetros de los ensayos

Como primera medida se registraron las medidas de la caja ya que de acuerdo a estas se pudo establecer las alturas de los niveles de aceite que se trabajaran y cuanto volumen ocupan dentro de la caja.

Largo (L) = 202 mm

Ancho (A) = 90 mm

Alto (H) = 130 mm

Con estos valores se calcula el volumen máximo que puede llegar a ocupar el aceite, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen}_{\text{Tanque}(i)} = L * A * H = 202 * 90 * 130 = 2363400 * 10^{-6} = 2.3634 \text{ litros}$$

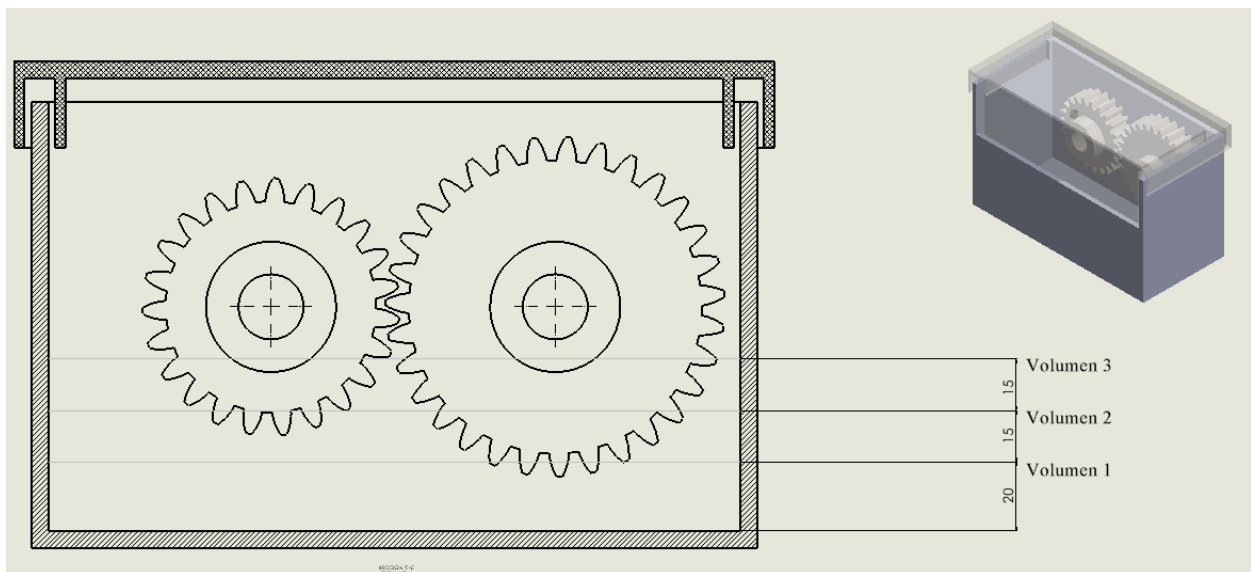
Sin embargo, esta medida es ideal, debido a que hay un corte en una de las paredes de la caja de engranajes, por esto la medida real de volumen máximo sin que se desborde el aceite que se puede almacenar es de:

$$\text{Volumen}_{\text{Tanque}(r)} = L * A * H = 202 * 90 * 72 = 1308960 * 10^{-6} = 1.30896 \text{ litros}$$

Teniendo claras las dimensiones de la caja de engranajes, se procedió a definir las alturas de los diferentes niveles que se tendrán ya que esta es la variable principal del estudio. Se tomaron 3 alturas diferentes como se puede observar en la Figura 9, conformando un total de 4 muestras de 120 ml cada una, incluyendo la muestra patrón para posteriormente realizarle los análisis correspondientes.

Figura 9

Niveles de aceite



Nota. Esta figura muestra la caja de engranajes y los distintos niveles de aceite que se usaron.

Las muestras se tomaron de manera ascendente, es decir, desde los 20 mm de altura con respecto al fondo de la caja, aumentando 15 mm aproximadamente hasta llegar a 50 mm de altura, teniendo claro la secuencia a seguir se calcularon los diferentes volúmenes y la diferencia que aumento.

$$\text{Volumen}_1 = L * A * H = 202 * 90 * 20 = 363600 * 10^{-6} = 0.3636 \text{ litros}$$

$$\text{Volumen}_2 = L * A * H = 202 * 90 * 35 = 581760 * 10^{-6} = 0.6363 \text{ litros}$$

$$\text{Volumen}_3 = L * A * H = 202 * 90 * 50 = 799920 * 10^{-6} = 0.909 \text{ litros}$$

Teniendo un aumento de volumen de:

$$\Delta \text{Volumen}_{1-2} = 0.6363 - 0.3636 = 0.2727 \text{ litros}$$

$$\Delta \text{Volumen}_{2-3} = 0.909 - 0.6363 = 0.2727 \text{ litros}$$

Por último, para ejecutar los ensayos, debieron establecerse ciertas condiciones para garantizar igualdad en cada una de las fases del muestreo, tales como:

El tiempo de operación total de la maquina fue de 150 horas, cada muestra se extrajo al pasar 50 horas, trabajando 8 horas con 20 minutos por día durante 6 días, el tamaño de la muestra fue de 120 ml cada una, ya que fue la medida requerida para garantizar la representatividad de las muestras.

El ensayo se le realizó al aceite lubricante para engranajes Mobilube HD 85W-140, ya que teóricamente encaja en el tipo de lubricante que puede aplicarse en engranajes rectos con técnica de lubricación por salpicadura.

La temperatura ambiente estándar del laboratorio de vibraciones mecánicas donde se encuentra el banco de pruebas oscila desde los 25 °C hasta los 29 °C, además se le realizó un registro periódico aproximadamente cada 600 segundos a la temperatura dentro de la caja mediante un sensor y un circuito electrónico externo.

Los niveles de aceite y el tiempo de operación son las variables experimentales influyentes que están presentes en el ensayo, los resultados tienen una relación directa con estas.

5.1.4 Procedimiento para la ejecución de los ensayos

5.1.4.1 Verificación y limpieza del equipo. Como primera medida se verificó el correcto funcionamiento del equipo, una vez que se le realizaron las adaptaciones correspondientes, se higienizó usando un desengrasante industrial para remover los residuos de lubricante y suciedad que estuvieran contaminando la caja o los engranajes. Posteriormente se hizo un lavado y se descargó el contenido mediante el grifo, por último, se secó, eliminando la humedad residual y se procedió a agregar el aceite e iniciar las pruebas.

5.1.4.2 Llenado de aceite hasta 20 milímetros de altura. Después de disponer de un escenario adecuado, se procedió a llenar la caja para engranajes hasta 20 milímetros desde el fondo. Los dientes del engranaje conducido quedaron inmersos aproximadamente 4 milímetros tal como se muestra en la Figura 10, cumpliendo estos parámetros se puso en marcha el motor y se dio inicio a las pruebas.

Figura 10

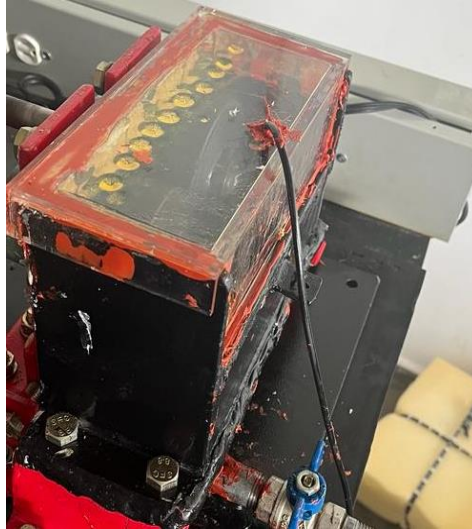
Nivel de aceite con altura de 20 milímetros



La Figura 11 corresponde al primer nivel de aceite en condiciones de operación normal, el cual formo puntos de aceites sobre los engranajes, la cantidad de aceite que se adhería a la tapa era poca debido a que el nivel apenas era suficiente para lubricar el sistema.

Figura 11

Inspección visual del ensayo con una altura de 20 milímetros

**5.1.4.3 Extracción y etiquetado de la muestra de aceite 20 milímetros de altura.**

Cumplidas cincuenta horas en funcionamiento, se detuvo el ensayo y se extrajo la muestra, utilizando un extractor de aceite tipo jeringa como el de la Figura 12 y se depositó en envases de 120 ml, los cuales quedaron llenos en su totalidad, una vez concluido este procedimiento se etiquetó con la información requerida basándose en la normativa ASTM D4840-99 como se puede ver en la Figura 13, además del etiquetado se completó un documento para la identificación de variables presentes en los ensayos, este fue un requisito junto con la ficha técnica del lubricante adjuntos en el anexo B y C, necesarios para tener conocimiento de las condiciones del aceite, como temperatura, tipo de equipo, método de muestreo, tiempo de operación, material de los engranajes, características del lubricante, etc.

Figura 12

Extractor de aceite



Figura 13

Formato de etiqueta

		Fecha y Hora de la muestra:		 TOME LA MUESTRA CON EL ACEITE CALIENTE	
		<input type="text"/>			
Cliente:		Marca de Equipo:		Marca aceite /grado ISO-SAE	
Equipo:	Serie:	Modelo:	Muestra de aceite		
Codigo de Equipo (TAG)	Tiempo de uso aceite: km Hrs Mes		<input type="checkbox"/> Sistema Hidráulico		
Lugar de Trabajo:		Cambio el aceite al tomar esta muestra? Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> Sistema de Dirección	
Cambio filtro de aceite al tomar esta muestra? Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		Cambio filtro de aceite al tomar esta muestra? Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> Motor	
				<input type="checkbox"/> Transmisión	
				<input type="checkbox"/> Otro: _____	
				Tiempo desde la ultima reparación	
				Hora	km
				Cantidad aceite adicionado	
				Litros	Galones
♦ Av. 37B N° 38A-12 Itagüí - Colombia ♦ Tel: (604) 370 4700 ♦ www.cisealco.com ♦ sealco@cisealco.com					

5.1.4.4 Limpieza del equipo y llenado de aceite hasta 35 milímetros de altura. Se limpia exhaustivamente hasta que no quedaron residuos ni contaminantes e igualmente como se realizó anteriormente se llenó la caja de engranajes. Hasta una altura de 35 milímetros como se observa en la Figura 14.

