Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Esta licencia es la más restrictiva de las seis licencias principales Creative Commons, permitiendo a otras solo descargar sus obras y compartirlas con otras siempre y cuando den crédito, pero no pueden cambiarlas de forma alguna ni usarlas de forma comercial.

http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0

Recibo de pago N° 739089

Visto el Informe **Nº 231-2024-PIEO-UI-FIMEE-UNSLG**, emitido la operaria del sistema de antiplagio se emite la siguiente constancia:

Nº 216-2024

CONSTANCIA

El que suscribe, director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica y Electrónica, hace constar que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud del **Trabajo de Suficiencia Profesional** cuyo título es:

"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MICROFILTRACIÓN A BORDO PARA EXTENDER EL USO DEL ACEITE HIDRÁULICO EN LA PALA 6040FS, COSAPI MINERÍA – MARCONA 2023"

Presentado por:

GONZALES PANTIGOSO, FREDY ENRIQUE

BACHILLER de la Facultad INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA – Escuela Profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA. El resultado obtenido es un porcentaje de DOS POR CIENTO **(2%)**, por el cual se le otorga el calificativo de:

APROBADO

Se adjunta al presente, el reporte de evaluación con el software de verificación de originalidad.

Ica, 09 de Octubre del 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
Dr. José Luis Donayre Pasache
DIRECTOR DE UNIDAD

UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA”
VICERECTORADO DE INVESTIGACIÓN

Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica

“Implementación de un sistema de microfiltración a bordo para extender el uso del aceite hidráulico en la pala 6040FS, Cosapi Minería – Marcona 2023”

Línea de Investigación:

Ciencias Naturales, Ingeniería y Tecnologías Sostenibles

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

AUTOR:

Bach. Fredy Enrique Gonzales Pantigoso

Ica-Perú

2024

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres, quienes con su esfuerzo y dedicación me enseñaron que el estudio es el mejor camino para afrontar la vida; y a mi pareja, que constantemente me motiva a seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todas aquellas personas que me guiaron en la elaboración y ejecución de este proyecto; y a Cosapi Minería, por brindarme la oportunidad de poner en práctica lo aprendido y darme la experiencia profesional que tanto anhelaba.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA ..... **ii**

AGRADECIMIENTO ..... **iii**

ÍNDICE DE CONTENIDOS ..... **iv**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **vi**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **vii**

RESUMEN ..... **ix**

ABSTRACT ..... **x**

INTRODUCCIÓN ..... **xi**

CAPÍTULO I: INFORMACIÓN DE LA INSTITUCIÓN DONDE SE DESARROLLÓ LA EXPERIENCIA **14**

1.1 COSAPI MINERÍA S.A.C. 14

1.1.1 Datos generales 14

1.1.2 Misión y visión 14

1.1.3 Organigrama 15

CAPÍTULO II: TRAYECTORIA PROFESIONAL **17**

2.1 FORMACIÓN PROFESIONAL 17

2.2 EXPERIENCIA PROFESIONAL 17

CAPÍTULO III: APLICACIÓN PROFESIONAL **21**

3.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA 21

3.2 MARCO TEÓRICO 25

3.2.1 Fundamentos de la lubricación 25

3.2.1.1 Fricción 25

3.2.1.2 Desgaste 26

3.2.1.3 Lubricantes 27

3.2.1.4 Aditivos del lubricante 34

3.2.1.5 Tipos de lubricación 38

3.2.1.6 Tribología 43

3.2.2 Filtración del aceite 44

3.2.2.1 Filtro de aceite.....45
3.2.3 Análisis de la contaminación del aceite 48
3.3 PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN.....49
3.4 ETAPAS DEL PROYECTO 49
3.4.1 Selección del equipo de microfiltrado 49
3.4.2 Análisis técnico económico del proyecto.....51
3.4.3 Designación del equipo de carguío.....54
3.4.4 Revisión y ubicación de los componentes en el equipo.....55
3.4.5 Instalación del equipo de microfiltrado.....58
3.4.6 Funcionamiento del equipo de microfiltrado.....61
3.4.7 Monitoreo de comportamiento de la microfiltración.....62
CAPÍTULO IV: APORTES A LA INSTITUCIÓN.....68
CONCLUSIONES 69
RECOMENDACIONES 70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 72
ANEXOS 74

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I CARACTERÍSTICAS DE LUBRICANTE – FABRICANTE VS COSAPI MINERÍA 22

TABLA II ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO PARA SISTEMA HIDRÁULICO – FABRICANTE VS COSAPI MINERÍA 23

TABLA III ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MICROFILTRACIÓN 53

TABLA IV COSTO DE INVERSIÓN POR LA INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE MICROFILTRADO 54

TABLA V RESULTADOS DE LAS MUESTRAS DE ACEITE DE LA PAL-01 ANTES Y DESPUÉS DE LA MICROFILTRACIÓN 67

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Logotipo de COSAPI MINERÍA 14

Fig. 2. Ubicación del proyecto de COSAPI MINERÍA en Shougang Hierro Perú 15

Fig. 3. Organigrama del área de mantenimiento de equipos de COSAPI MINERÍA 16

Fig. 4. Interfaz de programa SCOPE 17

Fig. 5. Proceso de refinación de petróleo 27

Fig. 6. Categorías de bases lubricantes API 28

Fig. 7. Proceso de refinación de aceites base del Grupo I, II y III 29

Fig. 8. Comportamiento físico de un plano en movimiento a través de un fluido 30

Fig. 9. Clasificación comparativa de viscosidad 32

Fig. 10. Clasificación del aceite por tipo de aplicación 33

Fig. 11. Funciones de los aditivos del lubricante 35

Fig. 12. Lubricación límite 39

Fig. 13. Lubricación mixta 39

Fig. 14. Lubricación hidrodinámica.....40

Fig. 15. Lubricación elastohidrodinámica 41

Fig. 16. Curva esquemática de Stribeck.....42

Fig. 17. Esquema de lubricación límite.....42

Fig. 18. Esquema de lubricación mixta.....43

Fig. 19. Esquema de lubricación completa.....43

Fig. 20. Prueba de Multipaso ISO 16889 47

Fig. 21. Catálogo de equipos de microfiltración de la marca KLEENOIL 50

Fig. 22. Rangos de resultados KLEENOIL indicados en códigos de limpieza ISO 4406 / NAS 1638 51

Fig. 23. Estimación del factor multiplicativo para el mejoramiento del código de limpieza ISO – *Extensión Life Table* 52

Fig. 24. Equipo de carguío PAL-01 de COSAPI MINERÍA 55

Fig. 25. Ubicación designada para la instalación del equipo de microfiltrado 55

Fig. 26. Fabricación de soportes metálicos para fijación del equipo de microfiltrado 56

Fig. 27. Esquema de instalación del equipo de microfiltrado según fabricante KLEENOIL 56
Fig. 28. Punto de suministro de caudal hidráulico para el equipo de microfiltrado 57
Fig. 29. Punto de descarga de caudal hidráulico hacia tanque principal 57
Fig. 30. Instalación del equipo de microfiltrado en la pala 58
Fig. 31. Instalación de línea de suministro del equipo de microfiltrado 59
Fig. 32. Instalación de línea de descarga del equipo de microfiltrado 60
Fig. 33. Vista completa del equipo de microfiltrado conectado.....60
Fig. 34. Representación del equipo de microfiltrado instalado en el plano hidráulico de la pala 6040FS 61
Fig. 35. Esquema de recorrido de aceite por el cartucho filtrante KLEENOIL 62
Fig. 36. Intervalos de cambio de los cartuchos filtrantes según fabricante KLEENOIL 62
Fig. 37. Punto de muestreo y muestras de aceite del tanque hidráulico.....63
Fig. 38. Gráfico de tendencia del código de limpieza ISO de la PAL-01 64
Fig. 39. Gráfico de tendencia del código metales de desgaste de la PAL-01 65
Fig. 40. Gráfico de tendencia del código metales de contaminación externa de la PAL-01 65
Fig. 41. Gráfico de tendencia del código metales de aditivos de la PAL-01 66

RESUMEN

El presente informe por suficiencia profesional muestra la selección de un equipo de microfiltrado, diseño y montaje a bordo en una pala hidráulica 6040FS de la empresa COSAPI MINERÍA S.A.C.

Este nuevo sistema de microfiltración realizará una filtración adicional y en paralelo al sistema que la pala hidráulica tiene de fábrica, con el objetivo de obtener un lubricante más limpio y así extender la vida útil del aceite hidráulico y, por consiguiente, cuidar los componentes hidráulicos que interactúan con este aceite.

La instalación de este equipo de microfiltrado se planteó que sea a bordo puesto que de esa forma asegurará que el aceite en circulación esté lo más limpio posible en tiempo real, para que pueda ser utilizado en los distintos componentes hidráulicos del equipo durante la operación.

También se muestra el seguimiento al funcionamiento de este nuevo sistema instalado mediante muestras de aceite recolectadas, para evidenciar los resultados del estado del lubricante posterior a la microfiltración. Posterior a ello se elaboran cuadros comparativos y gráficos de tendencia, los cuales muestran el nivel de contaminación, presencia de aditivos y degradación que presenta el aceite en el sistema.

Finalmente, con estos datos podemos comparar el comportamiento del aceite antes y después de la microfiltración, con la finalidad de poder observar el beneficio o prejuicio que esta filtración adicional nos puede generar en el equipo.

Palabras clave: microfiltración, pala hidráulica 6040FS, aceite hidráulico

ABSTRACT

This report for professional sufficiency shows the selection of microfiltering equipment, design and on-board assembly in a 6040FS hydraulic shovel from the company COSAPI MINERÍA S.A.C.

This new microfiltration system will carry out additional filtration and in parallel to the system that the hydraulic shovel has from the factory, with the aim of obtaining a cleaner lubricant and thus extend the useful life of the hydraulic oil and, consequently, take care of the hydraulic components that interact with this oil.

The installation of this microfiltering equipment was proposed to be on board since in this way it will ensure that the oil in circulation is as clean as possible in real time, so that it can be used in the different hydraulic components of the equipment during operation.

The monitoring of the operation of this new installed system is also shown through collected oil samples, to demonstrate the results of the state of the lubricant after microfiltration. After this, comparative tables and trend graphs are prepared, which show the level of contamination, presence of additives and degradation that the oil presents in the system.

Finally, with this data we can compare the behavior of the oil before and after microfiltration, in order to be able to observe the benefit or prejudice that this additional filtration can generate in the equipment.

Key words: *microfiltration, hydraulic shovel 6040FS, hydraulic oil*

INTRODUCCIÓN

El trabajo de suficiencia profesional titulado "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MICROFILTRACIÓN A BORDO PARA EXTENDER EL USO DEL ACEITE HIDRÁULICO EN LA PALA 6040FS, COSAPI MINERÍA – MARCONA 2023" tiene como objetivo mostrar una alternativa para controlar la contaminación presente en la maquinaria, producto del ambiente donde trabaja y el tipo de operación del equipo.

A. ANTECEDENTES

El mismo objetivo comparte E. Villanueva (2020) [1], donde en su trabajo de investigación propone la regeneración del aceite hidráulico utilizado en los camiones Komatsu 930 ES, a través de un sistema de microfiltración diseñado por filtros de mayor micra, que funciona de manera independiente y no daña ninguna parte del motor, además de reducir costos para la empresa minera Antamina. El tipo de estudio fue aplicado y de diseño preexperimental. La población fueron 12 camiones y la muestra está conformada por el modelo Komatsu 930 ES, estos vehículos ingresan al área de servicio para el cambio de aceite hidráulico cada 2500 horas de operación. En esta tesis se concluyó que en la recuperación de aceite usado en el camión Komatsu 930 ES se puede utilizar un sistema de microfiltración ya que aumenta el número de horas de trabajo de aceite de 2500 a 3500 horas reduciendo el costo de la empresa minera Antamina.

De similar forma, en la tesis de J. Porras, E. Meza y S. Liberato (2021) [2] tuvo por objetivo diseñar un sistema de limpieza de aceite lubricante de motores diésel utilizando un filtro centrífugo como herramienta de limpieza de aceite. La limpieza del aceite usado reduce los efectos nocivos de la contaminación en los sistemas de lubricación de motores diésel, mejora la eficiencia, aumenta la vida útil, reduce los costos de mantenimiento y mejora la protección de los componentes internos, así como la conservación y la protección del medio ambiente. Este trabajo se basa en un método de investigación sistemático, mientras que su tipo es correlacional descriptivo y se desarrolla a través de un diseño de investigación no experimental.

En la tesis realizada por R. Pereda y J. Sopla (2022) [3], también propuso un sistema de regeneración de aceites lubricantes para reutilizarlos en las máquinas de voladura de una empresa minera de La Libertad. La investigación fue aplicada, con un diseño experimental transversal. En los resultados se muestra que, al analizar el proceso de regeneración del aceite lubricante usado mediante la evaluación de sus propiedades y tipo de aceite, el proceso de refinado es el mejor. Según la evaluación de los parámetros normativos analizados de las características del aceite lubricante usado, se demostró que es apto para la reutilización en el marco del diseño de un sistema regenerativo.

B. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Este proyecto plantea controlar el problema que genera la excesiva contaminación presente en el aceite hidráulico de la pala 6040FS, producto de la polución existente en el entorno de trabajo y el desgaste normal de los componentes que trabajan con este aceite.

El sistema hidráulico es el sistema más grande que tiene la pala y es el encargado de las principales funciones del equipo, como el movimiento de los implementos, giro y traslación. La contaminación presente en el sistema no se puede evitar, pero si se debe controlar, ya que la alta contaminación de este sistema compromete la correcta operación de los componentes (bajo rendimiento), y a su vez los daña internamente, como rayaduras en los vástagos de cilindros, rayaduras en los barriles de pistones de bombas y motores hidráulicos, rotura de engranajes de bombas y motores hidráulicos, rayaduras en carretes de válvulas, etc., generando un deterioro anormal y acelerado de estos componentes, así como la degradación del propio aceite. Las fallas producidas por esta contaminación en el sistema hidráulico afectan directamente al área de mantenimiento por las largas horas de indisponibilidad del equipo y en sobrecostos por trabajos no planificados.