Figura 14

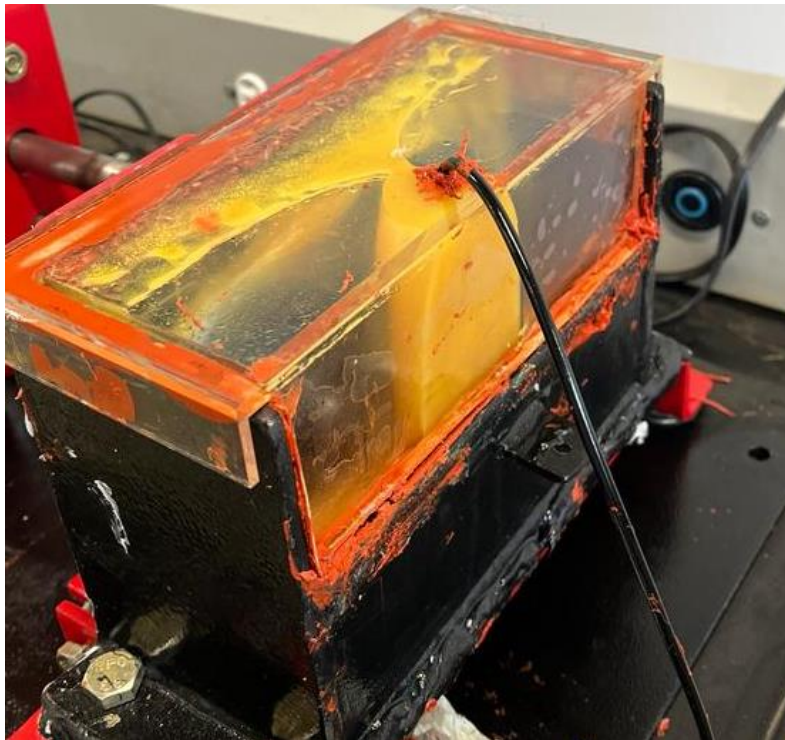
Nivel de aceite con altura de 35 milímetros



La Figura 15 corresponde a el segundo nivel de aceite, el cual tuvo una altura de aceite 35 mm con respecto a la base de la caja de engranajes. Se evidencia una mayor cantidad de aceite adherida a la tapa en comparación con el primer nivel de 20 mm de altura, esto debido a que el volumen aumento y los engranajes se encontraban más inmersos que en el caso anterior logrando acaparar mayor cantidad de aceite.

Figura 15

Inspección visual del ensayo con una altura de 35 milímetros

**5.1.4.5 Extracción y etiquetado de la muestra de aceite de 35 milímetros de altura.**

Se repite el mismo procedimiento para la extracción y etiquetado realizada anteriormente con la muestra de 20 milímetros.

5.1.4.6 Limpieza del equipo y llenado de aceite hasta 50 milímetros de altura. Se repite la limpieza hasta que no quedaron residuos ni contaminantes e igualmente como se realizó en el segundo paso, se llena la caja de engranajes hasta una altura de 50 milímetros como se observa en la Figura 16.

Figura 16

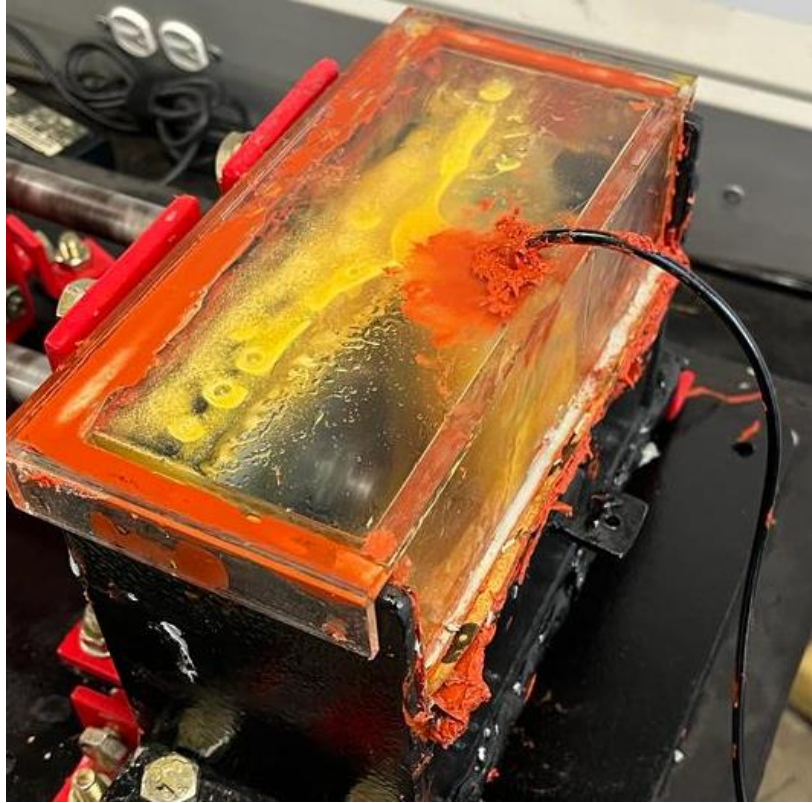
Nivel de aceite con altura de 50 milímetros.



La Figura 17 corresponde a el ultimo nivel de aceite, el cual tuvo una altura de aceite 50 milímetros con respecto a la base de la caja de engranajes. Se evidencia una mayor cantidad de aceite adherido a la tapa en comparación con primer nivel de 20 mm y un poco más que en el segundo nivel de 35 mm, esto debido a que el volumen aumento y los engranajes se encontraban aún más inmersos que en los casos anteriores logrando acaparar mayor cantidad de aceite, generando una agitación mayor que en los casos anteriores.

Figura 17

Inspección visual del ensayo con una altura de 50 milímetros

**5.1.4.7 Extracción y etiquetado de la muestra de aceite de 50 milímetros de altura.**

Se realizó la extracción de la muestra tres y su etiquetado, además se drenó el aceite y se limpió la caja de engranajes, posteriormente se tomó la muestra patrón y se etiquetó para ser enviadas al laboratorio y realizarle las pruebas correspondientes.

6. Resultados y discusiones

Concluidos los ensayos para determinar las propiedades fisicoquímicas de las muestras de aceite, después de trabajar bajo las condiciones establecidas previamente en la sección metodológica, se presentan los resultados.

6.1 Temperatura

El monitoreo de la temperatura en función de la variación de su altura se puede ver reflejado en las Figura 18, Figura 19 y Figura 20, este duró 8 horas con 20 minutos por día hasta completar 50 horas, cada 600 segundos se registró la temperatura para reflejar los cambios en la caja de engranajes.

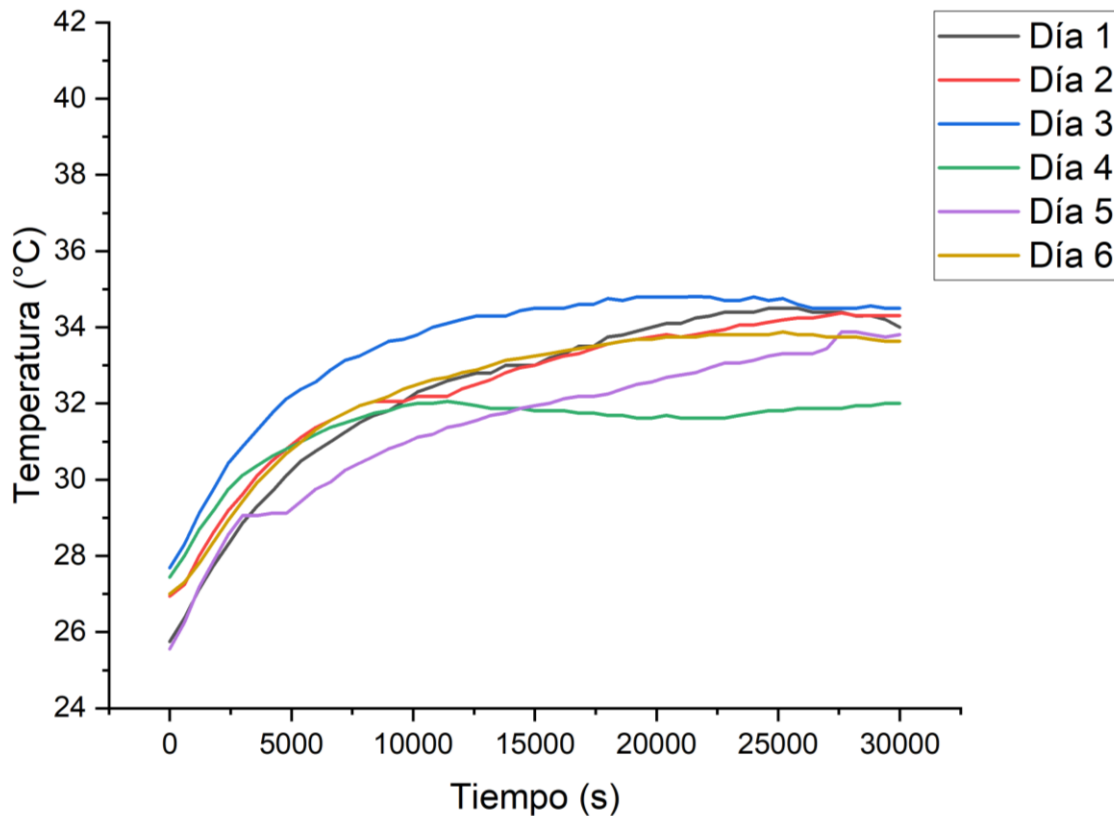
Las figuras muestran el comportamiento de la temperatura del aceite en grados centígrados, con este registro se puede apreciar que en todos los casos a medida que avanzaba el tiempo de trabajo, subía la temperatura del aceite, siempre se iniciaba con una temperatura aproximada de 25 o 26 grados, en el caso de la Figura 18 que grafica el registro de datos del ensayo realizado al aceite Mobilube HD 85W-140 con una altura de 20 milímetros ocupando un volumen de 0.3636 litros, alcanzó alrededor de los 34 °C al concluir los 30000 segundos de trabajo continuo. En la Figura 19 que grafica el monitoreo del ensayo realizado al aceite Mobilube HD 85W-140 con una altura de 35 milímetros ocupando un volumen de 0.6363 litros, llegó alrededor de los 39 °C al concluir los 30000 segundos de trabajo continuo. Por último, en la Figura 20 en la que es posible apreciar el registro de datos del ensayo realizado al aceite Mobilube HD 85W-140 con una altura de 50 milímetros ocupando un volumen de 0.909 litros, alcanzo una temperatura máxima alrededor de los 41 °C al concluir los 30000 segundos de trabajo continuo.