C. OBJETIVOS

El proyecto principalmente busca controlar la contaminación existente en el sistema hidráulico, para que a mediano y largo plazo aumente la confiabilidad y la disponibilidad mecánica de la maquinaria, lo que se traduce en la reducción de las paradas intempestivas y ofreciendo la mayor cantidad de horas disponibles para que el equipo pueda ser utilizado dentro de la operación.

Asimismo, se pretende generar un ahorro a la empresa a mediano plazo por la extensión de horas de trabajo del aceite hidráulico, la inversión de horas hombre y horas máquina para las atenciones preventivas y correctivas del equipo; y a largo plazo por el cuidado y la extensión de vida útil de los componentes hidráulicos que interactúan con este aceite, como las bombas, motores, cilindros, válvulas, etc.

D. ALCANCE

También se sugiere que esta iniciativa se replique en todo el parque de equipos, para que los resultados se puedan aplicar a toda la flota y así, evitar que la depreciación de los equipos aumente exponencialmente con los años, lo que le dará a la empresa un alto valor y pueda ser reconocida como una de las mejores en lo que respecta a mantenimiento y cuidado de los equipos.

E. LIMITACIONES

La poca experiencia en la aplicación de nuevas estrategias de mantenimiento, así como el bajo conocimiento de los fundamentos de lubricación, fueron las principales limitantes para este trabajo, ya que se requiere de un monitoreo estricto desde la muestra de aceite hasta la interpretación de resultados para determinar el éxito del proyecto.

F. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo se justifica en la necesidad de que sigan surgiendo más proyectos en lo que respecta a la tribología y control de contaminación, aplicando nuevas tecnologías que no solo generen un ahorro a la empresa, sino que también sean amigables con el medio ambiente y permitan un desarrollo sostenible en el sector minero de todo el Perú.

CAPÍTULO I: INFORMACIÓN DE LA INSTITUCIÓN DONDE SE DESARROLLÓ LA EXPERIENCIA

1.1 COSAPI MINERÍA S.A.C.

1.1.1 Datos generales

COSAPI MINERÍA S.A.C., es una compañía subsidiaria de COSAPI S.A. empresa de ingeniería y construcción con más de 56 años de trayectoria en los ámbitos nacional e internacional. COSAPI MINERÍA S.A.C. se especializa en los siguientes servicios mineros:

- ✓ Asesoría en la ingeniería de la producción: soporte para la optimización de la producción, mejora de procesos productivos y/o administrativos en todas las etapas del proyecto.
- ✓ Explotación en minas y canteras: servicio de perforación, voladura, carguío, acarreo y mantenimiento de vías y botaderos.
- ✓ Construcción: plataformas de lixiviación, posas de procesos y plataformas.
- ✓ Movimiento de tierra masivo: corte, rellenos masivos y actividades complementarias.
- ✓ Servicios auxiliares: alquiler de equipo especializado, supervisión y operación de flota de equipos del cliente. [4]

1.1.2 Misión y visión

- ✓ **Visión:** Ser reconocida como una empresa líder en servicios mineros de clase mundial por su productividad, innovación y gran capacidad de adaptación, superando las expectativas de sus clientes. [5]

- ✓ **Misión:** Contribuir al éxito de nuestros clientes desarrollando nuestras operaciones con altos estándares de calidad, medio ambiente, seguridad y salud ocupacional, enfocándonos en la productividad y empleando la tecnología para lograr un negocio sostenible. [5]

Fig. 1. Logotipo de COSAPI MINERÍA

El proyecto más importante de COSAPI MINERÍA S.A.C. inició en mayo del 2013 con la minera SHOUGANG HIERRO PERÚ S.A.A., donde desarrolla las actividades de extracción y movimiento de mineral de hierro y desmonte bajo los distintos procesos de perforación, explotación, carguío y acarreo en los yacimientos 11, 14 y 16, los cuales son de tipo tajo abierto y están situados a 15 km del litoral peruano con una altitud de 27 m.s.n.m. Geográficamente estos yacimientos se ubican en el distrito de San Juan de Marcona, provincia de Nazca, departamento de Ica.

Este proyecto se mantiene hasta la actualidad, habiendo ya removido más de 450 millones de toneladas de material. [6]

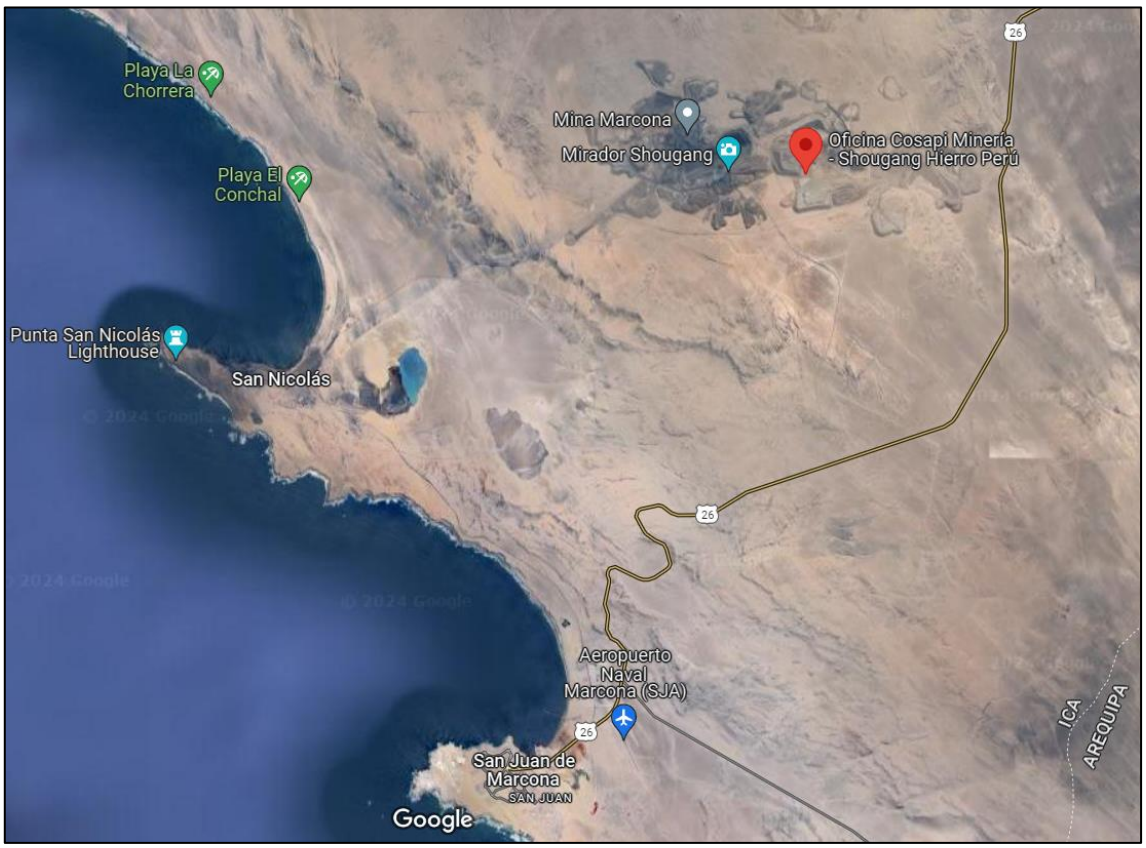


Fig. 2. Ubicación del proyecto de COSAPI MINERÍA en Shougang Hierro Perú

1.1.3 Organigrama

Para el correcto desarrollo de todas las actividades del proyecto, la empresa ha distribuido el trabajo total en las siguientes áreas principales:

- ✓ Seguridad, salud ocupacional y medio ambiente (SSOMA)
- ✓ Gestión y control de calidad
- ✓ Administración de proyecto
- ✓ Oficina técnica (planeamiento mina, costos y productividad)

- ✓ Operaciones mina
- ✓ Mantenimiento eléctrico (MT y BT)
- ✓ Mantenimiento de Equipos

Donde cada área tiene una gerencia o superintendencia, seguido por jefatura, supervisión y personal empleado.

El trabajo de suficiencia profesional expuesto se desarrolla en el área de mantenimiento de equipos y sub-área de planeamiento de equipos, el cual tiene el siguiente organigrama:

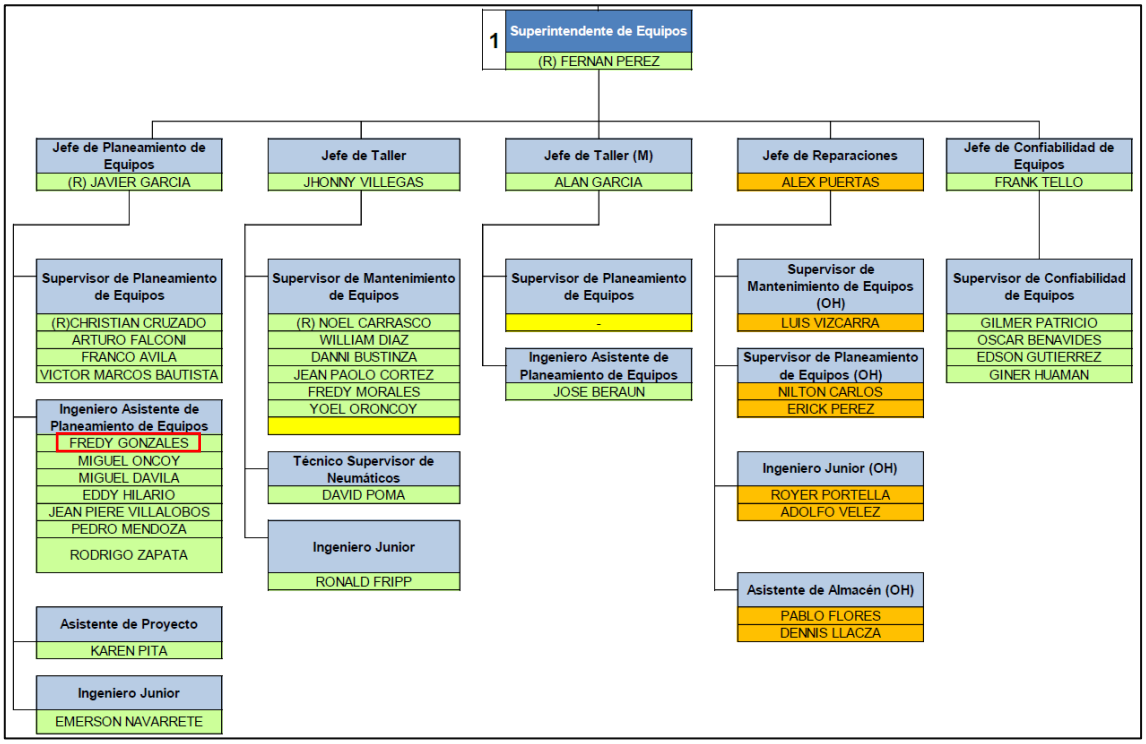


Fig. 3. Organigrama del área de mantenimiento de equipos de COSAPI MINERÍA

El sub-área de planeamiento de equipos está conformado por una jefatura, cuatro supervisiones que corresponden a las principales flotas (perforación, carguío, acarreo y auxiliares), cuatro ingenieros asistentes (uno para cada flota), y tres ingenieros asistentes para los trabajos administrativos (elaboración del reporte diario de trabajo e indicadores de gestión).

Como ingeniero asistente de planeamiento de equipos, junto con el supervisor de planeamiento de equipos, éramos responsables de la flota de carguío, la cual estaba compuesta principalmente por cuatro palas (modelo 6040 FS) y un cargador frontal (modelo 994F), ambos de la marca CATERPILLAR. Esta flota de carguío es una de las más importantes, puesto que son los equipos encargados de recoger el material particulado (producto de la voladura) y depositar dicho material en las tolvas de los camiones para continuar con el ciclo de acarreo.

CAPÍTULO II: TRAYECTORIA PROFESIONAL

2.1 FORMACIÓN PROFESIONAL

Institución: Universidad Nacional San Luis Gonzaga - UNICA (2014-2018)

Facultad: Ingeniería Mecánica Eléctrica y Electrónica

Escuela: Ingeniería Mecánica y Eléctrica

2.2 EXPERIENCIA PROFESIONAL

Empresa: COSAPI MINERÍA S.A.C. (2019-2023)

Cargo: Asistente de planeamiento de equipos

Las funciones desempeñadas dentro de la organización y en el puesto de ingeniero asistente de planeamiento de equipos fueron las siguientes:

- ✓ **Elaboración del programa de mantenimiento preventivo:** este programa se realiza mediante una herramienta informática personalizada desarrollada por la empresa, llamado SCOPE, el cual registraba la información del último mantenimiento ejecutado, último horómetro registrado y tasa de uso del equipo. Con estos 3 parámetros SCOPE era capaz de predecir cuándo sería su siguiente servicio mantenimiento preventivo del equipo. [7]

Fig. 4. Interfaz de programa SCOPE

Este programa se emitía al área de operaciones mensual y semanalmente, para la coordinación de la entrega de los equipos al taller.

- ✓ **Revisión y programación de backlog's:** durante las inspecciones del personal técnico a los equipos, se encontraban condiciones que eran necesarias corregir para darle confiabilidad a la flota, a estas condiciones se les conoce como *backlog*. Para ello el personal técnico ingresaba los repuestos y/o servicios necesarios en el programa SCOPE, y planeamiento de equipos es el encargado de solicitar esos repuestos y/o servicios para el levantamiento de la observación. Una vez llegados los repuestos o solicitado el servicio para la ejecución del *backlog* de la flota de carguío, se realizaba la programación del servicio correctivo que generalmente era dentro del mantenimiento preventivo, salvo alguna indicación de taller de programarlo antes.