El comportamiento en las tres graficas es similar, se empieza a incrementar el valor desde temperatura ambiente hasta estabilizarse alrededor del pico máximo que llega a alcanzar, con base en los datos de la figura se aprecia que a medida que se aumenta el nivel del aceite y por ende aumenta la inmersión de los engranajes en el lubricante, la temperatura llega a picos más

altos, pero manteniéndose dentro de un rango aceptable para el aceite, de acuerdo a esto se puede inferir que el aumento de volumen de aceite conlleva un aumento en la temperatura de operación.

Figura 18

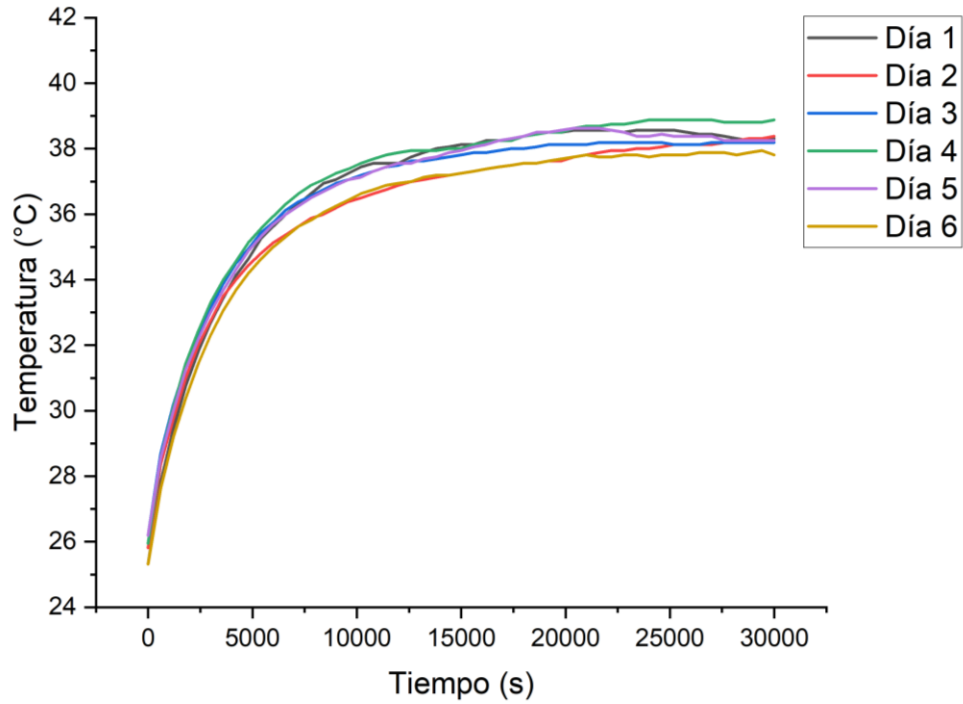
Monitoreo de temperatura del aceite con una altura de 20 milímetros



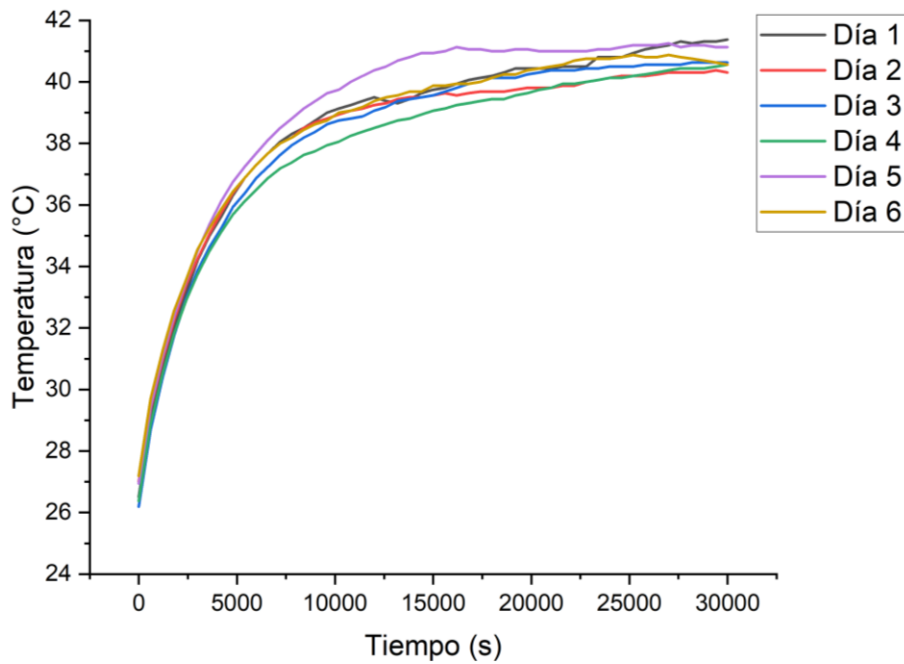
Se destaca la dispersión en las curvas de la Figura 18, específicamente en el día 4 se percibe un cambio en la tendencia, se puede atribuir este cambio a las condiciones climatológicas, las cuales son un factor determinante, debido a que un entorno frío contribuye a detener el aumento de temperatura en el aceite lubricante. En este día de trabajo no se presentó ninguna anomalía, se realizó el ensayo con normalidad.

Figura 19

Monitoreo de temperatura del aceite con una altura de 35 milímetros

**Figura 20**

Monitoreo de temperatura del aceite con una altura de 50 milímetros



En la Figura 18, Figura 19 y Figura 20 se advierte una similitud en las tendencias, sin embargo, según aumentó el volumen de aceite se alcanzaron picos de temperaturas más altos como ya se ha mencionado anteriormente, este resultado experimental del presente estudio se ve contrastado con el “Estudio de la degradación de un aceite lubricante para engranajes” (Becerra, 2014) en el cual se planteó un experimento similar, se observan similitudes en los cambios de temperatura, concluyendo de igual forma que a mayor cantidad de aceite empleado para lubricar, mayores temperaturas se alcanzan.

6.2 Viscosidad

Al realizar la prueba de viscosidad para determinar las tendencias y el comportamiento del aceite lubricante en función de la variación de las alturas, se infiere que de acuerdo a la Tabla 1 no existió un cambio considerable en la viscosidad, sin embargo los resultados muestran que a medida que se trabajaba con mayor cantidad de aceite, y por ende aumentaba la altura y los engranajes se veían más inmersos en el aceite, se aumentó ligeramente el valor de la viscosidad en la prueba de 40°C (cSt), manteniéndose en los rangos aceptables según el reporte, ya que para esto existe una alerta en caso de alcanzar el valor máximo de 399.6 cSt o el valor mínimo de 283.05 cSt, tal y como se muestra en el anexo D en el informe de estado del aceite, con lo cual se determina que es un aceite que puede trabajar correctamente en ensayos de este tipo y sus aplicaciones, pero transcurridas alrededor de 50 horas es necesario realizar un cambio de aceite debido a la técnica utilizada para lubricar.

Tabla 1*Variación de la viscosidad en función del cambio de volumen de aceite*

Muestra	Altura(mm)	Volumen(litros)	Viscosidad 40°C (cSt)
Patrón	0	0	376,3
Muestra 1	20	0,3636	374,6
Muestra 2	35	0,6363	375,1
Muestra 3	50	0,909	377,43

Si bien la temperatura aumentó durante el experimento, lo cual debería generar una disminución de la viscosidad en el aceite, el corto periodo de tiempo puede no haber sido suficiente para observar una variación permanente en la viscosidad del aceite. La viscosidad del aceite es sensible a la temperatura, pero los cambios pueden ser graduales y depender de la magnitud y la duración del cambio de temperatura.

En este caso, el aumentar la temperatura podría haber causado un aumento momentáneo en la viscosidad del aceite. Sin embargo, al tomar la muestra, la temperatura del aceite ya podría haber comenzado a disminuir, regresando a su viscosidad inicial, para observar un cambio permanente en la viscosidad, se necesitaría un periodo de tiempo más largo a una temperatura elevada.

Es importante tener en cuenta que la viscosidad del aceite no se modificó en gran manera debido a sus propiedades aditivas entre las cuales destaca su estabilidad térmica y resistencia a oxidación y debido a que su lubricación es adecuada en altas o bajas temperaturas no se generaron inconvenientes a raíz de la temperatura de operación del sistema (Terpel, 2021).

6.3 Ferrografía de lectura directa

Esta técnica se utiliza para determinar la cantidad de partículas grandes y pequeñas presentes en el lubricante. Para ello, se mezcla el lubricante con un aceite fijador y se vierte por

un tubo precipitador. En el fondo del tubo, se coloca una pequeña sección de cristal sobre un imán permanente. A medida que la muestra fluye por el tubo, las partículas de desgaste se adhieren al cristal en función de su tamaño. Las partículas más grandes se adhieren primero, seguidas de las partículas más pequeñas (Montoro, 2005).

Las partículas se dividen según su tamaño como se puede ver en la Tabla 2, las de mayor tamaño se desplazan hacia abajo, por ello todas las partículas de tamaño superior a 5 micrómetros se depositan en la posición del primer sensor. Las partículas de menor tamaño migran de manera lenta a través del fluido, recorriendo más espacio antes de depositarse sobre el tubo de vidrio. Si las lecturas de los sensores son similares esto sería indicativo de que solamente existen partículas pequeñas en el lubricante.

Tabla 2

Lectura de la ferrografía según la variación de volumen

Muestra	Altura(mm)	Volumen(litros)	Ferrografía de lectura directa		
			Grande (>5um)	Pequeño (<5um)	Desgaste total (WPC)
Patrón	0	0	0	0	0
Muestra 1	20	0,3636	52,5	14,8	67,3
Muestra 2	35	0,6363	59,5	30,3	89,8
Muestra 3	50	0,909	78,8	28,4	107,2

En la Figura 21 se presenta la tendencia del desgaste, evidenciando un aumento en el desgaste proporcional el nivel de aceite lubricante en el sistema de lubricación por salpicadura en el mecanismo de transmisión de potencia por engranajes, lo cual contrasta que a mayor cantidad de aceite mayor desgaste se presenta en el sistema, lo cual deriva en una necesidad de cambio de aceite.