- ✓ **Generación de órdenes de trabajo:** para la ejecución de cualquier actividad por parte de mantenimiento de equipos, es necesario la generación de una orden de trabajo. COSAPI MINERÍA trabaja con el software ORACLE PEOPLESOFT, el cual centraliza la gestión realizada en las principales áreas mediante módulos, como mantenimiento, almacenes, costos, compras, etc. [8]

  Dicho esto, las órdenes de trabajos, denominadas coloquialmente "OT" son generadas en el módulo de mantenimiento, asignando el código del equipo y describiendo brevemente la actividad a realizar. Esta OT es un documento muy importante, ya que además de autorizar al técnico a elaborar la actividad preventiva o correctiva, también nos devuelve la información de tiempo intervención del equipo, materiales utilizados, personal asignado, etc. (previamente validado por el supervisor de mantenimiento).

- ✓ **Seguimiento a los materiales en stock:** para la ejecución de los mantenimientos preventivos, es indispensable tener los insumos a utilizar, como filtros, lubricantes, consumibles, etc., así como los repuestos críticos para mantener la flota operativa ante alguna falla imprevista (correctivo no programado). Para esto es necesario descargar el reporte de stock del módulo de almacenes del ORACLE y así poder llevar el control de lo que se tiene en proyecto.

- ✓ **Generación y seguimiento de órdenes de suministros:** En base a la programación de mantenimiento mensual y stock de protección para las atenciones correctivas, será necesario generar una solicitud en el módulo de compras del ORACLE, con la cual el comprador podrá cotizar y posteriormente generar una orden de compra al mejor proveedor. Parte de la función también es hacerle seguimiento a la llegada de lo solicitado a mina, ya que, se tiene como responsabilidad la operatividad de los equipos y

cumplimiento del programa de mantenimiento, por lo que contar con los repuestos y consumibles en proyecto es primordial.

- ✓ **Elaboración de informe de cumplimiento:** Al término de la semana, se consolida el cumplimiento del programa de mantenimiento y el registro es ingresado al programa SCOPE, el cual nos entregaba el siguiente reporte:

  - Cumplimiento de mantenimiento programado
  - Porcentaje de precisión del servicio de mantenimiento preventivo
  - Horas taller programados vs Horas taller ejecutados

  Con estos datos, se procede a debatir con las demás sub-áreas de mantenimiento (taller y OH) las desviaciones encontradas.

- ✓ **Revisión de los indicadores de mantenimiento:** Es necesario precisar que los indicadores más importantes para la gestión de mantenimiento en COSAPI MINERÍA son la disponibilidad mecánica, disponibilidad operacional, MTBF (tiempo medio entre fallas), MTTR (tiempo medio para reparar) y confiabilidad. Estos indicadores son el resultado del registro de la información brindada por las órdenes de trabajo.

  Con estos datos, se procede a debatir con las demás sub-áreas de mantenimiento (taller y confiabilidad) las desviaciones encontradas.

- ✓ **Búsqueda de aplicaciones para la mejora de los indicadores:** Ya que los indicadores de gestión de mantenimiento es un reflejo de la gestión que se lleva (atención de mantenimientos preventivos, correctivo y ejecución de backlog's), también es necesario buscar oportunidades de mejora para darle una mayor confiabilidad a la flota. Como toda falla representa un gasto para la empresa, es necesario que el área de planeamiento de equipos, el cual lleva directamente el control de los costos de mantenimiento, en conjunto con la sub-área de mantenimiento predictivo y confiabilidad, busquen la causa raíz de las fallas más recurrentes, con la finalidad de mitigarlas antes de que ocasione una parada imprevista o incluso evitar que se generen estas fallas potenciales, que finalmente aterrizan en sobrecostos a la empresa.

  Para esto ponemos en práctica nuestros conocimientos en:

  - Lubricación (mecánica de fluidos, termodinámica y ciencia de los materiales), lo cual aplica para todos los equipos, ya que todos llevan compartimientos que trabajan con aceite el cual actúa con cilindros hidráulicos, válvulas y cajas de engranajes. Con esto podemos monitorear la aplicación del aceite que se tiene en

uso y establecer sus límites de trabajo. También nos ayuda para el correcto entendimiento del plano hidráulico del equipo, identificando el flujo del aceite y de los componentes con los que se interactúa, y así poder determinar de donde es probable el desgaste metálico que retienen los filtros.

- Electricidad (máquinas eléctricas, instalaciones eléctricas y electrónica industrial), principalmente para la flota de palas y perforadoras eléctricas, lo cual aplica para el entendimiento del funcionamiento de arranque y operación mediante seccionadores y transformadores (media tensión 7.2Kv), la interacción de sus componentes internos como luces y motores (baja tensión 380V-220V) y componentes de control y monitoreo como tableros, sensores e interruptores (12V-5V DC). Al conocer esto, podemos saber que componente mejorar (de eléctrico a electrónico) o cambiar (por monitoreo de temperatura o pruebas eléctricas).
- Materiales (resistencia de materiales y mecánica de sólidos), lo cual aplica para el monitoreo del comportamiento de las fisuras que puedan presentar las estructuras de los equipos, así también como la soldadura correcta a aplicar por el tipo de esfuerzo que esta estructura soporta.
- Software (lenguaje de programación), lo cual influye en el entendimiento de cómo funcionan los procesos de gestión dentro de una organización y de los softwares que esta pudiese tener, como el Oracle. También ayuda a entender como poder programar los cuadros de gestión (Microsoft Excel) para que estos nos den los resultados que deseamos obtener de diferentes bases de datos.

CAPÍTULO III: APLICACIÓN PROFESIONAL

3.1 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

La cercanía al mar del proyecto genera fuertes vientos dentro de los yacimientos, ocasionando gran polución a los alrededores, sumado a eso también encontramos el polvo metálico generado por los movimientos de los equipos (perforación, carguío, acarreo) y los trabajos de la propia operación (voladura, limpieza de vías, etc.). Todo esto hace que sea imposible evitar que los equipos se ensucien severamente y que los compartimentos de aceite no se contaminen.

El desarrollo del trabajo de suficiencia profesional se centrará en la pala hidráulica modelo 6040, aplicación *front shovel* (FS), la cual tiene un peso operativo de 405 t, un motor eléctrico de 1400 kW a bordo como fuente principal de energía y un cucharón de 22m³ de capacidad.
Este equipo tiene como sistema principal el hidráulico, el cual está compuesto por 6400 L (1,585 gal) de aceite, 4000 L (1,057 gal) de aceite en el tanque de retorno y el resto capturado en los demás componentes: módulos de filtración para el aceite, cilindros hidráulicos de doble efecto, bombas y motores hidráulicos tanto de pistones como de engranajes y una variedad considerable de válvulas hidráulicas.
Todos estos componentes se encargan de las principales funciones del equipo: control del implemento, giro y traslación.

El sistema hidráulico, al ser el sistema más grande, es el que tiene mayor tasa de fallas en las palas, principalmente ocasionadas por la contaminación en el aceite.
Al ser solo cuatro palas, impacta de manera significativa en la producción que una de ellas deje de operar ante alguna falla imprevista (correctivo no programado), por lo que es necesario identificar las estrategias necesarias para poder darle confiabilidad al equipo y a la operación.

En COSAPI MINERÍA, para la mayoría de los sistemas hidráulicos de todo su parque de equipos, se utiliza el aceite Mobiltrans HD 10W de la marca Mobil, ya que cumple con la normativa Caterpillar TO-4 (recomendado por Caterpillar para sistemas hidráulicos) y tiene un costo asequible para su adquisición en volúmenes grandes. Sin embargo, para equipos que requieren de cumplir con una normativa superior, este aceite no es el adecuado, como en el caso de las palas y perforadoras, por lo que es necesario buscar nuevas estrategias para alcanzar un equilibrio técnico-económico en el mantenimiento de estos equipos.

En lo que respecta a lubricación, COSAPI MINERÍA realiza las siguientes estrategias:

- ✓ Selección del aceite, en la cual la empresa debe de elegir entre las opciones recomendadas por el fabricante, cual se adapta mejor a la aplicación del equipo y a su operación. Acá es donde se evalúa cumplimiento de normativas, propiedades, aditivos y costos del aceite. También es importante indicar que no siempre se encontrará el aceite recomendado por el fabricante en el mercado nacional, por lo que se evalúa la ficha técnica del lubricante recomendado y en base a eso se busca uno semejante. Cabe indicar que, actualmente el aceite hidráulico usado en las palas no es el recomendado por el fabricante Caterpillar-Bucyrus.

TABLA I

CARACTERÍSTICAS DE LUBRICANTE – FABRICANTE VS COSAPI MINERÍA

CARACTERÍSTICAS	LUBRICANTE RECOMENDADO POR EL FABRICANTE	LUBRICANTE USADO POR COSAPI MINERÍA
Nombre comercial	*Bucyrus Mining Long Term Hydraulic Fluid HSS*	Mobiltrans HD 10W
Grado de viscosidad	ISO 46	SAE 10W
Norma de formulación	**DIN 51524-3**	**Caterpillar T0-4**
Viscosidad 40°C (mm^2/s)	48.7	42
Viscosidad 100°C (mm^2/s)	9.3	6.3
Viscosidad después del cizallamiento (mm^2/s)	-	6.3
Índice de viscosidad (IV)	180	96
Densidad a 15 °C (kg/l)	0.865	0.89
Punto de inflamación (°C)	234	202
Punto de fluidez (°C)	-34	-33
Corrosión de la tira de cobre	0A -0B	1
Desgaste abrasivo FZG, etapa de falla	11	12
Aceite base	Grupo III	Grupo I-II
Número base (mgKOH/g)	0.6	3.13
Zinc (ppm)	-	1070
Fósforo (ppm)	-	950

De la TABLA I, se resalta principalmente que el aceite usado actualmente en las palas no cumple con la formulación requerida por el fabricante Caterpillar-Bucyrus, además de esto, para sistemas exclusivamente hidráulicos, Caterpillar recomienda una viscosidad a 100°C como mínimo de 6.6 cSt, lo cual tampoco es cumplido.

TABLA II

ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO PARA SISTEMA HIDRÁULICO – FABRICANTE VS COSAPI MINERÍA

ÍTEM	COMPONENTE	PARTE DE COMPONENTE	ACTIVIDAD PARA REALIZAR	ESTRATEGIA SEGÚN FABRICANTE	ESTRATEGIA SEGÚN COSAPI MINERÍA
1	**Tanque de aceite de retorno principal**	Aceite hidráulico	Tomar muestra	cada 500 horas	cada 300 horas
		Aceite hidráulico	Cambiar	cada 10,000 horas	cada 6,000 horas
		Respiradero de tanque	Cambiar	cada 1,000 horas	cada 300 horas
2	**Porta filtros de tanque de aceite de retorno principal**	Filtros de retorno (14 und)	Cambiar	cada 1,000 horas	cada 1,200 horas
		Varilla magnética	Inspeccionar y limpiar	cada 500 horas	cada 1,200 horas
		Válvula de derivación a tanque	Inspeccionar y limpiar	cada 1,000 horas	cada 1,200 horas
		Sello de conjunto porta filtros (02 und)	Cambiar	cada 1,000 horas	cada 1,200 horas
3	**Reservorio de retorno de circuito de enfriamiento**	Filtros de retorno (02 und)	Cambiar	cada 1,000 horas	cada 600 horas
		Varilla magnética	Inspeccionar y limpiar	cada 1,000 horas	cada 600 horas
		Válvula de derivación a tanque	Inspeccionar y limpiar	cada 1,000 horas	cada 1,200 horas
4	**Circuito de implementos**	Filtros de alta presión (bombas de trabajo)	Cambiar	cada 1,000 horas	cada 6,000 horas
5	**Circuito de giro**	Filtros de carga de giro	Cambiar	cada 1,000 horas	cada 1,200 horas
6	**Circuito de pilotaje**	Filtro de pilotaje (servo)	Cambiar	cada 1,000 horas	cada 1,200 horas
7	**Circuito de engrase**	Filtro de carga de bomba de engrase	Cambiar	cada 1,000 horas	cada 1,200 horas
8	**Acumuladores hidráulicos**	Presión de acumulador de giro, servo, tensado y escalera	Comprobar presión (según manual de servicio)	cada 1,000 horas	cada 1,200 horas
9	**Enfriador de aceite**	Pernos de fijación	Comprobar ajuste	cada 1,000 horas	cada 1,200 horas
		Cojinetes de goma	Inspeccionar estado	cada 1,000 horas	cada 1,200 horas
10	**Cilindros hidráulicos**	Sellos y anillos internos	Cambiar	cada 10,000 horas	cada 9,000 horas

- ✓ Cambio de aceites y filtros, los llamados también mantenimientos preventivos, los cuales se realizan periódicamente según una frecuencia establecida por el manual de servicio del fabricante y también modificada a las condiciones de operación de cada equipo. Para el caso de los lubricantes en las palas, la estrategia actual de mantenimiento que se lleva es diferente en cuanto a lo recomendado por el fabricante, esto sucede puesto que se utilizan algunos lubricantes diferentes a los recomendados, como el aceite hidráulico, y también por las tendencias de las muestras de aceite que se toman, donde con el tiempo nos han ido proporcionando la información de cuanto aproximadamente puede trabajar en condiciones normales en nuestra operación.

  En la TABLA II se observa que el aceite es cambiado en un menor periodo de trabajo respecto al propuesto en el manual de servicio, debido a que no cumple con las especificaciones indicadas por el fabricante Caterpillar-Bucyrus (véase Anexo 04).

  Respecto a los filtros, Cosapi Minería si utiliza los filtros originales de la marca Caterpillar, por lo que podríamos decir que, respecto al tamaño de retención de partículas en el aceite, se está siguiendo la recomendación del fabricante (véase Anexo 05). No obstante, según lo indicado en la TABLA II, estos filtros son cambiados varias veces durante la vida útil del aceite ya sea por frecuencia o condición.

  Una vez desmontados los filtros del equipo, la sub-área de mantenimiento predictivo y confiabilidad realiza el corte de estos y la inspección por filtrografía, con la finalidad de observar el desgaste metálico retenido por el papel filtrante. Por lo general, estas evidencias nos alertan del estado de los componentes internos que interactúan con el aceite, o de algún material externo que pueda estar ingresando al sistema.

- ✓ Extracción de muestras a los sistemas oleo hidráulicos, las cuales son enviadas a laboratorio para su análisis, donde se logra aproximar cuanto es el nivel de contaminación de un fluido contando las partículas bajo niveles codificados según la norma ISO 4406, la cual clasifica la cantidad de partículas encontradas en 4, 6 y 14 µm. Esta es la norma más usada a nivel internacional para el análisis de contaminación de fluidos.
  De la TABLA II, se observa que la empresa tiene como estrategia realizar con mayor frecuencia el muestreo del aceite del compartimiento hidráulico, esto con la finalidad de realizar un mayor seguimiento al comportamiento del lubricante.

El aceite Mobiltrans HD 10W que se usa en la pala, principalmente se degrada por contaminación, producto de la polución existente en el ambiente de trabajo (frentes de carguío) y por los metales desprendidos de los componentes con los que interactúa, que es producto del

trabajo normal de estos (desgaste). Si bien esta contaminación no se puede evitar, si se debe controlar, ya que, en niveles elevados empieza a dañar los componentes internos del equipo como vástagos de cilindros, barriles de pistones de bombas y motores hidráulicos, engranajes de bombas y motores hidráulicos, carretes de válvulas, etc., generando un deterioro anormal y acelerado.

Finalmente, todo esto aterriza en sobrecostos a corto plazo por el cambio del aceite por los niveles de contaminación y para que no siga deteriorando más los componentes del equipo; y a largo plazo por la reparación de estos componentes antes de cumplir con su vida útil, además de la indisponibilidad del equipo por el cambio de estos en paradas imprevistas (fallas).

3.2 MARCO TEÓRICO

3.2.1 Fundamentos de la lubricación

La lubricación es la aplicación de una sustancia sólida (grafito, bisulfuro de molibdeno, teflón), semisólida (grasas) o líquida (aceites de origen animal, vegetal, mineral o sintética) para mejorar la suavidad del movimiento de una superficie con respecto a otra, reduciendo el rozamiento. Para este estudio, nos enfocaremos principalmente en los lubricantes de origen mineral.

3.2.1.1 Fricción

La fricción es la fuerza de resistencia que un objeto encuentra cuando hace un contacto o se mueve sobre otra superficie. [9]

Estas pueden ser:

- ✓ Fricción estática: es la resistencia al movimiento entre dos superficies en contacto que se encuentran inmóviles.
- ✓ Fricción dinámica: en la resistencia entre dos superficies que se encuentran en movimiento.

Tipos de fricción:

- Fricción sólida: se produce con la interacción entre las asperezas de dos superficies sólidas y sus puntos de contacto, y estas pueden ser:
  - Por deslizamiento, cuando una superficie se desliza sobre otra, siendo el contacto entre áreas.
  - Por rodadura, cuando una superficie rueda sobre otra, siendo el contacto puntual.

- Lineal, cuando el contacto entre superficies se da en una línea

- Fricción fluida: se produce por la acción interna de las moléculas cuando el lubricante se encuentra en movimiento, es decir, cuando este se encuentra entre las asperezas de las superficies evitando su contacto.
  Esta fricción fluida siempre es menor que la fricción sólida y esta variará según la viscosidad del lubricante.

3.2.1.2 Desgaste

El desgaste es la pérdida de material de una superficie debido a la fricción sólida entres dos superficies en contacto. Esto produce daños en la superficie, menor eficiencia operativa, pérdida de potencia, menor duración de la pieza y aumento de probabilidad de alguna falla catastrófica. [9]

Tipos de desgaste:

- ✓ Desgaste abrasivo: Es el daño causado por el impacto de partículas sólidas presentes en la zona de fricción. Los materiales abrasivos pueden deslizarse o rodar por las superficies, incrustándose y rompiendo la aspereza de la superficie, creando partículas más grandes y aumentando el desgaste.
- ✓ Desgaste erosivo: Es el daño producido por el impacto de partículas sólidas que se mueven a muy alta velocidad, impactando sobre superficies metálicas u otros materiales.
- ✓ Desgaste por fatiga: Es el daño causado por la concentración de tensiones o esfuerzos mayores de lo que el material puede soportar. También es causado por estrés o sobrecarga causada por partículas atrapadas entre dos superficies en movimiento.
- ✓ Desgaste adhesivo: Es el daño producido por la transferencia de materia de una superficie a otra durante su movimiento relativo. Las cargas excesivas, las bajas velocidades de la máquina y la baja viscosidad del lubricante pueden adelgazar la película lubricante, lo que permite el contacto metal con metal y la soldadura de las piezas.
- ✓ Desgaste corrosivo: Es el daño originado por la influencia del ambiente, ocasionado principalmente por el O2 (dioxígeno), atmosférico o disuelto en el lubricante, sobre las superficies en movimiento. También puede ser originado por la humedad, alta temperatura y galvanismo.

3.2.1.3 Lubricantes

Los lubricantes de origen mineral son subproductos refinados de los diversos hidrocarburos del petróleo crudo. Los refinadores acumulan los hidrocarburos en grupos conocidos como fracciones, separándolos por destilación fraccionada (al vacío), donde se hierve el petróleo crudo en una columna de destilación fraccionada. A medida que el vapor sube por las fracciones de la columna, se enfría y se condensa para formar un líquido. Las distintas fracciones líquidas se recogen en bandejas y luego se pueden transferir a los condensadores para su posterior enfriamiento antes de enviarse a un tanque de almacenamiento. [10]

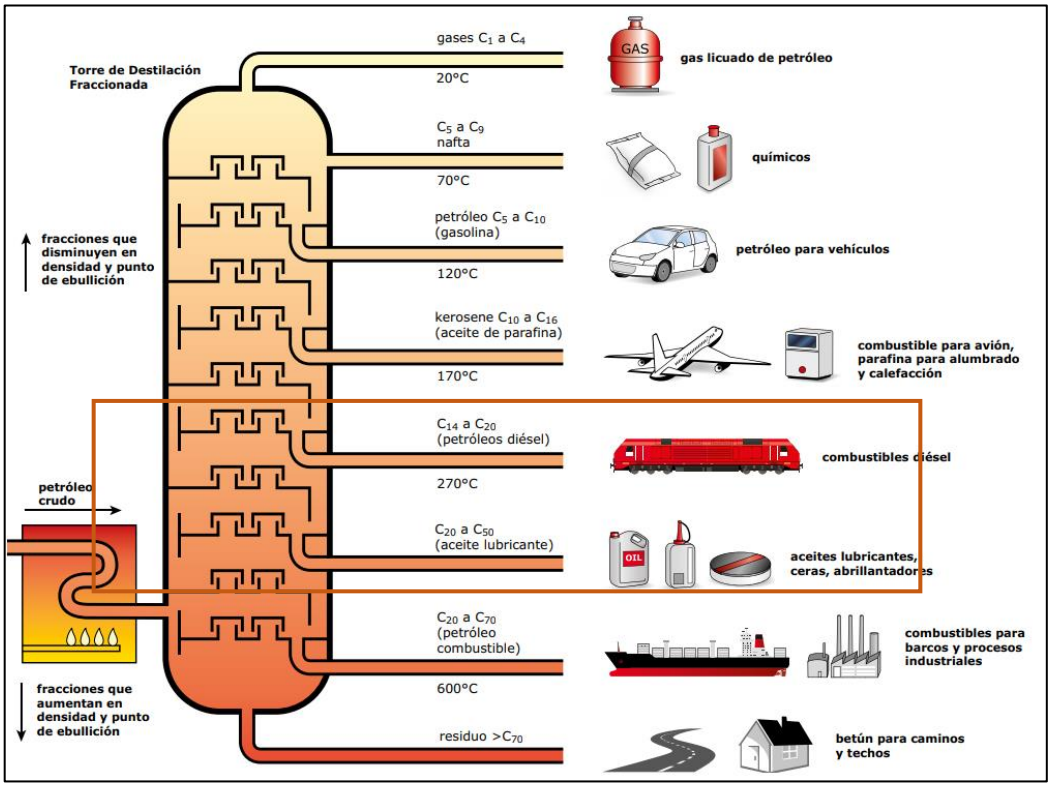


Fig. 5. Proceso de refinación de petróleo

Sin embargo, muy pocos subproductos salen de la columna de destilación fraccionaria listos para salir al mercado. Muchos de ellos requieren un tratamiento químico adicional en otras fracciones (reformado, mezclado, etc.). Las fracciones destiladas y tratadas químicamente se procesan luego para eliminar impurezas, como compuestos orgánicos que contienen azufre, nitrógeno, oxígeno, agua, metales disueltos y sales inorgánicas. Las fracciones tratadas se enfrían y luego se mezclan para crear diferentes productos. [10]

Clasificación de bases lubricantes:

La mayoría de los lubricantes que se usan en el sector minero e industrial hoy en día iniciaron como una base lubricante, también llamado aceite base. A principios de la

década de 1990, el Instituto Americano del Petróleo (API, por sus siglas en inglés) desarrolló un sistema para caracterizar diferentes aceites base (API 1509, apéndice E). El resultado fue el desarrollo y la introducción de cinco aceites base: los primeros 3 refinados a partir del petróleo crudo, el cuarto totalmente sintético y el quinto para todos los demás aceites base no incluidos en los grupos del 1 al 4. [11]

	Categoría de básicos lubricantes del API				
	Categoría de básicos lubricantes	Azufre (%)		Saturados (%)	Índice de viscosidad
Mineral	Grupo I (refinado por solventes)	>0.03	y/o	<90	80 a 119
	Grupo II (hidrotratado)	<0.03	y	>90	80 a 119
	Grupo III* (hidrofraccionado)	<0.03	y	>90	≥120
	Grupo IV (PAO)	Lubricante sintético PAO			
	Grupo V (todos los demás)	Básicos nafténicos, varios ésteres sintéticos, polialquilén glicol (PAG), ésteres fosfatados y otros no incluidos en los grupos I, II, III o IV			

Fig. 6. Categorías de bases lubricantes API

- ✓ **Grupo I:** Estos aceites contienen menos del 90% de saturados, 0.03 % más de azufre y un índice de viscosidad de 80 a 120. El rango de temperatura para estos aceites es de 0°C (32°F) a 65°C (150°F). Los aceites base del Grupo I se refinan con solventes, que es un proceso de refinación más simple y es por eso que son los aceites base más baratos del mercado. [11]
- ✓ **Grupo II:** Estos aceites contienen más del 90% de saturados, menos del 0.03% de azufre y un índice de viscosidad de 80 a 120. Por lo general se obtienen mediante hidro procesamiento ligero, fraccionando el aceite base a 400°C (750°F) y 500 psi de hidrógeno, removiendo principalmente azufre y nitrógeno. Este fraccionamiento convierte los hidrocarburos aromáticos en ciclo parafinas, y debido a que las moléculas de hidrocarburos en estos aceites están más saturadas, los aceites base del Grupo II tienen mejores propiedades antioxidantes; también son de color más claro y cuestan más que los aceites base del Grupo I. [11]
- ✓ **Grupo III:** Estos aceites contienen más del 90% de saturados, menos del 0.03% de azufre y tienen un índice de viscosidad superior a 120. Estos aceites son incluso más refinados que los aceites base del Grupo II y, a menudo, es el resultado de hidro fraccionar el aceite base a mayor temperatura y presión (800 a 900°F y 1500 a 3000 psi de hidrógeno). Este fraccionamiento convierte los aros de ciclo parafinas en cadenas de parafinas (isoparafinas), logrando un aceite base más puro. Aunque están hechos de petróleo crudo, los aceites base del Grupo III a veces se describen como hidrocarburos sintéticos. [11]

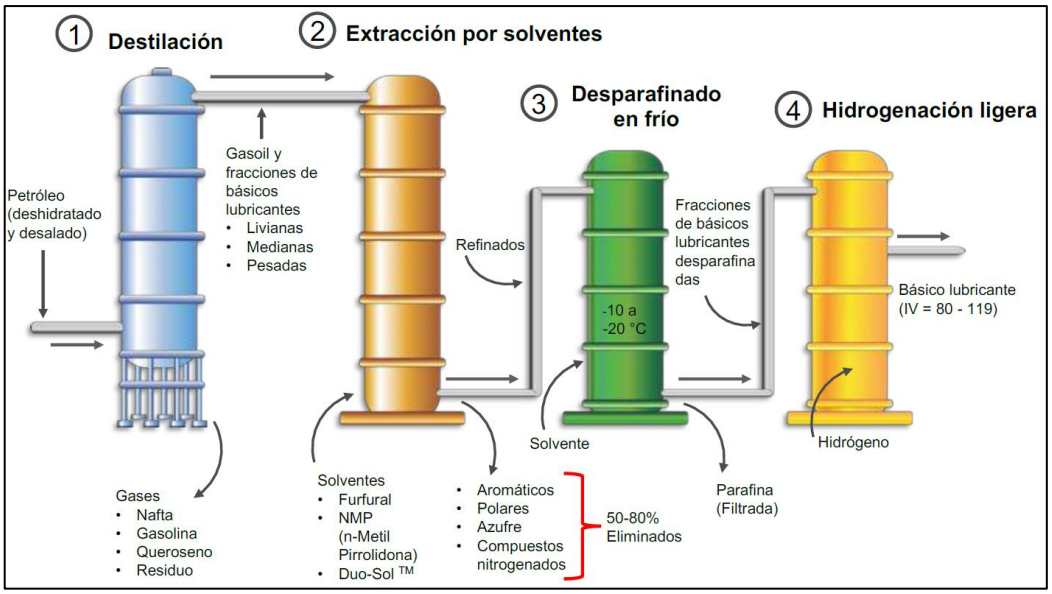


Fig. 7. Proceso de refinación de aceites base del Grupo I, II y III

- ✓ **Grupo IV:** Estos aceites son polialfaolefinas (PAO). Estos aceites base sintéticos se crean mediante un proceso llamado síntesis. Tienen un rango de temperatura mucho más amplio y son excelentes para usar en aplicaciones de frío extremo y alta temperatura. [11]
- ✓ **Grupo V:** Estos aceites incluyen todos los demás aceites base, incluidas las siliconas, los ésteres de fosfato, el polialquilenglicol (PAG), poliol éster, biolubricantes, etc. Estos aceites base a veces se mezclan con otros aceites base para mejorar las propiedades del aceite. Un ejemplo sería un aceite de compresor a base de PAO mezclado con un poliol éster. Los ésteres son aceites base comunes del Grupo V que se utilizan en varias formulaciones de lubricantes para mejorar las propiedades de los aceites base existentes. Los aceites base de éster pueden soportar mejor las altas temperaturas y proporcionarán una detergencia superior en comparación con los aceites base PAO sintéticos, lo que aumenta la vida útil del aceite lubricante. [11]