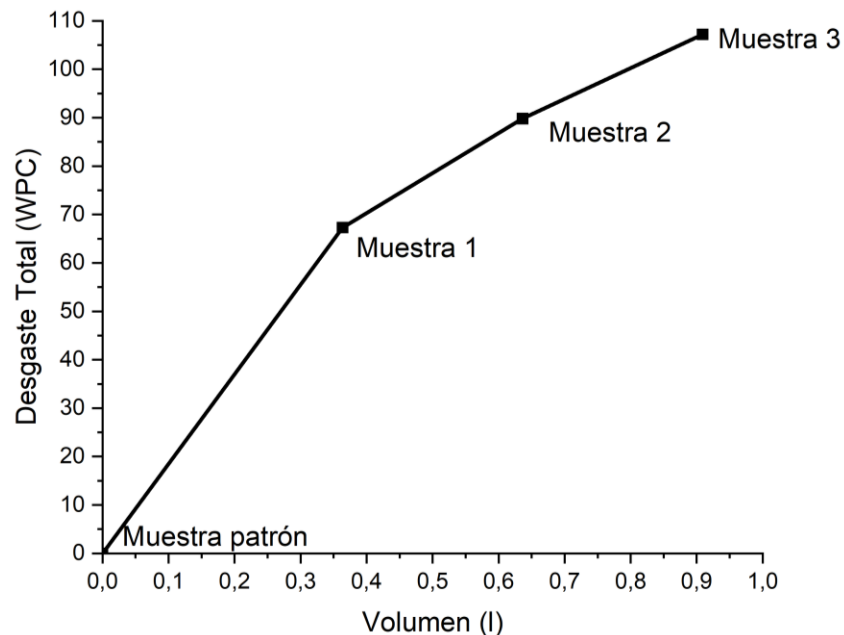
En el artículo “Effects of lubrication on gear performance: A review” (Liu & Zhu, 2019), investigaron de manera experimental las causas que generan desgaste en los sistemas por engranajes, en este estudio se concluye que existe una relación entre la temperatura y el desgaste,

mayor temperatura implica mayor desgaste. Es importante aclarar que esta premisa parte desde la lubricación mínima requerida, la cual debe garantizar que la película de aceite es suficientemente espesa para evitar el contacto entre los dientes, ya que la ausencia de lubricante implica desgaste y rozamiento grave en el sistema lo que desencadena en fallos en los engranajes.

En esta investigación se establece que mayor cantidad de aceite Mobilube HD 85W-140 en la caja de engranajes, derivó en un aumento de temperatura y también aumento el desgaste, la tendencia demuestra la relación entre el desgaste como factor de contaminación y las variables temperatura y el aumento del nivel del aceite. Estas afirmaciones ratifican el informe presentado en el artículo “Effects of lubrication on gear performance: A review”.

Figura 21

Desgaste total en función del aumento de volumen de aceite



6.4 Rastreo de elementos

En la Tabla 3 se muestra la presencia de fósforo y silicio en el aceite lubricante, la cantidad de estos dos elementos sugiere contaminación en el aceite la cual puede

responder a filtración de contaminación externa o al desgaste generado por los experimentos realizados, lo cual puede propiciar un desgaste anormal, en caso de mantener estas condiciones de operación se sugiere cambiar el aceite. En el anexo D se publica una lista con todos los elementos que hacen presencia en el aceite.

Tabla 3

Rastreo de los principales elementos en el aceite lubricante en partes por millón

Muestra	Altura(mm)	Volumen(litros)	Rastreo de elementos	
			Fosforo(ppm)	Silicio (ppm)
Patrón	0	0	444	4
Muestra 1	20	0,3636	473	44
Muestra 2	35	0,6363	466	45
Muestra 3	50	0,909	455	42

El rastreo de elementos de elementos define la limpieza del aceite mediante un conteo de las partículas contaminantes que están presentes, sin embargo, no todas son partículas que perjudican al aceite, existen también elementos que aportan como aditivos, como es el caso del grafito, es por esto que es importante diferenciar la presencia de estos elementos, así mismo es necesario identificar las partículas que contaminan para establecer la causa de la contaminación (Sasaki, 2006).

La presencia de fosforo se atribuye a los aditivos antidesgaste a base de compuestos de fósforo. Estos aditivos reaccionan con las superficies metálicas de los engranajes para formar una capa protectora que reduce el desgaste. La degradación de esta capa libera fósforo al aceite. El aceite lubricante puede contaminarse con fósforo proveniente de fuentes externas, como el polvo y la tierra las cuales pueden contener partículas de fosfato y debido al contacto entre el aceite y el entorno, puede generar la presencia de estos elementos en el aceite (Johnson et al., 2001).

El silicio aparece como la segunda fuente de contaminación más alta en el rastreo de elementos las causas por las cuales se presenta contenido de este material surge debido a su presencia en el suelo y el polvo, el mecanismo de transmisión junto con el aceite se vio levemente expuesto al ambiente, la contaminación puede deberse a esto, otra motivo que justifica la presencia de silicio es el desgaste de componentes, el banco experimental está compuesto en su mayoría de diversos tipos de acero, estos contienen silicio, el desgaste generado durante la operación puede liberar partículas de silicio (Salehiandastjerdi et al., 2019).

El fosforo puede generar mayor desgaste y corrosión en los engranajes, por su parte el silicio actúa como abrasivo, aumentando el desgaste de los engranajes y los elementos involucrados, además de reducir la vida útil del aceite.

6.5 Número ácido

El número ácido es un indicador que evalúa la calidad del aceite, ya que mediante este se hace un seguimiento de la degradación del aceite y dictaminar cuando se requiere su cambio. Un número ácido muy alto puede indicar la presencia de ácidos corrosivos, los cuales pueden conllevar a generar daños en las maquinas. En la Tabla 4 se refleja que el número ácido mantiene valores similares, la mayoría de ellos en un rango aceptable a excepción de la muestra 1, este valor es atípicamente alto.

Tabla 4

Variación del número ácido en función del aumento de altura.

Muestra	Altura(mm)	Volumen(litros)	Numero Acido (mg KOH/g)
Patrón	0	0	0,919
Muestra 1	20	0,3636	1,3
Muestra 2	35	0,6363	0,952
Muestra 3	50	0,909	0,993

En la muestra 1 se maneja un volumen de aceite de 0,3636 litros de aceite, se observó un valor de número ácido significativamente mayor que en las demás muestras. Se atribuyó a que en este muestreo se reportaron condiciones de temperatura atípicas, la temperatura es uno de los factores que acelera la degradación del aceite, a diferencia de las otras muestras, las curvas presentadas en la Figura 18 son dispersas, debido a las condiciones de la experimentación y muestreo realizadas en este ensayo, en el artículo “Changes in Lubricant Properties of Used Synthetic Oils Based on the Total Acid Number” (Wolak, 2018) , se estudian las razones por las cuales un aceite puede generar cambios anormales en su número ácido, se encontró que la temperatura de operación y las condiciones extremas de los medios de trabajo, son las variables que generan estos cambios forma súbita en el valor de número ácido.

Las condiciones de operación difíciles pueden ser un medio de contaminación que conseguiría variar el valor del número ácido, la presencia de agua o partículas extrañas a raíz de la limpieza efectuada a la caja de engranajes, pudieron generar un aumento en el número ácido.

6.6 Prueba de Karl Fischer

La prueba de Karl Fischer mide la cantidad total de agua en partes por millón en el lubricante, los valores presentados tienen en cuenta cualquier residuo de agua. A partir de los resultados que arroja esta prueba, se puede concluir si es necesario realizar un cambio de aceite, ya que una alta presencia de agua puede modificar las propiedades del aceite lubricante, perjudicando su función de evitar desgaste y rozamiento. En la Tabla 5 se registró un aumento de la humedad en la muestra 3, la cual se maneja una altura de 50 milímetros, esto se pudo generar debido a diversos factores que influyeron en el ensayo, no se observa una tendencia a medida que aumenta el nivel de aceite en los ensayos.

Tabla 5*Humedad presente en el aceite lubricante*

Muestra	Altura(mm)	Volumen(litros)	Karl Fischer (ppm)
Patrón	0	0	131,8
Muestra 1	20	0,3636	171,2
Muestra 2	35	0,6363	137,6
Muestra 3	50	0,909	306,2

Las posibles causas que explican la presencia de agua, la cual es un factor de contaminación en el aceite lubricante usado en el estudio, son el ambiente húmedo y las pérdidas de compresión causadas por fugas debido a algún fallo en los sellos utilizados. En el artículo “Effect of Water Incorporation on the Lubrication Characteristics of Synthetic Oils” (Jacques et al., 2019) se estudia las implicaciones que trae la presencia del agua en aceites lubricantes sintéticos, y como modifica sus propiedades. Además, en el artículo se ratifica el hecho de que, en condiciones de operación real la presencia de humedad es difícil de evitar ya que existen variables que aportan a su presencia en el aceite como las posibles fugas, limpieza de los recipientes donde se deposita el aceite, la humedad relativa, estas contribuyen al aumento de la fricción y el desgaste en el sistema, aunque con base en pruebas realizadas se concluyó que al añadir pequeñas cantidades de agua resulta casi insignificante, como es el caso de la muestra 1 y 2.

Los resultados obtenidos cumpliendo con la estandarización ASTM e ISO, para los procedimientos utilizados en el estudio, muestran que la temperatura del aceite aumenta a medida que avanzó el tiempo de funcionamiento y a medida que incrementó el nivel de aceite. La viscosidad no presenta cambios significativos, pero se incrementa mínimamente cuando se agrega más aceite. La técnica de ferrografía de lectura directa reveló un mayor desgaste en el

sistema con más cantidad de aceite. Se detectó la presencia de fósforo y silicio en el aceite, lo que sugiere contaminación externa o desgaste interno. El número de acidez se mantuvo en valores similares en todas las pruebas. La prueba de Karl Fischer demostró un aumento de la humedad en la muestra con mayor nivel de aceite.

En general, se puede concluir que el aceite Mobilube HD 85W-140 es adecuado para su uso en la caja de engranajes analizada. Sin embargo, se recomienda realizar cambios de aceite cada 50 horas de trabajo para evitar la degradación del aceite y la formación de contaminantes. Además, se sugiere controlar el nivel de aceite para evitar un exceso que cause problemas.

7. Conclusiones

La presente tesis investigó la degradación de aceites lubricantes en mecanismos de transmisión por engranajes con lubricación por salpicadura. Se evaluó el impacto de variables con relación a la cantidad de aceite utilizado, en la vida útil del aceite y el desgaste de los engranajes.