<u>Principales propiedades de los lubricantes:</u>

- **Viscosidad:** La viscosidad del lubricante es la propiedad más importante para la mayoría de los equipos móviles y componentes industriales. Es una característica de todos los fluidos y se define como la medida de la resistencia del aceite a fluir (esfuerzo cortante) bajo ciertas condiciones. En pocas palabras, la viscosidad del aceite representa el grado en que el aceite tiende a permanecer en su lugar cuando es empujado (cortado) por partes mecánicas en movimiento. Los lubricantes con alta viscosidad son espesos y de flujo lento, mientras que los lubricantes con baja

viscosidad son delgados y de flujo rápido. La viscosidad de un lubricante es importante porque afecta la capacidad del lubricante para formar una película entre dos superficies y para proteger esas superficies del desgaste. [12]

Con respecto a las fuerzas que generan el movimiento y la velocidad de un fluido, se tienen los siguientes tipos de viscosidad:

- Viscosidad dinámica: o también llamada viscosidad absoluta, es la resistencia interna entre las moléculas de un fluido en movimiento (esfuerzo cortante o cizallamiento), dicho movimiento puede ser producido por una bomba hidráulica, motor hidráulico, aire a presión, etc. Siendo precisos, la viscosidad dinámica es la fuerza tangencial por unidad de área requerida para mover un plano más allá de otro a velocidad unitaria a distancia unitaria. A medida que el plano en movimiento se aleja cada vez más, se establece un gradiente de velocidad entre los dos planos. La viscosidad dinámica puede ser interpretada como un coeficiente de arrastre proporcional a este gradiente de velocidad. [13]

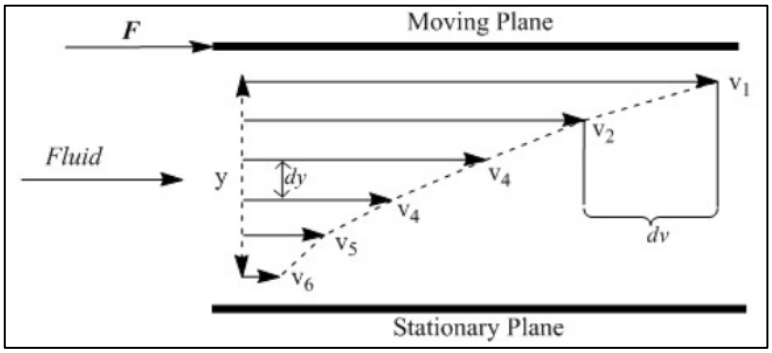


Fig. 8. Comportamiento físico de un plano en movimiento a través de un fluido

Este esfuerzo cortante se define mediante la siguiente fórmula:

$$\tau = \eta(\frac{\Delta V}{\Delta Y})$$

Despejando la viscosidad dinámica, obtendríamos lo siguiente:

$$\eta = \tau(\frac{\Delta Y}{\Delta V})$$

Donde:

η: es la viscosidad dinámica, expresada en newtons-segundo por metro cuadrado ($^{N.s}/_{m^2}$)

τ: es el esfuerzo cortante, expresado en newtons por metro cuadrado ($^{N}/_{m^2}$)

$\Delta V/\Delta Y$: es la *gradiente de velocidad*, expresada en Hertz ($1/s$)

- Viscosidad cinemática: La viscosidad cinemática es la medida de la resistencia interna de un fluido que fluye bajo la acción de la gravedad. [14]
  Para esto se requiere el conocimiento de la densidad del fluido y se define mediante la siguiente fórmula:

$$v = \frac{\eta}{\rho}$$

  Donde:
  v: es la viscosidad cinemática, expresada en metro cuadrado por segundo $(^{m^2}/_{s})$
  η: es la viscosidad dinámica, expresada en newtons-segundo por metro cuadrado o kilogramo por metro-segundo $(^{N.s}/_{m^2}\ o\ ^{kg}/_{m.s})$
  ρ: es la densidad, expresada en newtons por metro cuadrado $(^{kg}/_{m^3})$

  Las viscosidades cinemáticas de los lubricantes industriales más comunes varían aproximadamente entre $1x10^{-7}\ y\ 7x10^{-2}\ m^2/s$, por lo que es más conveniente que se expresen en mm^2/s (centistokes – cSt)

Factores que afectan la viscosidad:

- Temperatura: la viscosidad aumenta cuando baja la temperatura y disminuye cuando sube la temperatura.
- Carga: la película lubricante disminuye a medida que aumenta la carga, pudiendo producir alta fricción y desgaste.
- Velocidad: la película lubricante aumenta a medida que la velocidad inicia desde cero hasta su velocidad nominal (cuña de aceite). Para aplicaciones de alta velocidad se recomienda un lubricante de baja viscosidad, y para una aplicación de baja velocidad, un lubricante de alta viscosidad.
- Ratio de corte: cuando los esfuerzos físicos cortantes en el aceite se incrementan, la viscosidad del aceite disminuye.
- Presión: cuando las cargas puntales ejercen presión sobre el aceite, la viscosidad del aceite incrementa.

Clasificación comparativa de la viscosidad

En un estudio se determinó que la temperatura promedio del uso industrial es de 40 °C (104 °F), por lo que era la más adecuada para clasificar los lubricantes industriales, así como para determinar las propiedades de los lubricantes.

Hay muchos grados de viscosidad con las que se trabajan actualmente, por lo que se reunieron los métodos de medición de viscosidad más populares (SAE, AGMA, ISO, etc.) en una sola tabla, con la finalidad de identificar fácilmente la correlación entre estos. [12]

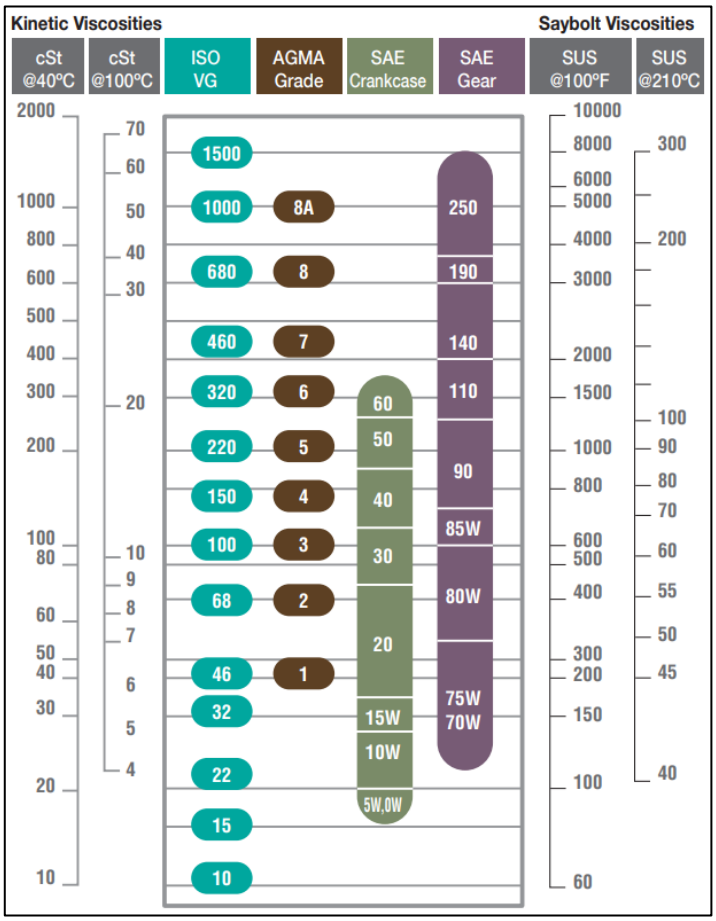


Fig. 9. Clasificación comparativa de viscosidad

Con respecto a la aplicación, las viscosidades y temperaturas a las que trabaja el lubricante en la maquinaria, se tienen los siguientes tipos:

- Aceite monogrado: estos aceites tienen un único grado de viscosidad y pueden aplicarse para verano o para invierno, indicando el rango de temperatura en los cuáles este aceite trabaja correctamente. [15]
- Aceite multigrado: este aceite mantiene estable su viscosidad durante los cambios repentinos de temperatura, incluso estando en un clima frío, puede llegar con mayor rapidez a las piezas para lubricarlas. [15]

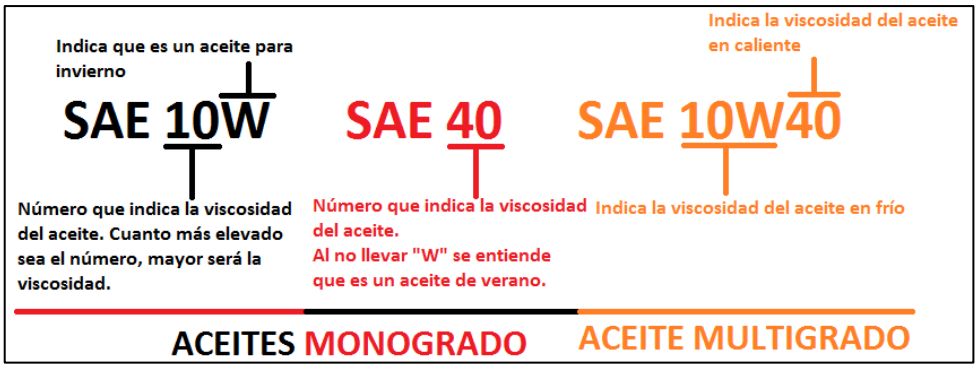


Fig. 10. Clasificación del aceite por tipo de aplicación

- **Índice de Viscosidad:** El índice de viscosidad (VI) es una medida de cuánto cambia la viscosidad de un lubricante con la temperatura. Los lubricantes con un VI alto tienen un cambio bajo de viscosidad con la temperatura, mientras que los lubricantes con un VI bajo tienen un cambio alto de viscosidad con la temperatura. El VI de un lubricante es importante porque afecta la capacidad del lubricante para mantener el espesor de la película y las propiedades protectoras en un amplio rango de temperaturas.

- **Estabilidad a la oxidación:** La estabilidad a la oxidación es una medida de cuán resistente es un lubricante a la oxidación. La oxidación es una reacción química que puede causar que los lubricantes se descompongan y formen subproductos dañinos. La estabilidad a la oxidación es importante porque afecta la vida útil de un lubricante y la capacidad del lubricante para proteger las superficies que está lubricando.

- **Punto de fluidez:** El punto de fluidez es la temperatura más baja a la que fluirá un lubricante. El punto de fluidez de un lubricante es importante porque afecta la capacidad del lubricante para usarse en climas fríos.

- **Demulsibilidad:** La demulsibilidad es una medida de la facilidad con la que un lubricante puede separarse del agua. La demulsibilidad es importante porque afecta la capacidad de un lubricante para usarse en aplicaciones donde puede entrar en contacto con el agua.

Función de los lubricantes:

- **Control de fricción:** el lubricante forma una película entre las superficies en movimiento de un mecanismo, separándolas. Esta película debe de ser lo suficientemente fuerte para soportar las cargas entre los mecanismos y proporcionar un bajo coeficiente de fricción, para esto el lubricante aplicado depende mucho de su viscosidad y de sus aditivos. [9]

- **Control de desgaste:** al reducir la fricción entre los mecanismos, también reduce considerablemente el desgaste producido (adhesivo, abrasivo, erosivo, etc.). Este desgaste no puede ser eliminado del todo ya que corresponde al trabajo normal de los componentes, sin embargo, puede controlarse. [9]
- **Control de la corrosión:** el lubricante debe de proteger las superficies de los mecanismos contra la corrosión, ocasionado por agua en superficies ferrosas y sustancias ácidas en superficies no ferrosas (Cu, Pb, Al, Sn, etc.). [9]
- **Control de la contaminación:** el lubricante también tiene la función de atrapar algunas partículas y mantenerlas finamente dispersos en el aceite, hasta que se aglomeren o formen partículas de mayor tamaño y puedan ser retenidas por el filtro.
- **Transmitir potencia y movimiento:** se aprovecha la incompresibilidad del lubricante para transmitir fuerza y movimiento, principalmente para los sistemas de transmisión e hidráulicos. [9]
- **Controlar la temperatura:** el lubricante también absorbe y transfiere calor, sin embargo, este aumento de temperatura debe de controlarse ya que, puede ocasionar deterioro por oxidación y degradación térmica de sus moléculas, generando barniz, lodos y residuos carbonosos, que posteriormente obstruyen las líneas donde circula dicho aceite. [9]

3.2.1.4 Aditivos del lubricante

Los aditivos son compuestos orgánicos e inorgánicos, disueltos o suspendidos como sólidos en el lubricante. Estos se agregan al aceite base para mejorar sus propiedades y desempeño, ya que por sí solo no resiste las exigencias mecánicas y químicas requeridas en la lubricación. Estos aditivos pueden estar presentes entre un 0.1% a 30% del volumen del lubricante. [9]

Roles principales de los aditivos:

- ✓ Mejorar las propiedades ya existentes en el aceite base, como el uso de antioxidantes, inhibidores de corrosión, antiespumantes y demulsificantes.
- ✓ Suprimir propiedades no deseables en el aceite base, con el supresor de punto de fluidez y los mejores del índice de viscosidad
- ✓ Incorporar nuevas propiedades al aceite base, como el uso de detergentes, desactivadores de metal, agentes de adhesividad y para extrema presión. [9]

Funciones de los aditivos:

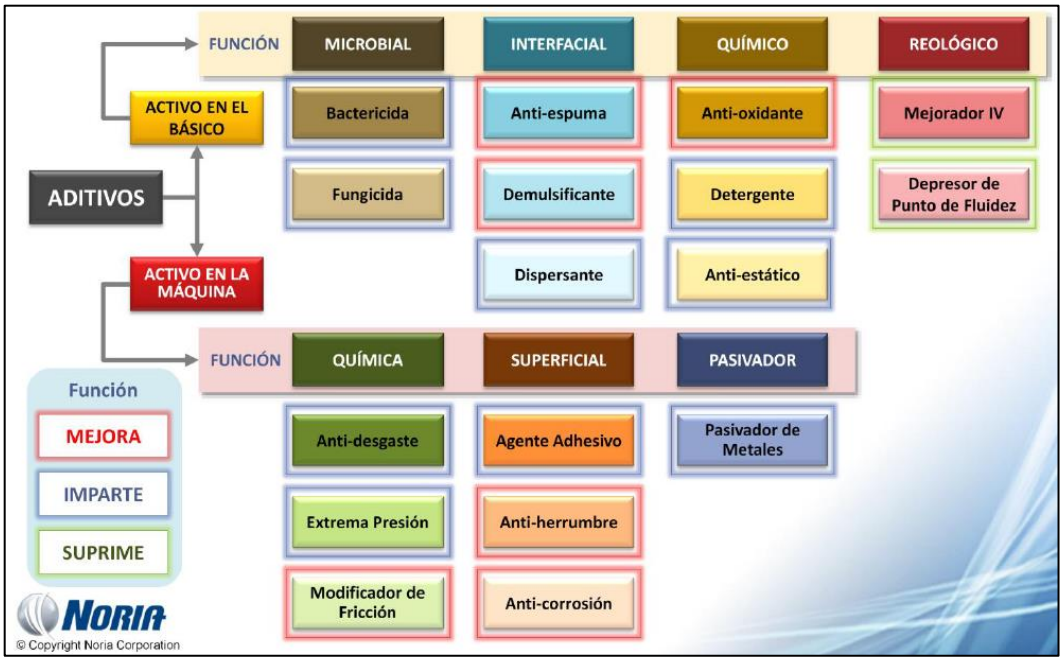


Fig. 11. Funciones de los aditivos del lubricante

- **Polaridad:** se define como la atracción inherente entre las moléculas de los aditivos con otros materiales polares en contacto con el aceite. La polaridad química es una propiedad de las moléculas que describe la diferencia de las cargas eléctricas de estas, actuando de las siguientes formas:

  - Envolviendo las partículas, los aditivos son atraídos por la partícula polar y la envuelven, ya sea para suspenderla o desactivarla (aditivo desactivador de metal, detergentes y dispersantes).
  - Protegiendo la superficie, la cabeza polar del aditivo se fija en la superficie de la maquinaria para protegerla del desgaste, la corrosión, la herrumbe, el agua y otros contaminantes (aditivo inhibidor de herrumbe y de corrosión, anti-desgaste y extra-presión).
  - Emulsionando, la cabeza polar del aditivo se fija en la gota de humedad para formar una emulsión y evitar que el agua libre dañe la maquinaria (aditivo emulsificante). [9]

- **Antioxidantes / inhibidores de oxidación:** La oxidación se produce cuando se combinan las moléculas de aceite con el oxígeno, degradándolo y generando ácidos, lodos, laca y barniz. La principal función de este aditivo es inhibir y neutralizar los radicales, cortando las cadenas de reacción y controlando la propagación de la

oxidación. Los principales antioxidantes son dialquilditiofosfato de zinc (ZDDP), fenoles, aminas aromáticas, fenatos y sulfonatos metálicos. [9]

- **Pasivadores de metales:** La reactividad de los metales no ferrosos producen solubilización de iones metálicos que posteriormente trabajan como pro-oxidantes. La principal función de este aditivo es crear una película protectora pasivadora en las superficies de los metales no ferrosos disminuyendo esta reactividad y evitando su efecto como catalizador. Los principales compuestos son el propileno diamina disalicideno, benzotriazol y toliltriazol. [9]
- **Detergentes:** La degradación térmica y oxidación del lubricante genera productos indeseables que se mezclan con el aceite. La principal función de este aditivo es inhibir la descomposición del aceite, suspendiendo los productos peligrosos formados y neutralizando los ácidos orgánicos de degradación e inorgánicos de la combustión. Los principales compuestos son los jabones metal-orgánicos como el calcio, magnesio y bario. [9]
- **Dispersantes / suspensión de partículas:** su propósito es suspender los subproductos de la combustión y de la degradación del aceite para minimizar la formación de lodos, disminuir el desgaste abrasivo y el incremento de la viscosidad. Forma enlaces con los compuestos polares y se une con partículas disueltas para evitar su aglomeración, disminuyendo la energía polar de las partículas para evitar su adherencia a superficies metálicas. Los principales compuestos son alquilsuccinimidas, ésteres alquilsuccinicos y productos de reacción de Mannich. [9]
- **Antiespumantes:** El aire en el tanque de aceite reduce la efectividad produciendo oxidación, problemas de fluidez y cavitación del lubricante. La turbulencia del aceite en el tanque y la diferencia de la tensión superficial entre el aceite y el aire permite que las burbujas al chocar se junten y puedan subir más fácil a la superficie. Este aditivo tiene una baja tensión superficial (21 dinas/cm) lo que previene la formación de espuma estable y evitando que el aire quede atrapado en el aceite, estableciendo una diferencia de tensión interfacial entre el aceite y el aire colapsando las burbujas grandes. Los principales compuestos son polidimetilpolisiloxano (metil-siliconas) en proporciones de 5 a 10 ppm y polímeros de acrilato en proporciones de 0 a 400 ppm. [9]
- **Demulsificantes:** El agua degrada los lubricantes, por lo que se requiere que el aceite se separe rápidamente para que no se formen emulsiones estables. Este aditivo acelera la velocidad de coalescencia de las gotas de agua pequeñas formando gotas de agua más grandes que se precipitan por su propio peso. Los principales compuestos son ácidos orgánicos sulfónicos de metales alcalinos como el bario y calcio, polietilenglicol y etoxilatos. [9]

- **Emulsificantes:** naturalmente el agua y el aceite se separan, sin embargo, hay algunas aplicaciones en las que se requiere de una emulsión de estos para proporcionar enfriamiento o resistencia al fuego, para esto el agua envuelve a las moléculas de aceite creando una emulsión inversa. Los principales compuestos son jabones de sodio o amina, ácidos nafténicos, sulfonato y sulfatos. [9]
- **Mejoradores del índice de viscosidad:** la relación viscosidad-temperatura del lubricante es importante para permitirle trabajar en entornos de alta y baja temperatura (aceite multigrado). Para esto se añade un polímero al lubricante que depende de la temperatura en la que trabaje. Al disminuir la temperatura la cola de este polímero se contrae haciéndolo menos soluble, por el contrario, aumentar la temperatura se solubiliza y la cola se expande contribuyendo a compensar la pérdida de la viscosidad. Además, este polímero se alinea con el movimiento, mejorando el flujo a baja temperatura. Los principales compuestos son copolímeros de olefinas (OCPs), etilen-propilen (EPRs), etilen-propilen dieno (EPDMs), polimetacrilato (PMAs) y polímeros de estireno-ester (SEs). [9]
- **Depresores del punto de fluidez:** es importante que el lubricante se mantenga fluido a bajas temperaturas, por lo que se debe prevenir que el aceite se coagule por la cristalización de las ceras del aceite base. Esta cristalización de las parafinas no puede suprimirse, sin embargo, los depresores del punto de fluidez alteran la morfología de los cristales de las ceras, inhibiendo la coagulación y evitando la solidificación del aceite, de tal manera que estos no afecten las propiedades de fluidez. Los principales compuestos son los naftalenos polialquilatados, polialquil metacrilatos, polímeros fenólicos y copolímeros de ésteres de maleato y fumerato. [9]
- **Inhibidores de herrumbe y corrosión:** el lubricante debe de proteger a la maquinaria repeliendo los compuestos corrosivos que atacan las superficies de esta. El aditivo forma una película protectora hidrofóbica en la superficie de la maquinaria, además de reaccionar o adherirse a los compuestos corrosivos para evitar que estos puedan atacar. Los compuestos principales son sulfonatos básicos (emulsificantes), ácidos fosfóricos, sulfuros de calcio, ácidos grasos de cadena larga, ZDDP, dispersantes, imidazol, benzotriazol y aminas. [9]
- **Anti-desgaste (AW) y extra-presión (EP):** se requiere que la película lubricante cuando la máquina arranca o se detiene, o cuando es sometida a cargas extremas de presión o choque pueda separar las superficies de la maquinaria y así disminuya el desgaste. Para esto los aditivos polares forman capas de absorción o quimisorción, que se activan con carga y alta temperatura, para reaccionar con la superficie metálica formando capas triboquímicas que previene el contacto directo entre los

metales. Los principales compuestos son dialquilditiofosfato de zinc (ZDDP-AD), tricresil fosfatos (TCP-AD), azufre-fósforo (SP-ED), trifenil fosforotionato (TPPT-EP). [9]

- **Ácidos grasos:** son utilizados en áreas donde se presentan bajas velocidades deslizantes, arranques y paros continuos, moderados incrementos en cargas y baja viscosidad a altas temperaturas, donde la película lubricante es del tipo mixta. Trabajan donde los AD y EP no lo hacen. Son compuestos polares solubles en aceite que forman finas mono-capas absorbidas físicamente, separando las superficies y disminuyendo el desgaste. Los compuestos principales son amidas y ácidos grasos orgánicos sintetizados, ácidos carboxílicos de cadena larga y ésteres de ácidos grasos. [9]
- **Sólidos para control de fricción y desgaste:** el lubricante expulsado en condición de película escasa o mixta requiere de elementos de protección que impida el desgaste. Para esto el aditivo debe tener bajo coeficiente de fricción y resistencia a la carga que permita que haya contacto entre la superficie metálica y el aditivo sólido sin desgaste. Los principales compuestos son disulfuro de molibdeno (AD y EP), grafito (EP), nitrato de boro (AD y EP) y teflón (PTFE-AD). [9]
- **Adhesividad:** algunas aplicaciones de requieren que el lubricante se mantenga adherido a la maquinaria para prevenir el contacto entre las superficies de la maquinaria durante el arranque. Es por ello que se utilizan polímeros de alto peso molecular para conseguir esa adherencia. Los compuestos principales son polímeros de isobuteno (PIB) y copolímeros de olefinas (OCP/PIB). [9]
- **Biocidas:** el lubricante para maquinarias también debe de prevenir la generación y crecimiento de bacterias y hongos, destruyendo y controlando el crecimiento de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos. Los principales compuestos son aldehídos (formaldehídos), O-formaldehídos, N-formaldehídos, aminas más formaldehídos, derivados fenólicos e isotiazoles (benzoisotiazol). [9]

3.2.1.5 Tipos de lubricación

Existen tres tipos principales de lubricación, o también llamados regímenes de lubricación, los cuales son:

a. Lubricación límite: es cuando se origina el movimiento relativo entre las piezas y no existe la película lubricante (contacto metal-metal), esto genera un momento crítico para la maquinaria, y el tiempo de permanencia en esta zona de lubricación es un factor clave, ya que se produce la fricción y desgaste máximos que conduce a fallas o afectaciones, reduciendo la expectativa de vida de los componentes. [9]

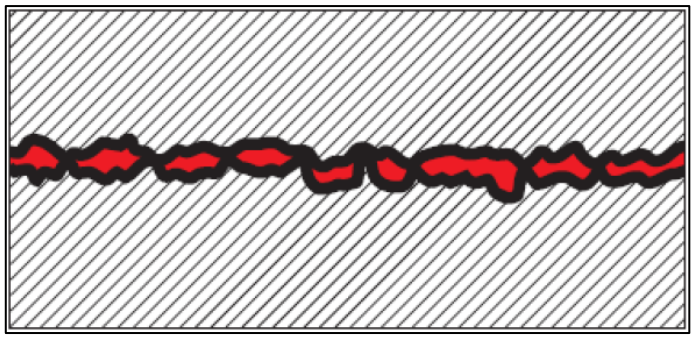


Fig. 12. Lubricación límite

Condiciones que ocasionan la lubricación límite:

- ✓ Paradas y arranques frecuentes
- ✓ Cargas de choque
- ✓ Baja velocidad
- ✓ Alta temperatura
- ✓ Baja viscosidad del lubricante

b. Lubricación mixta: es una combinación de lubricación límite y película lubricante. Cuando las superficies están parcialmente separadas debido al espesor de la película lubricante, y siendo esta película muy delgada, existe un contacto parcial entre las crestas de las dos superficies en el movimiento, originando rozamiento mixto. Aunque aquí también hay contacto metal-metal el desgaste es menor que en la lubricación límite. [9]

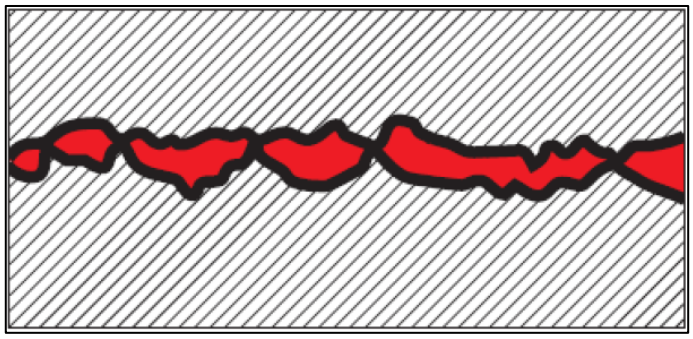


Fig. 13. Lubricación mixta

c. Lubricación de película completa:

- ✓ Lubricación hidrodinámica: es cuando los componentes están separados totalmente o casi totalmente por una "cuña" de aceite, la cual se produce hidrodinámicamente. [9]

  La formación de la película hidrodinámica depende de:

- La superficie geométrica de los componentes
- La velocidad nominal de funcionamiento
- La carga útil
- La viscosidad del aceite

La lubricación hidrodinámica no se logra en el arranque y se pierde cuando se para el equipo. Los cambios repentinos de velocidad y carga afectan la lubricación hidrodinámica.