Las conclusiones de este estudio tienen relevancia en la industria mecánica, proporcionando información sobre las propiedades fisicoquímicas del aceite lubricante, las fuentes de contaminación que se presentaron y la normativa implementada, a continuación, se tratará en detalle las conclusiones pertinentes del estudio realizado.

Los resultados de la investigación permiten concluir que los principales factores de contaminación y degradación del aceite en el mecanismo de transmisión por engranajes con lubricación por salpicadura son las partículas de fosforo y silicio, la presencia de partículas de desgaste y los sedimentos de agua.

Las partículas de fosforo y silicio destacaron en el rastreo de elementos aplicado al aceite, ya que estas advierten contaminación debido a la alta cantidad registrada, su presencia indica que

se existió contaminación externa, como el polvo o la tierra, conjuntamente también se puede atribuir a los aditivos del aceite y al acero del cual están hechos los ejes, la caja y los engranajes. El desgaste encontrado en el aceite es una fuente de contaminación, este aumentó a medida que se añadía volumen de aceite al experimento. Con base en esta información se concluye que el lubricante se encontraba contaminado, condición que puede conducir eventualmente a la generación de un desgaste anormal. Adicionalmente los sedimentos de agua encontrados mediante la prueba de Karl Fischer reflejan contaminación en el aceite modificando sus propiedades fisicoquímicas, empeorando su rendimiento en las pruebas, este hallazgo se puede justificar debido a la humedad presente en el ambiente la cual entró en contacto con el aceite, incidiendo en este debido a esto se puede generar óxido y corrosión en los componentes afectando su funcionamiento. La presencia de contaminantes perjudica el trabajo del aceite lubricante, para evitar el contacto entre los engranajes y la fricción entre ellos, generando de esta forma mayor desgaste, ocasionando posibles fallos inesperados y paradas de la maquinaria, se recomienda monitorear al aceite y tomar medidas preventivas contra la humedad y la contaminación del entorno, adicional a eso, se debe establecer un nivel intermedio como el utilizado en este estudio, para minimizar la presencia de agentes externos y permitir un correcto funcionamiento entre los engranajes.

Con base en la metodología y experimentación trazada, se puede inferir que la relación de la temperatura de operación con los valores que maneja la viscosidad, es buena debido a que no se presentaron cambios bruscos en la temperatura, se mantuvo en rangos aceptables de operación y la viscosidad se mantuvo muy similar en el caso de los tres niveles de aceite. Los valores de viscosidad fueron muy aproximados a la muestra patrón del aceite, esto indica que en este experimento la temperatura no influyó en la viscosidad del aceite ya que no se expuso a

temperaturas muy altas durante mucho tiempo, además las propiedades del aceite ayudaron a mantener una estabilidad en la temperatura de operación del sistema. En este caso el cambio de las alturas del aceite usado para lubricar, no demostró diferencias, desde el punto de vista de la viscosidad cualquiera de los tres niveles es apropiado para usarse en el experimento.

Los resultados obtenidos del número ácido se mantuvieron en los rangos aceptables, a excepción de la muestra 3, estos valores fueron cercanos al de la muestra patrón, reflejando la buena relación que se manejó en el experimento con respecto a la temperatura, la cual es la variable principal que afecta al número ácido. Sin embargo, en la muestra 1, se registró un valor distante a lo esperado, esto fue ocasionado por la contaminación, la humedad y debido a la dispersión en los datos de la temperatura registrados para esta muestra, se recomienda en futuros ensayos manejar con precaución estos factores para evitar estas alteraciones en los resultados.

Los datos registrados en el monitoreo de temperatura ratifican la premisa de que existe una relación entre el aumento de volumen de aceite usado para lubricar los engranajes y el aumento de temperatura, se observa entonces una tendencia entre ellos y permite definir cual altura es más ideal según el lubricante usado, en este caso el Mobilube HD 85W-140 registra altas temperaturas en el nivel de 50 milímetros, un desgaste alto y contaminación, por ende no es recomendado trabajar en este nivel, debido a la posibilidad de que modifique la viscosidad del aceite a tal punto de generar roces y contacto entre las superficies de los dientes de los engranajes. En el caso del nivel de 20 milímetros de altura se observó de manera visual poca fluidez del aceite entre los engranajes y se generaron sonidos derivados del contacto entre los engranajes, debido a que no se generó una película lubricante lo suficientemente grueso para suavizar el contacto entre ellos. El nivel de 35 milímetros de altura permitió un trabajo adecuado de los engranajes, manejando temperaturas dentro de los rangos aceptables y con un desgaste

adecuado, por esto se recomienda en futuras aplicaciones utilizar una inmersión intermedia, similar al valor de 35 mm de altura como el usado en este estudio, de esta manera se prolonga la vida útil del aceite sin perjudicar las piezas de la maquinaria.

Se concluye que el nivel 2, el cual posee una altura de 35 mm desde la base de la caja de engranajes y utiliza un volumen de 0,6363 litros, demuestra ser el de mejor funcionamiento. Su implementación alarga la vida útil del aceite y la maquinaria sin perjudicar su rendimiento. Esta afirmación se sustenta en las curvas de temperatura, que presentan mínima dispersión, indicando un trabajo adecuado de la máquina con este nivel de aceite. En consecuencia, las variables sensibles a la temperatura, como la viscosidad o el número ácido, se mantuvieron dentro de rangos aceptables con valores muy similares a los de la muestra virgen. Adicionalmente, en este nivel no se observó una contaminación alta, lo que podría sugerir un menor desgaste de las piezas y un correcto seguimiento de los procedimientos según las normas. Por último, la observación directa del experimento evidenció un funcionamiento adecuado, sin ruidos adicionales ni una agitación excesiva del aceite, a diferencia de lo observado en la muestra 3.

Referencias Bibliográficas

- Albarracin, P. (2008). TRIBOLOGÍA Y LUBRICACIÓN Dictado a: Servicio Nacional de Aprendizaje-SENA. www.pedroalbarracinaguillon.com;
- American Petroleum Institute. (2023). *Engine Oil Licensing and Certification System*.
- ASTM INTERNATIONAL. (2018a). *Standard Guide for Sample Chain-of-Custody Procedures 1*. <https://doi.org/10.1520/D4840-99R18E01>
- ASTM INTERNATIONAL. (2018b). *Standard Test Method for Multielement Determination of Used and Unused Lubricating Oils and Base Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES) 1*. <https://doi.org/10.1520/D5185-18>
- ASTM INTERNATIONAL. (2019a). *Designation: D664 – 18'218'2 Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration 1*. <https://doi.org/10.1520/D0664-18E02>
- ASTM INTERNATIONAL. (2019b). *Designation: D5854 – 19a Mixing and Handling of Liquid Samples of Petroleum and Petroleum Products 1*. <https://doi.org/10.1520/D5854-19A>
- ASTM INTERNATIONAL. (2020). *Standard Test Method for Determination of Water in Petroleum Products, Lubricating Oils, and Additives by Coulometric Karl Fischer Titration 1*. <https://doi.org/10.1520/D6304-20>
- ASTM INTERNATIONAL. (2021). *Standard Practice for Microscopic Characterization of Particles from In-Service Lubricants by Analytical Ferrography 1*. <https://doi.org/10.1520/D7690-11R21>

- ASTM INTERNATIONAL. (2022a). *Designation: D4057 – 22 Standard Practice for Manual Sampling of Petroleum and Petroleum Products 1*.
<https://doi.org/10.1520/D4057-22>
- ASTM INTERNATIONAL. (2022b). *Standard Test Method for Determination of Wear Metals and Contaminants in Used Lubricating Oils or Used Hydraulic Fluids by Rotating Disc Electrode Atomic Emission Spectrometry 1*.
<https://doi.org/10.1520/D6595-22>
- ASTM INTERNATIONAL. (2023a). *D445 Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)*. <https://www.astm.org/standards/d445>
- ASTM INTERNATIONAL. (2023b). *Standard Practice for Condition Monitoring of In-Service Lubricants by Trend Analysis Using Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometry 1*. <https://doi.org/10.1520/E2412-23A>
- Becerra, D. (2014). *ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE UN ACEITE LUBRICANTE PARA ENGRANAJES*.
- Budynas, R. G., & Keith Nisbett, J. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 9na Edición*.
- Castañeda, D., & Castillo, G. (1990). *Principios de lubricación*.
- Dudley, D. (1973). *Manual de Engranajes: diseño, Manufactura y Engranajes - Darle*
W. Dudley - Google Libros.
https://books.google.com.co/books/about/Manual_de_Engranajes.html?id=wWITMwEACAAJ&redir_esc=y

- Fox, M. F., & Picken, D. J. (1991). *Acid-base determination of lubricating oils*.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-679X\(91\)90003-R](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-679X(91)90003-R)
- Hutchings, I. M., & Shipway, P. (2017). *Tribology : friction and wear of engineering materials*.
- International Organization for Standardization. (2021). *Hydraulic fluid power-Fluids-Method for coding the level of contamination by solid particles Transmissions hydrauliques-Fluides-Méthode de codification du niveau de pollution particulaire solide COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT*.
- Jacques, K., Joy, T., Shirani, A., & Berman, D. (2019). Effect of Water Incorporation on the Lubrication Characteristics of Synthetic Oils. *Tribology Letters*, 67(4).
<https://doi.org/10.1007/s11249-019-1217-0>
- Johnson, M. D., Korcek, S., Jensen, R. K., Gangopadhyay, A. K., Soltis, E. A., & Antonio, S. (2001). *Laboratory Assessment of the Oxidation and Wear Performance Capabilities of Low Phosphorus Engine Oils International Fall Fuels and Lubricants Meeting and Exposition*.
- Kettleborough, F. (1994). A. Shamim *Tribological Performance Evaluation of Oil Mist Lubrication*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.2906447>
- Lentini, L., Moradi, M., & Colombo, F. (2018). A historical review of gas lubrication: From reynolds to active compensations. In *Tribology in Industry* (Vol. 40, Issue 2, pp. 165–182). Faculty of Engineering, University of Kragujevac.
<https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.02.01>
- Liu, H., & Zhu, C. (2019). *Effects of lubrication on gear performance: A review* (Vol. 10).