En algunos casos, al arrancar, se utilizan bombas auxiliares (pre-lubricación) para crear presión interna y producir una película hidrodinámica antes del arranque capaz de soportar la carga, reduciendo así el coeficiente de fricción.

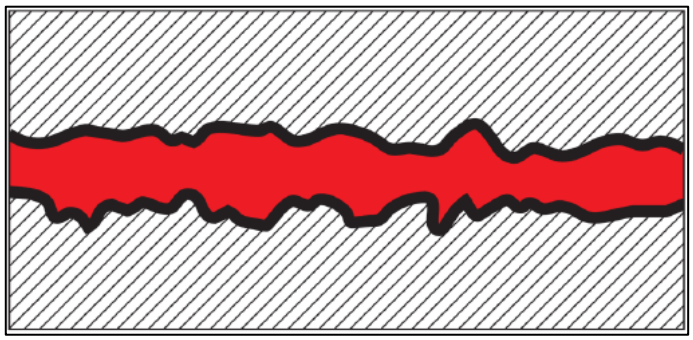


Fig. 14. Lubricación hidrodinámica

✓ Lubricación elastohidrodinámica (EHL): es muy similar a la lubricación hidrodinámica, sin embargo, esta solo se forma en geometrías de contacto rodantes, en donde las superficies convergen sobre:

- Un punto (rodamientos)
- Una línea (engranajes)

Este tipo de lubricación obtiene su nombre de la propiedad mecánica del material para sufrir deformaciones reversibles (módulo de elasticidad), que le permite crear una película lubricante en el punto o línea de contacto separando las superficies de los componentes. Esta película lubricante generada es muy delgada, a veces menor de una micra (µm) de espesor, por lo que las cargas transferidas ejercen una presión resultante muy alta, llegando a veces a 500,000 PSI.

Durante este período de presión transitoria, el aceite cambia de líquido a sólido en un instante, ocasionando la deformación de las superficies de los componentes en contacto. [9]

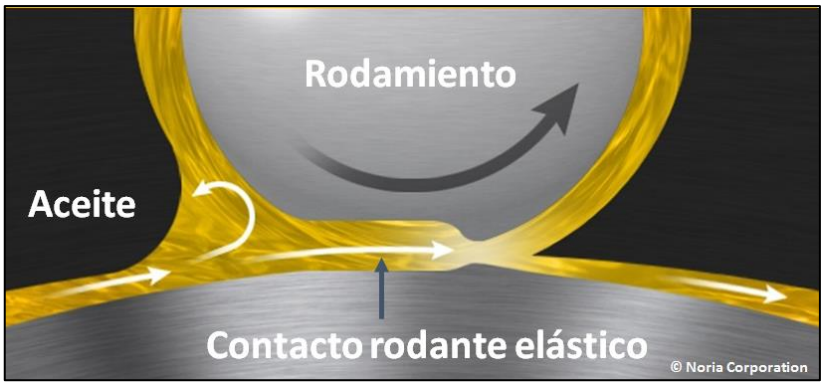


Fig. 15. Lubricación elastohidrodinámica

Estos tres tipos de lubricación suceden en un instante, y son identificados fácilmente en la llamada *curva de Stribeck*.

La curva de Stribeck es un concepto fundamental en el campo de la tribología, donde se observa que la fricción en un contacto lubricado por un fluido es una función no lineal de la carga de contacto, de la viscosidad del lubricante y de la velocidad de arrastre del lubricante. Esta investigación y descubrimiento original fue realizando por los ingenieros alemanes Richard Stribeck en 1902 y a Mayo D. Hersey, (1914) quienes estudiaron durante la primera mitad del siglo XX. [16]

La curva es una gráfica que demuestra como la fricción en los contactos lubricados se comporta como una función no lineal de la viscosidad, la velocidad y la carga de contacto, mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{\eta \,.\, v}{f}$$

Donde:

η: es la viscosidad dinámica, expresada en newtons-segundo por metro cuadrado $(^{N.s}/_{m^2})$

v: es la velocidad, expresada en metros cuadrados por segundo $(^{m^2}/_{s})$.

f: es la fuerza ejercida (carga), expresada en newtons (N).

Obteniendo un valor adimensional, también llamado número de Hersey (aplicado en el eje X), y comparándolo con los coeficientes de fricción (aplicado en el eje Y), obtuvo el siguiente gráfico:

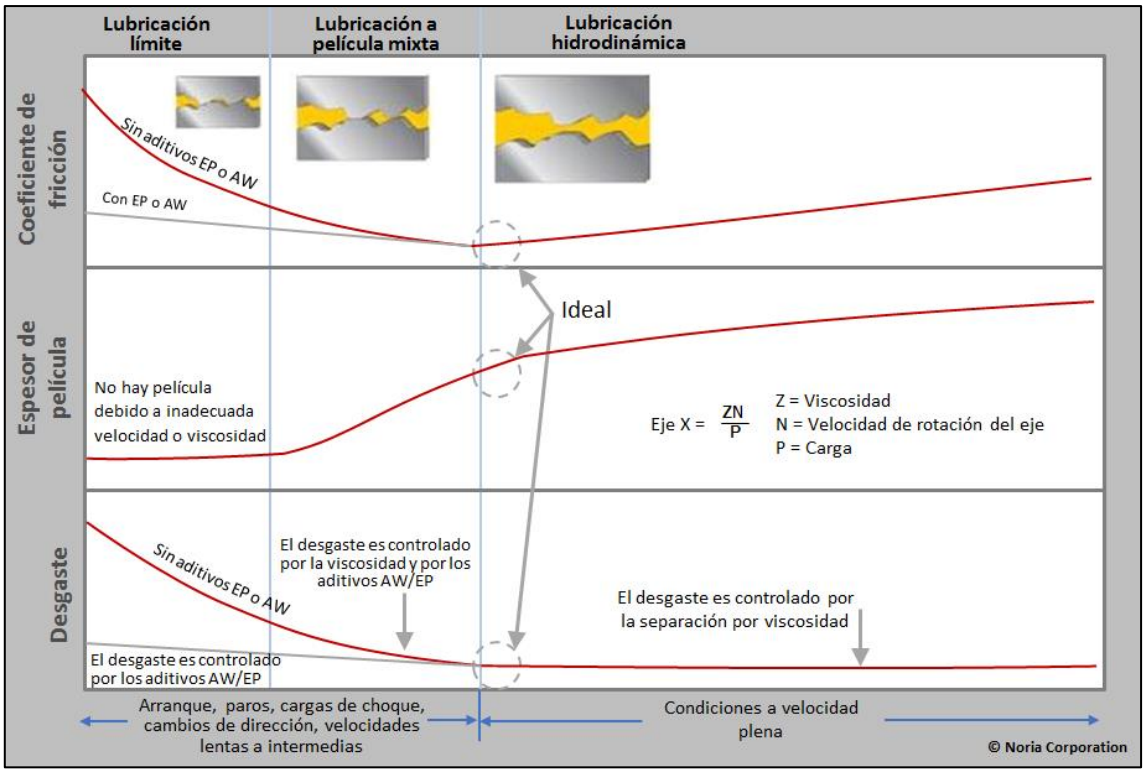
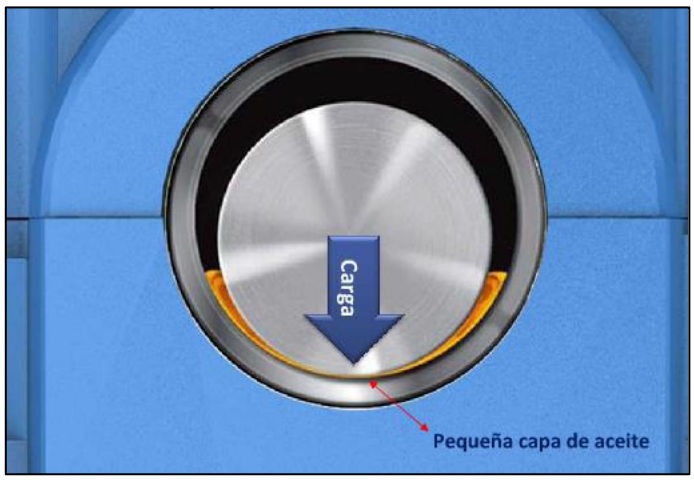


Fig. 16. Curva esquemática de Stribeck

Este gráfico muestra cómo la generación de la película lubricante es crítica en la reducción de la fricción y el desgaste de los componentes de las máquinas. [17]

Descripción gráfica de la curva de Stribeck:

a. **Reposo – lubricación límite:** Cuando el eje está en reposo y se apoya sobre el cojinete debido al peso que soporta, trata de desplazar la película lubricante y se presenta contacto, quedando solamente una delgada película lubricante entre los elementos (película límite).



La generación de la cuña de aceite es directamente proporcional a la viscosidad del aceite (η), la velocidad de rotación (V) es inversamente proporcional a la carga a la que está sometida el eje (F).

Fig. 17. Esquema de lubricación límite

b. **Inicio de movimiento – lubricación mixta:** el eje trata de rodar y de subir por el cojinete en dirección del movimiento. En ese espacio entre el eje y el cojinete, se va introduciendo cada vez más aceite, por acción del bombeo (giro) del eje, lo cual hace que poco a poco se vaya separando del cojinete (película mixta).

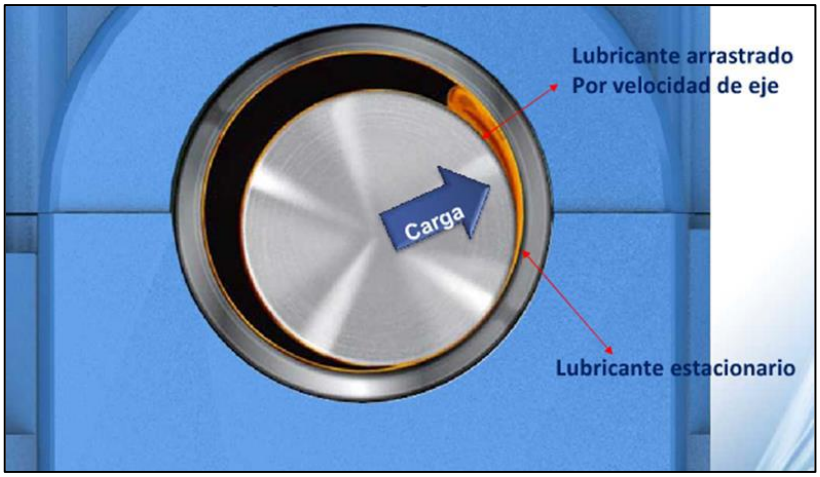


Fig. 18. Esquema de lubricación mixta

c. **Movimiento a plena carga – lubricación de película completa:** a medida que el giro del eje sobre el cojinete va alcanzando la velocidad normal de funcionamiento, el eje comienza a deslizarse sobre el aceite, haciendo la figura de que estuviera "flotando" (película completa).

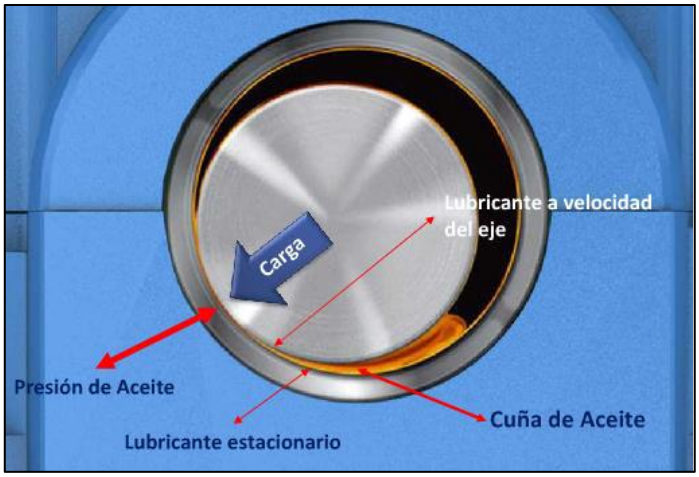


Fig. 19. Esquema de lubricación completa

3.2.1.6 Tribología

La tribología proviene del griego "tribo" que significa rozar o frotar, y de "logos" que significa tratado. [18]

Es la ciencia y tecnología que estudia a profundidad la relación entre la fricción, desgaste y lubricación entre la interacción de dos superficies en movimiento:

- ✓ La fricción entre dos cuerpos en movimiento
- ✓ El desgaste como efecto natural de este fenómeno
- ✓ La lubricación como un medio para reducir el desgaste [9]

3.2.2 Filtración del aceite

Según [9], "la contaminación es el mayor enemigo de los sistemas hidráulicos y mecanismos lubricados. Se genera en el interior o se introduce desde la atmósfera, privando a los componentes y al lubricante de cumplir su vida útil. Por tanto, la contaminación en el aceite es cualquier cosa que no debería de estar ahí".

La filtración de aceite es el proceso de eliminación de contaminantes del aceite. Estos contaminantes pueden provenir de una variedad de fuentes, que incluyen:

- ✓ Partículas: pueden ser virutas de metal (producto del desgaste interno de los componentes con los que interactúa), suciedad (tierra o polvo metálico de la operación) u otros desechos que se mezclan con el aceite.
- ✓ Agua: el agua puede mezclarse con el aceite a través de la condensación o fugas (deterioro de los empaques de tanques o respiraderos).
- ✓ Subproductos de oxidación: se forman cuando el aceite se descompone con el tiempo.
- ✓ Otros productos químicos: estos pueden provenir del combustible (falla de inyectores), el refrigerante (falla por los intercambiadores de calor) u otros fluidos que entran en contacto con el aceite.

Beneficios de la filtración de aceite:

- Reducción del desgaste: la filtración de aceite ayuda a eliminar los contaminantes que pueden causar desgaste y daños en los componentes del sistema, concluyendo en paradas no programadas, correctivos mayores o fallas catastróficas.
- Mejora del rendimiento: la filtración de aceite ayuda a mejorar el rendimiento de un sistema al reducir la fricción y el desgaste de sus componentes internos, como las bombas, motores, válvulas, etc., además previene la formación de sedimentos y barnices, que pueden bloquear los conductos de aceite y restringir el flujo.