- Lugt, P. M. (2009). A review on grease lubrication in rolling bearings. In *Tribology Transactions* (Vol. 52, Issue 4, pp. 470–480).
<https://doi.org/10.1080/10402000802687940>
- Menezes, P. L., Ingole, S. P., Nosonovsky, M., Kailas, S. V., & Lovell, M. R. (2013). Tribology for scientists and engineers: From basics to advanced concepts. *Tribology for Scientists and Engineers: From Basics to Advanced Concepts*, 9781461419457, 1–948. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1945-7/COVER>
- Montoro, L. (2005). *CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO Y MEJORA DE TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE PARTÍCULAS METÁLICAS Y CONTAMINANTES EN ACEITES LUBRICANTES USADOS*.
- Mora, Alberto. (2009). *Mantenimiento : planeación, ejecución y control*. Alfaomega.
- Navarro, L., & Pastor, A. (1997). *Gestión_integral_de_mantenimiento*.
- Neurouth, A., Changenet, C., Ville, F., Octrue, M., & Tinguy, E. (2017). Experimental Investigations to Use Splash Lubrication for High-Speed Gears. *Journal of Tribology*, 139(6). <https://doi.org/10.1115/1.4036447>
- Pirro, D. M., Wessol, A. A., & Wills, J. George. (2001). *Lubrication fundamentals*. Marcel Dekker.
- Salehiandastjerdi, M., Esehaghbeygi, A., Razavi, J., & Ghaziasgar, H. S. (2019). Effect of calcite and silica content on tribological performance of engine oil lubricants. *Tribology Online*, 14(1), 1–7. <https://doi.org/10.2474/trol.14.1>
- Sasaki, A. (2006). Contaminants in used oils and their problems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 220(5), 471–478. <https://doi.org/10.1243/135065005X33955>

- Scharf, T. W., & Prasad, S. V. (2013). Solid lubricants: A review. In *Journal of Materials Science* (Vol. 48, Issue 2, pp. 511–531).
<https://doi.org/10.1007/s10853-012-7038-2>
- Terpel. (2021). *Mobilube HD 85W-140*.
- Tormos, B. (2013). Engine Condition Monitoring Based on Oil Analysis. In Y.-W. Wang Q. Jane and Chung (Ed.), *Encyclopedia of Tribology* (pp. 970–977). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_1149
- Townsend, D. P., Zaretsky, E. V., & Scibbe Goodyear, H. W. (1989). *Lubricant and Additive Effects on Spur Gear Fatigue Life*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsl.3000060202>
- Verdier, S., Coutinho, J. A. P., Silva, A. M. S., Alkilde, O. F., & Hansen, J. A. (2009). A critical approach to viscosity index. *Fuel*, 88(11), 2199–2206.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.05.016>
- Wolak, A. (2018). Changes in Lubricant Properties of Used Synthetic Oils Based on the Total Acid Number. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 51(3–4), 65–72. <https://doi.org/10.1177/0020294018770916>

Apéndices

Apéndice A. Código de lectura de temperatura y tiempo.

```
#include <Wire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Time.h>
#include <TimeLib.h>

#define ONE_WIRE_BUS 8

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);

DallasTemperature sensors(&oneWire);

float Celsius = 0;

String hora = "";

void setup() {
  sensors.begin();
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  sensors.requestTemperatures();

  Celsius = sensors.getTempCByIndex(0);

  String horaStr = String(hour());
  String minStr = String(minute());
  String secStr = String(second());

  hora = horaStr + ":" + minStr + ":" + secStr;

  Serial.print("Tiempo: ");
  Serial.print(hora);

  Serial.print(" ");
```

```

Serial.print("Temperatura: ");
Serial.print(Celsius);
Serial.print(" °C");

Serial.println();

delay(600000);
}
    
```

Apéndice B. Formato de identificacion de variables.

Asset Name (Nombre del activo)	Asset Type (Tipo de activo)	Module Type (Tipo de equipo)	Component Type (Componente del equipo)
Muestra 1	Gearbox-General	Transmission	Gear
Muestra 2	Gearbox-General	Transmission	Gear
Muestra 3	Gearbox-General	Transmission	Gear
Muestra Patron	Gearbox-General	Virgin Oil Baseline Reference	Gear

Criticality (Crticidad)	Operating Environment (Ambiente de operación)	Sampling Method (Método de muestreo)	Operating Schedule (Tiempo de operación)	Reservoir Capacity (Capacidad del reservorio)	Filtration Method (Método de filtración)
No Selection	Controlled	Vacuum Pump	Intermittent	0-1 Gallon	No Selection
No Selection	Controlled	Vacuum Pump	Intermittent	0-1 Gallon	No Selection
No Selection	Controlled	Vacuum Pump	Intermittent	0-1 Gallon	No Selection
No Selection	Controlled	Vacuum Pump	Intermittent	0-1 Gallon	No Selection

Breather Setup (Tipo de respirador)	Equipment Manufacturer (Fabricante del equipo)	Make/Model (Modelo)	Lubricant Manufacturer (Fabricante del lubricante)	Lubricant Product Name (Nombre del lubricante)
No Selection	UIS	-	Mobil	Mobilube HD SAE 85W-140
No Selection	UIS	-	Mobil	Mobilube HD SAE 85W-140
No Selection	UIS	-	Mobil	Mobilube HD SAE 85W-140
No Selection	UIS	-	Mobil	

Visual Inspection (Inspección visual)	Sampling Frequency (Frecuencia de muestreo)	Operating Temp (Temp. de operación)	Coolant Type (Tipo de refrigerante)	Sampling Location (Ubicación del punto de muestreo)	Gear Type (Tipo de engranaje)	Gear Material (Material del engranaje)
No Selection	As Needed	0-100 °F (0-37 °C)	None	No Selection	Spur	Cast Iron/Hardend Steel
No Selection	As Needed	101-150 °F (38-66 °C)	None	No Selection	Spur	Cast Iron/Hardend Steel
No Selection	As Needed	101-150 °F (38-66 °C)	None	No Selection	Spur	Cast Iron/Hardend Steel
No Selection	As Needed	0-100 °F (0-37 °C)	None	No Selection	Spur	Cast Iron/Hardend Steel

Bearing Type (Tipo de rodamiento)	Bearing Material (Material del rodamiento)	Seal Type (Tipo de sello)	Filter Type (Tipo de filtro)	Size Filtered (Tamaño de filtración)	Filter Beta Rating (Relación de filtración Beta)
None	No Selection	Packing Seal	No Selection	No Selection	
None	No Selection	Packing Seal	No Selection	No Selection	
None	No Selection	Packing Seal	No Selection	No Selection	
None	No Selection	Packing Seal	No Selection	No Selection	

CUSTOMER INFORMATION	
Company Name	
Company Address	
Industry	
Contact Name	
Job Title	
Primary Contact Number	
Email Address	

Apéndice C. Ficha tecnica del aceite.

Mobilube HD Plus 80W-90 85W-140

Page 1 of 3



Mobilube HD Plus 80W-90 85W-140

Mobil Commercial-Vehicle-Lube, United States

Extra High Performance Commercial Gear Lubricants

Product Description

Mobilube HD Plus 80W-90 and 85W-140 are extra high performance commercial gear lubricants formulated from select base oils and an advanced additive system. These lubricants are engineered for performance in heavy-duty commercial transmissions, axles, and final drives where extreme pressures and shock loading are expected. They provide excellent chemical and thermal stability at elevated bulk oil temperatures, good performance at low temperatures, and have demonstrated good rust protection resulting from water contamination and wet conditions. They are recommended by ExxonMobil for applications where API GL-5 and MT-1 service is required. Mobilube HD Plus 80W-90 and 85W-140 share common formulations with Esso Gear Oil GX 80W-90 and 85W-140.

Features and Benefits

Today's heavy equipment applications place higher performance demands on drive train lubricants. Higher speeds, higher torque, and heavier loads require improved formulations to maximise equipment life and optimise operating costs. Longer service intervals place additional demands on the gear lubricant. Mobilube HD Plus gear lubricants are engineered to meet these challenges. The key benefits include:

Features	Advantages and Potential Benefits
Excellent thermal stability and resistance to high temperature oxidation	Extended gear and bearing life due to minimal deposits and longer seal life
Good protection against low speed/high torque wear and against high speed scoring	Increased load carrying capability and reduced operating costs
Excellent rust, staining, and corrosion protection	Reduced wear and longer component life
Effective low temperature lubrication	Reduced wear and ease of start-up
Wide multipurpose capability	Reduced number of gear lubricants to simplify inventory and minimize misapplication
Good resistance to foaming	Maintains film strength for effective lubrication
Compatible with typical automotive seals and gaskets	Minimum leakage and reduced contamination

Applications

Recommended by ExxonMobil for use in:

- Heavy-duty manual transmissions, axles, and final drives requiring API GL-5 and MT-1 level performance
- On-highway light and heavy-duty trucks, busses, vans, and cars
- Off-highway industries including: construction, mining, quarrying, and agriculture
- Other heavy-duty industrial and automotive applications involving hypoid and other gears operating under conditions where high speed/shock load, high speed/low torque, and/or low speed/high torque conditions prevail
 - Initial fill, top-off, and refill of enclosed commercial gearing in manual or semiautomatic transmissions where gear lubricants are recommended including drive axles and final drives
- Not recommended for applications requiring API GL-4 Level performance
- Not intended for transmissions for which engine oil or automatic transmission fluids are recommended

20.11.2023

Mobilube HD Plus 80W-90 85W-140

Page 2 of 3

Specifications and Approvals

This product is of quality level, but not approved:	80W-90	85W-140
MIL (US) MIL-PRF-2105E	X	X

This product meets or exceeds the requirements of the following industry specification:	80W-90	85W-140
API GL-5	X	X
API MT-1	X	X
Scania STO 1:0	X	X

Properties and Specifications

Property	80W-90	85W-140
Grade	SAE 80W-90	SAE 85W-140
Flash Point, Cleveland Open Cup, °C, ASTM D92	210	230
Kinematic Viscosity @ 100 C, mm ² /s, ASTM D445	14.5	25.4
Kinematic Viscosity @ 40 C, mm ² /s, ASTM D445	139	333
Pour Point, °C, ASTM D97	-27	-18
Viscosity Index, ASTM D2270	103	99

Health and Safety

Health and Safety recommendations for this product can be found on the Material Safety Data Sheet (MSDS) @ <http://www.msds.exxonmobil.com/psims/psims.aspx>

All trademarks used herein are trademarks or registered trademarks of Exxon Mobil Corporation or one of its subsidiaries unless indicated otherwise.

09-2023

Exxon Mobil Corporation

22777 Springwoods Village Parkway

Spring TX 77389

1-800-ASK MOBIL (275-6624)

Typical Properties are typical of those obtained with normal production tolerance and do not constitute a specification. Variations that do not affect product performance are to be expected during normal manufacture and at different blending locations. The information contained herein is subject to change without notice. All products may not be available locally. For more information, contact your local ExxonMobil contact or visit www.exxonmobil.com

ExxonMobil is comprised of numerous affiliates and subsidiaries, many with names that include Esso, Mobil, or ExxonMobil. Nothing in this document is intended to override or supersede the corporate separateness of local entities. Responsibility for local action and accountability remains with the local ExxonMobil-affiliate entities.

20.11.2023

Apéndice D. Reporte de condición del aceite.



SUMMARY REPORT

Sealco S.A.

Jhon Rueda

REPORT DATE: 1/4/2024



LUBRICOLGY

Summary Report

Sealco S.A.

Jhon Rueda

REPORT DATE: 1/4/2024

SPID

Sample Description/Recommendations

Nuevo - Mobilube HD Plus 85W-140

381762 12/06/2023

Nuevo - Mobilube HD Plus 85W-140

Recommended Action:

Serious

• Based on the low Viscosity, this fluid should not be utilized in any of the equipment that requires Mobilube HD Plus 85W-140.

Data of Concern:

• The Viscosity test has been double checked/verified and the reading at 40°C is low and below 15% of the fluid's specification. Utilizing this fluid will result in the Viscosity immediately being low in the piece of equipment it is place in. This can increase the possibility of metal to metal contact, cause leaking seals, and increase oil consumption.

Muestra 1 Gearbox

381767 11/17/2023

Muestra 1 Gearbox

Recommended Action:

Caution

• Considering the very small reservoir of this unit please inform your Trico Lubrication Program Consultant, Aaron Hyatt at 262-691-6302, if the oil was changed while this sample was being taken. If this is not the case then please proceed with a complete drain, flush, and refill.

Data of Concern:

• The Particle Count readings in the >4 and >6 micron ranges are high for this equipment. This is typically an indication of a contaminated lubricant condition which can eventually lead to the generation of abnormal wear.
• The Silicon content is high and further suggests contamination.

Muestra 2 Gearbox

381768 11/27/2023

Muestra 2 Gearbox

Recommended Action:

Caution

• Considering the very small reservoir of this unit please inform your Trico Lubrication Program Consultant, Aaron Hyatt at 262-691-6302, if the oil was changed while this sample was being taken. If this is not the case then please proceed with a complete drain, flush, and refill.

Data of Concern:

• The Particle Count reading in the >6 micron range is high for this equipment. This is typically an indication of a contaminated lubricant condition which can eventually lead to the generation of abnormal wear.
• The Silicon content is high and further suggests contamination.

Muestra 3 Gearbox

381769 12/06/2023

Muestra 3 Gearbox

Recommended Action:

Caution



Summary Report

Sealco S.A.

Jhon Rueda

REPORT DATE: 1/4/2024

SPID

Sample Description/Recommendations

• Considering the very small reservoir of this unit please inform your Trico Lubrication Program Consultant, Aaron Hyatt at 262-691-6302, if the oil was changed while this sample was being taken. If this is not the case then please proceed with a complete drain, flush, and refill.

Data of Concern:

• The Silicon content is high for this equipment. This is typically an indication of a contaminated lubricant condition which can eventually lead to the generation of abnormal wear.



CONDITION REPORT

Sealco S.A.

Jhon Rueda

ACTION REQUIRED



Reference Not Suitable

DESC/NAME: Nuevo - Mobilube HD Plus 85W-140
ID/NUMBER: Nuevo - Mobilube HD Plus 85W-140
LUBRICANT: Mobil Mobilube HD Plus 85W-140
RESERV CAP:
SPID #: 381762

SAMPLE DATE: 12/06/2023
TEST SUITE: HREF
CNTL#: 5439564
ASSET: Storage Area

Data of Concern

• The Viscosity test has been double checked/verified and the reading at 40°C is low and below 15% of the fluid's specification. Utilizing this fluid will result in the Viscosity immediately being low in the piece of equipment it is place in. This can increase the possibility of metal to metal contact, cause leaking seals, and in crease oil consumption.

AREAS OF CONCERN



Viscosity

Actions Needed

• Based on the low Viscosity, this fluid should not be utilized in any of the equipment that requires Mobilube HD Plus 85W-140.

Label Info

Machine Hrs: Not Provided
WO#:
Eq. Running: N

Lube Hrs: Not Provided
Sample Taken By:
Oil Change w/ Sample: N

REPORT RATINGS:

Sample Date			12/06/2023
Ratings			Serious

LIMITS						
Reference Transfer	Reference Storage	Reference Arrival	Upper Alert	Upper Alarm	Lower Alert	Lower Alarm

VISCOSITY (ASTM D445)

Viscosity 40°C (cSt)			376.30			366.3	382.95	299.7	283.05
Viscosity 100°C (cSt)			27.24			27.94	29.21	22.86	21.59

PHYSICAL/CHEMICAL PROPERTIES:

Acid Number (ASTM D664)			
AM (mg KOH/g)			0.919
			1.986
FT-IR (ASTM E2412)			
Oxidation (abs)			3
Nitration (abs)			3
Sulfur (FTIR) (abs)			17
Water (FTIR) (abs)			9
Glycol (FTIR) (abs)			1
Anti-Wear (abs)			12
			1000
Karl Fischer (ASTM D6304)			
Karl Fischer (ppm)			131.8
Karl Fischer Pct (%)			0.013
			0.1
Viscosity Index (Viscosity)			
Viscosity Index			98
Visual/Crackle			
Visual Clarity			Normal
Particulate			None

REC'D DATE: 12/26/2023

REPORT DATE: 01/03/2024

ANALYST: Loede

Page: 1

(**) - Test performed by a Trico Corporation contracted ISO/IEC 17025:2017 Accredited Laboratory

Particle Size				None						
Crackle Water				No						
Visible Water				No						

PARTICULATES:

FT-IR (ASTM E2412)										
Soot (abs)				1						
Particle Count (ISO 4406)										
>4um (p/mL)				2701						
>6um (p/mL)				466						
>14um (p/mL)				120						
>21um (p/mL)				4						
>38um (p/mL)				0						
>70um (p/mL)				0						
ISO PC				19/16/14				24/21/19		

TRACE ELEMENTS by ICP (ASTM 5185)

Equipment	Iron (ppm)			0			15	25		
	Chromium (ppm)			0			8	15		
	Aluminium (ppm)			0			8	15		
	Copper (ppm)			0			15	25		
	Lead (ppm)			0			10	15		
	Tin (ppm)			0			20	30		
	Silver (ppm)			0			20	30		
	Nickel (ppm)			0			20	30		
Contaminants/Additives	Silicon (ppm)			4			30			
	Sodium (ppm)			0			80			
	Potassium (ppm)			0						
	Boron (ppm)			7						
	Molybdenum (ppm)			0						
	Magnesium (ppm)			5						
	Calcium (ppm)			0						
	Barium (ppm)			0						
Other	Phosphorus (ppm)			444					52	
	Zinc (ppm)			3						
	Vanadium (ppm)			0						
	Titanium (ppm)			0						

REC'D DATE: 12/26/2023

REPORT DATE: 01/03/2024

ANALYST: Loede

Page: 2

(**) - Test performed by a Trico Corporation contracted ISO/IEC 17025:2017 Accredited Laboratory



LUBRICOLOGY



CONDITION REPORT

Sealco S.A.

Jhon Rueda

Action Recommended



Equipment Info Needed



Change Oil

DESC/NAME: Muestra 1 Gearbox
ID/NUMBER: Muestra 1 Gearbox
LUBRICANT: Mobil Mobilube HD Plus 85W-140
RESERV CAP: 0-1 Gallon
SPID #: 381767

SAMPLE DATE: 11/17/2023
TEST SUITE: H002T
CNTL#: 5439565
ASSET: Gearbox - General

Data of Concern

- The Particle Count readings in the >4 and >6 micron ranges are high for this equipment. This is typically an indication of a contaminated lubricant condition which can eventually lead to the generation of abnormal wear.
- The Silicon content is high and further suggests contamination.

AREAS OF CONCERN



Particle



Silicon

Actions Needed

- Considering the very small reservoir of this unit please inform your Trico Lubrication Program Consultant, Aaron Hyatt at 262-691-6302, if the oil was changed while this sample was being taken. If this is not the case then please proceed with a complete drain, flush, and refill.

Label Info

Machine Hrs: Not Provided
WO#:
Eq. Running: N

Lube Hrs: Not Provided
Sample Taken By:
Oil Change w/ Sample: N

REPORT RATINGS:

Sample Date	11/17/2023
Ratings	Caution

	12/06/2023	LIMITS				
Reference Transfer	Reference Storage	Reference Arrival	Upper Alert	Upper Alarm	Lower Alert	Lower Alarm

VISCOSITY (ASTM D445)

Viscosity 40°C (cSt)	374.60
----------------------	--------

	333	399.6	482.85	283.05	266.4
--	-----	-------	--------	--------	-------

PHYSICAL/CHEMICAL PROPERTIES:

Acid Number (ASTM D664)							
AN (mg KOH/g)	1.300	0.919	2.919				
FT-IR (ASTM E2412)							
Oxidation (abs)	3	3	18				
Nitration (abs)	4	3					
Sulfur (FTIR) (abs)	18	17					
Water (FTIR) (abs)	10	9					
Glycol (FTIR) (abs)	1	1					
Anti-Wear (abs)	12	12					
Karl Fischer (ASTM D6304)							
Karl Fischer (ppm)	171.2	131.8	1000	10000			
Karl Fischer Pct (%)	0.017	0.013	0.1	1			
Visual/Crackle							
Visual Clarity	Normal	Normal					
Particulate	None	None					
Particle Size	None	None					
Crackle Water	No	No					
Visible Water	No	No					

REC'D DATE: 12/26/2023

REPORT DATE: 01/03/2024

ANALYST: Loede

Page: 1

(**) - Test performed by a Trico Corporation contracted ISO/IEC 17025:2017 Accredited Laboratory

PARTICULATES:

Direct Read Ferrography									
Large (>5um)			52.5						
Small (<5um)			14.8						
Total Wear (WPC)			67.3			500	750		
FT-IR (ASTM E2412)									
Soot (abs)			1		1				
Particle Count (ISO 4406)									
>4um (p/mL)			125226		2701				
>6um (p/mL)			12320		466				
>14um (p/mL)			367		120				
>21um (p/mL)			80		4				
>38um (p/mL)			0		0				
>70um (p/mL)			0		0				
ISO PC			24/21/16		19/16/14		26/23/21		

TRACE ELEMENTS by ICP (ASTM 5185)

Equipment	Iron (ppm)		2		0		150	300	
	Chromium (ppm)		0		0		10	15	
	Aluminum (ppm)		0		0		20	30	
	Copper (ppm)		0		0		50	80	
	Lead (ppm)		0		0		50	80	
	Tin (ppm)		1		0		50	80	
	Silver (ppm)		0		0		50	80	
	Nickel (ppm)		0		0		50	80	
Contaminants/Additives	Silicon (ppm)		44		4		64		
	Sodium (ppm)		0		0		80		
	Potassium (ppm)		1		0				
	Boron (ppm)		4		7				
	Molybdenum (ppm)		0		0				
	Magnesium (ppm)		6		5				
	Calcium (ppm)		0		0				
	Barium (ppm)		0		0				
	Phosphorus (ppm)		473		444				
	Zinc (ppm)		5		3				
Other	Vanadium (ppm)		0		0				
	Titanium (ppm)		0		0				

REC'D DATE: 12/26/2023

REPORT DATE: 01/03/2024

ANALYST: Loede

Page: 2

(**) - Test performed by a Trico Corporation contracted ISO/IEC 17025:2017 Accredited Laboratory



LUBRICOLOGY



CONDITION REPORT

Sealco S.A.

Jhon Rueda

Action Recommended



Equipment Info Needed



Change Oil

DESC/NAME: Muestra 2 Gearbox
ID/NUMBER: Muestra 2 Gearbox
LUBRICANT: Mobil Mobilube HD Plus 85W-140
RESERV CAP: 0-1 Gallon
SPID #: 381768

SAMPLE DATE: 11/27/2023
TEST SUITE: H002T
CNTL#: 5439566
ASSET: Gearbox - General

Data of Concern

- The Particle Count reading in the > 6 micron range is high for this equipment. This is typically an indication of a contaminated lubricant condition which can eventually lead to the generation of abnormal wear.
- The Silicon content is high and further suggests contamination.

AREAS OF CONCERN



Particle



Silicon

Actions Needed

- Considering the very small reservoir of this unit please inform your Trico Lubrication Program Consultant, Aaron Hyatt at 262-691-6302, if the oil was changed while this sample was being taken. If this is not the case then please proceed with a complete drain, flush, and refill.

Label Info

Machine Hrs: Not Provided
WO#:
Eq. Running: N

Lube Hrs: Not Provided
Sample Taken By:
Oil Change w/ Sample: N

REPORT RATINGS:

Sample Date	11/27/2023
Ratings	Caution

	12/06/2023	LIMITS				
Reference Transfer	Reference Storage	Reference Arrival	Upper Alert	Upper Alarm	Lower Alert	Lower Alarm

VISCOSITY (ASTM D445)

Viscosity 40°C (cSt)	375.10
----------------------	--------

	333	399.6	482.85	283.05	266.4
--	-----	-------	--------	--------	-------

PHYSICAL/CHEMICAL PROPERTIES:

Acid Number (ASTM D664)							
AN (mg KOH/g)	0.952	0.919	2.919				
FT-IR (ASTM E2412)							
Oxidation (abs)	3	3	18				
Nitration (abs)	3	3					
Sulfur (FTIR) (abs)	17	17					
Water (FTIR) (abs)	9	9					
Glycol (FTIR) (abs)	1	1					
Anti-Wear (abs)	12	12					
Karl Fischer (ASTM D6304)							
Karl Fischer (ppm)	137.6	131.8	1000	10000			
Karl Fischer Pct (%)	0.014	0.013	0.1	1			
Visual/Crackle							
Visual Clarity	Normal	Normal					
Particulate	None	None					
Particle Size	None	None					
Crackle Water	No	No					
Visible Water	No	No					

REC'D DATE: 12/26/2023

REPORT DATE: 01/03/2024

ANALYST: Loede

Page: 1

(**) - Test performed by a Trico Corporation contracted ISO/IEC 17025:2017 Accredited Laboratory

PARTICULATES:

Direct Read Ferrography									
Large (>5um)			59.5						
Small (<5um)			30.3						
Total Wear (WPC)			89.8			500	750		
FT-IR (ASTM E2412)									
Soot (abs)			1		1				
Particle Count (ISO 4406)									
>4um (p/mL)			60798		2701				
>6um (p/mL)			16903		466				
>14um (p/mL)			426		120				
>21um (p/mL)			60		4				
>38um (p/mL)			0		0				
>70um (p/mL)			0		0				
ISO PC			23/21/16		19/16/14		26/23/21		

TRACE ELEMENTS by ICP (ASTM 5185)

Equipment	Iron (ppm)		7		0		150	300	
	Chromium (ppm)		0		0		10	15	
	Aluminum (ppm)		0		0		20	30	
	Copper (ppm)		0		0		50	80	
	Lead (ppm)		0		0		50	80	
	Tin (ppm)		1		0		50	80	
	Silver (ppm)		0		0		50	80	
	Nickel (ppm)		0		0		50	80	
Contaminants/Additives	Silicon (ppm)		45		4		64		
	Sodium (ppm)		0		0		80		
	Potassium (ppm)		0		0				
	Boron (ppm)		3		7				
	Molybdenum (ppm)		0		0				
	Magnesium (ppm)		5		5				
	Calcium (ppm)		0		0				
	Barium (ppm)		0		0				
	Phosphorus (ppm)		466		444				
	Zinc (ppm)		2		3				
Other	Vanadium (ppm)		0		0				
	Titanium (ppm)		0		0				

REC'D DATE: 12/26/2023

REPORT DATE: 01/03/2024

ANALYST: Loede

Page: 2

(**) - Test performed by a Trico Corporation contracted ISO/IEC 17025:2017 Accredited Laboratory



CONDITION REPORT

Sealco S.A.

Jhon Rueda

Action Recommended



Equipment Info Needed



Change Oil

DESC/NAME: Muestra 3 Gearbox
ID/NUMBER: Muestra 3 Gearbox
LUBRICANT: Mobil Mobilube HD Plus 85W-140
RESERV CAP: 0-1 Gallon
SPID #: 381769

SAMPLE DATE: 12/06/2023
TEST SUITE: H002T
CNTL#: 5439567
ASSET: Gearbox - General

Data of Concern

The Silicon content is high for this equipment. This is typically an indication of a contaminated lubricant condition which can eventually lead to the generation of abnormal wear.

AREAS OF CONCERN



Silicon

Actions Needed

Considering the very small reservoir of this unit please inform your Trico Lubrication Program Consultant, Aaron Hyatt at 262-691-6302, if the oil was changed while this sample was being taken. If this is not the case then please proceed with a complete drain, flush, and refill.

Label Info

Machine Hrs: Not Provided
WO#:
Eq. Running: N

Lube Hrs: Not Provided
Sample Taken By:
Oil Change w/ Sample: N

REPORT RATINGS:

Sample Date	12/06/2023
Ratings	Caution

	12/06/2023	LIMITS				
Reference Transfer	Reference Storage	Reference Arrival	Upper Alert	Upper Alarm	Lower Alert	Lower Alarm

VISCOSITY (ASTM D445)

Viscosity 40°C (cSt)	377.43
----------------------	--------

	333	399.6	482.85	283.05	266.4
--	-----	-------	--------	--------	-------

PHYSICAL/CHEMICAL PROPERTIES:

Acid Number (ASTM D664)							
AN (mg KOH/g)	0.993	0.919	2.919				
FT-IR (ASTM E2412)							
Oxidation (abs)	3	3	18				
Nitration (abs)	4	3					
Sulfur (FTIR) (abs)	17	17					
Water (FTIR) (abs)	13	9					
Glycol (FTIR) (abs)	1	1					
Anti-Wear (abs)	12	12					
Karl Fischer (ASTM D6304)							
Karl Fischer (ppm)	306.2	131.8	1000	10000			
Karl Fischer Pct (%)	0.031	0.013	0.1	1			
Visual/Crackle							
Visual Clarity	Normal	Normal					
Particulate	None	None					
Particle Size	None	None					
Crackle Water	No	No					
Visible Water	No	No					

REC'D DATE: 12/26/2023

REPORT DATE: 01/03/2024

ANALYST: Loede

Page: 1

(**) - Test performed by a Trico Corporation contracted ISO/IEC 17025:2017 Accredited Laboratory

PARTICULATES:

Direct Read Ferrography									
Large (>5um)			78.8						
Small (<5um)			28.4						
Total Wear (WPC)			107.2			500	750		
FT-IR (ASTM E2412)									
Soot (abs)			1		1				
Particle Count (ISO 4406)									
>4um (p/mL)			33257		2701				
>6um (p/mL)			8004		466				
>14um (p/mL)			319		120				
>21um (p/mL)			92		4				
>38um (p/mL)			0		0				
>70um (p/mL)			0		0				
ISO PC			22/20/15		19/16/14		26/23/21		

TRACE ELEMENTS by ICP (ASTM 5185)

Equipment	Iron (ppm)		3		0		150	300	
	Chromium (ppm)		0		0		10	15	
	Aluminum (ppm)		0		0		20	30	
	Copper (ppm)		0		0		50	80	
	Lead (ppm)		0		0		50	80	
	Tin (ppm)		1		0		50	80	
	Silver (ppm)		0		0		50	80	
	Nickel (ppm)		0		0		50	80	
Contaminants/Additives	Silicon (ppm)		42		4		64		
	Sodium (ppm)		0		0		80		
	Potassium (ppm)		0		0				
	Boron (ppm)		5		7				
	Molybdenum (ppm)		0		0				
	Magnesium (ppm)		5		5				
	Calcium (ppm)		0		0				
	Barium (ppm)		0		0				
	Phosphorus (ppm)		455		444				
	Zinc (ppm)		2		3				
Other	Vanadium (ppm)		0		0				
	Titanium (ppm)		0		0				

REC'D DATE: 12/26/2023

REPORT DATE: 01/03/2024

ANALYST: Loede

Page: 2

(**) - Test performed by a Trico Corporation contracted ISO/IEC 17025:2017 Accredited Laboratory