- Reducción de costos: la filtración de aceite ayuda a mejorar la eficiencia de la maquinaria, reduciendo el consumo combustible o de energía eléctrica. También se genera un ahorro al extender la vida útil de los componentes por trabajar con un aceite más limpio.

Tipos de filtración según su instalación:

- Filtración en línea: Este es el tipo más común de filtración de aceite. Los filtros en línea se instalan en el sistema del aceite y retienen los contaminantes a medida que el aceite fluye a través de ellos.

  En la maquinaria podemos encontrar que ya vienen con los porta-filtros y filtros instalados. Estos filtros vienen instalados en serie con el circuito de bombas, motores, y actuadores hidráulicos. También es posible la instalación de filtros en paralelo, por si se desea optimizar la filtración y mejorar la salud del aceite, ya que muchas veces la filtración de diseño de la maquinaria no es suficiente.

- Filtración fuera de línea: este tipo de filtración se utiliza para eliminar los contaminantes del aceite que ya se ha utilizado. Por lo general se realiza para la recuperación de aceites usados (dializado de aceite).

3.2.2.1 Filtro de aceite

El filtro de aceite es un elemento muy importante en un sistema de lubricación, y al igual que el lubricante, sus características determinan su eficacia para la aplicación deseada. [19]

Su principal función es separar y recolectar las impurezas que circulan en el sistema, manteniendo el aceite con la mayor limpieza posible para que trabaje eficientemente. [19]

Tienen forma de cilindro o cartucho y en su interior tienen un material poroso que deja pasar libremente el aceite, pero retiene las impurezas que lo contaminan, los cuales pueden ser partículas metálicas, tierra, restos de mangueras o sellos, etc. [19]

Los filtros deben ser cambiados según frecuencia establecida por el fabricante o por condición del aceite según el tipo de operación.

Tipos de filtros por el tamaño de retención:

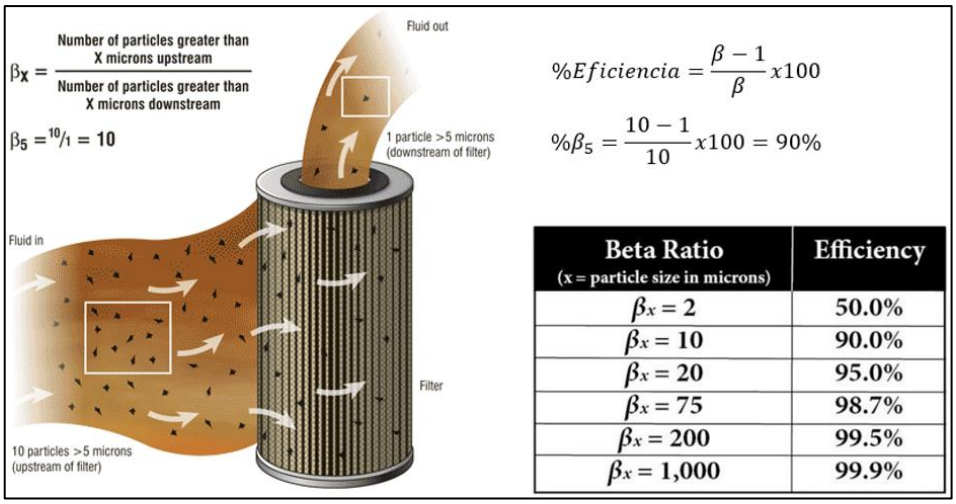
El tamaño de retención de partículas (SRP) es una medida de la capacidad de un filtro de aceite para capturar partículas. Cuanto menor sea el SRP, más pequeñas serán las partículas que el filtro puede capturar. Los filtros de aceite con un SRP más bajo son generalmente más caros, pero también brindarán una mejor protección.

Hay tres tipos principales de filtros de aceite según el tamaño de retención de partículas:

- ✓ Filtros de aceite de grado estándar: Estos filtros tienen un SRP de 30-40 µm. Pueden capturar partículas grandes, como virutas de metal y polvo, pero no pueden capturar partículas pequeñas, como vapores de aceite o el hollín.
- ✓ Filtros de aceite de alto rendimiento: Estos filtros tienen un SRP de 10-20 µm. Pueden capturar partículas más pequeñas que los filtros de grado estándar, lo que ayuda a mantener aún más limpio el aceite frente a estas partículas.
- ✓ Filtros de aceite de ultra alto rendimiento: Estos filtros tienen un SRP de 3-5 µm. Pueden capturar las partículas más pequeñas de todos los tipos de filtros de aceite. Sin embargo, es muy propenso a obstruirse, según la contaminación existente en el sistema.

Eficiencia de filtración:

La eficiencia de un cartucho filtrante no solo se determina por la fineza de filtración sino también a través de la capacidad de retención. Para determinar esto, se utiliza comúnmente la Prueba de Multipaso de acuerdo con el estándar ISO 16889, el cual es el resultado de la relación entre las partículas mayores de "X" µm que ingresan al filtro y las partículas mayores de "X" µm que salen del filtro. Este se indica con el valor βx. [9] Posteriormente, se puede calcular la eficiencia del filtro en porcentaje con la siguiente fórmula:



Beta Ratio (x = particle size in microns)	Efficiency
$\beta_x = 2$	50.0%
$\beta_x = 10$	90.0%
$\beta_x = 20$	95.0%
$\beta_x = 75$	98.7%
$\beta_x = 200$	99.5%
$\beta_x = 1{,}000$	99.9%

Fig. 20. Prueba de Multipaso ISO 16889

Tipos de filtros y separadores de partículas:

- Filtro de fibra de celulosa: Estos filtros son los más comunes, y son fabricados en configuración de cartuchos que pueden ser elementos (element) o enroscable (*spin-on*). Están hechos de papel plegado resistente en forma de cartucho y se utilizan principalmente para filtrar partículas grandes, donde son más efectivos. Sin embargo, si se mejora el papel filtrante con otros materiales como polipropileno y poliéster, puede ser aplicado para remover partículas más finas. [9]
- Filtro de microfibra de vidrio: Estos filtros tienen un mayor grado de filtración que los filtros de fibra de celulosa debido a su menor diámetro, mayor densidad de poros y porosidad de menor diámetro. Estos filtros pueden separar partículas de sedimentos de mayor densidad, así como partículas pequeñas separándolas fácilmente. [9]
- Separador centrífugo: Este filtro separa las partículas grandes fácilmente, haciendo girar el aceite dentro del filtro, mientras que las partículas queden adheridas a las paredes del filtro por la fuerza centrífuga generada. Su efectividad disminuye cuando las partículas pequeñas no se filtran lo suficiente o cuando la densidad del aceite es alta y las partículas pequeñas no se pueden filtrar. [9]
- Separador electrostático: Las partículas contaminantes quedan atrapadas por precipitación electrostática. Las partículas cargadas positivamente son atraídas al separador por una carga opuesta. Los separadores electrostáticos brindan un rendimiento excelente en la eliminación de partículas en suspensión como insolubles de óxidos y polímeros de carbono que provocan la formación de barniz en las superficies de los componentes. Sus propiedades dieléctricas se degradan debido a la presencia de vapor de agua almacenado en las paredes del separador. [9]

3.2.3 Análisis de la contaminación del aceite

Siguiendo el desarrollo del proyecto, hemos visto de que no es posible erradicar completamente la contaminación del aceite, desde su generación (régimen de lubricación) y tratamiento en el equipo según diseño de fábrica (filtración). Por lo que la única forma de tener una confiabilidad y disponibilidad adecuada de la maquinaria es controlando esta contaminación.

Para conseguir esto, se emplean muchas técnicas, una de las principales es el muestreo de aceite, el cual se define como un ejemplar representativo del fluido de un compartimiento o sistema que está en funcionamiento. También se puede tomar una muestra al aceite nuevo, para conocer las condiciones en las cuales está ingresando a la maquinaria.

Para que esta muestra sea de calidad, se deben cumplir los siguientes criterios:

- ✓ Punto de toma de muestra donde el lubricante fluya de manera turbulenta (codos de tuberías).
- ✓ Punto de toma de muestra específica, donde se pueda monitorear los componentes más importantes.
- ✓ Muestro de aceite en condiciones normales de operación (temperatura de trabajo).
- ✓ Muestreo de aceite en líneas de retorno al tanque, donde el aceite haya finalizado la lubricación de componentes.
- ✓ Limpieza de los conectores rápidos y dispositivos de muestreo (bomba de vacío) antes del muestreo.
- ✓ Respetar estrictamente la frecuencia de las tomas de muestra de aceite.

Estas muestras son enviadas a un laboratorio certificado, donde posteriormente en el análisis e informe emitido, podremos saber cuál es la salud del aceite, el nivel de contaminación, la cantidad de aditivos, viscosidad, etc.; así como el estado de los componentes que interactúan en el sistema, con la finalidad de:

- Desarrollar gráficos de tendencia de estado de componentes y del aceite, comparándolas con límites condenatorios indicados por el fabricante.
- Realizar seguimientos de muestras anteriores, por si algún valor está fuera de tendencia.
- Certificar la falla de un componente, para poder determinar los elementos que se desgastaron en gran cantidad y pudieron haber causado la falla.
- Identificar la fuente de los contaminantes, sea interna o externa.
- Identificar el tipo y nivel de desgaste de los componentes.

- Validar funcionamiento de los filtros, tomando una muestra antes y después de la filtración, para corroborar el funcionamiento del sistema de filtrado y la eficiencia de este.
- Generar líneas base, por si el componente o equipo son nuevos o vienen de alguna reparación. Por lo general se realizan en el asentamiento, 50 o 100 horas después de la puesta en marcha.

3.3 PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

Una posible solución ante la situación problemática planteada es instalar un sistema de microfiltración a bordo, el cual realiza un filtrado adicional en paralelo y tamaño de retención de partículas mucho menor al de configuración del equipo, para así separar la mayor cantidad posible de partículas en suspensión (Si, Fe, Cu, Al, etc.) y evitar que el aceite se degrade y contamine a altos niveles que puedan ser perjudiciales para el equipo. Con esto se intenta extender la vida útil del aceite, y, por ende, la vida útil de los componentes internos de la pala. La metodología que se aplicará a este proyecto será cuantitativa, del modelo experimental, ya que evidenciará como será el comportamiento de la contaminación del aceite con la implementación de este sistema de microfiltración, mediante los resultados de las muestras de este aceite enviadas al Laboratorio de Análisis de Fluidos (SOS) de la empresa Ferreyros. [20]

3.4 ETAPAS DEL PROYECTO

3.4.1 Selección del equipo de microfiltrado

Para la selección del equipo de microfiltrado, primero se tomó en cuenta la cantidad de aceite a filtrar y también el tamaño de éste. Para el primer dato nos guiamos del manual de servicio, el cual nos indica la capacidad de 6,400 L para todo el sistema y 4,000 L solo el tanque de retorno principal (véase Anexo 03).

Con este dato se buscaron distintas opciones en el mercado encontrándose la siguiente opción:

	SDU-M8	SDU-H8	SDU-H350
Para máquinas hasta	40 litros aceite motor / 400 kW potencia motor	400 litros aceite hidráulico	400 litros aceite hidráulico
Presión de entrada	2 - 6 bares	2 - 6 bares	5 - 350 bares
Cartucho filtrante	SDFC	SDFC	SDFC
Altura **Diámetro** **Diámetro de montaje** **Anchura** **Profundidad**	308 mm 217 mm 239 mm - -	308 mm 217 mm 239 mm - -	308 mm 217 mm 239 mm - -
Peso	7,6 kg	7,6 kg	9,2 kg
Conexión entrada	1/4" BSP Rosca exterior	1/4" BSP Rosca exterior	M 12 x 1,5 Rosca interior
Conexión salida	1/4" BSP Rosca exterior	1/4" BSP Rosca exterior	M 18 x 1,5 Rosca interior

SDU-H350 RK/TWIN	2S-350-C4	4S-350-C8	6S-350-C12
1.000 litros aceite hidráulico	1.000 litros aceite hidráulico	3.000 litros aceite hidráulico	más de 3.000 litros aceite hidráulico
5 - 350 bares	5 - 350 bares	5 - 350 bares	5 - 350 bares
SDFC	SDFC	SDFC	SDFC
255 mm - - 482 mm 235 mm	328 mm - - 570 mm 231 mm	328 mm - - 628 mm 447 mm	328 mm - - 865 mm 447 mm
19,9 kg	25,0 kg	44,0 kg	62,0 kg
M 12 x 1,5 Rosca interior	3/8" BSP Rosca exterior	3/8" BSP Rosca exterior	3/8" BSP Rosca exterior
15 L Rosca exterior	3/4" BSP Rosca exterior	3/4" BSP Rosca exterior	3/4" BSP Rosca exterior

Fig. 21. Catálogo de equipos de microfiltración de la marca KLEENOIL

El equipo de microfiltración seleccionado fue el modelo 6S-350-C12 de la marca KLEENOIL [21], el cual tiene una capacidad para más de 3,000 L, el cual cumple con el requerimiento.

3.4.2 Análisis técnico económico del proyecto

Para la viabilidad del proyecto, primero se comparó los costos de la estrategia actual de mantenimiento y la estrategia que podríamos tener con la instalación del equipo de microfiltración.

Para el segundo punto, fue necesario estimar en cuanto podría aumentar la frecuencia de cambio de aceite y reparaciones de componentes, y para este cálculo se usó la *Extensión Life Table* [22], una tabla construida tomando como base la norma ISO 4406, la cual solo utiliza los valores del código de limpieza mayores a 6 y 14 µm, y sirve para estimar un factor multiplicativo a las horas de vida del componente tomando como datos de intersección el valore actual del código de limpieza del aceite y el que se pretende obtener.

Para hallar el código de limpieza que se espera obtener con la aplicación de la microfiltración, revisamos la siguiente figura, indicada en el catálogo del fabricante KLEENOIL:

ISO 4406	Cantidad de partículas / 100 ml ≥ 4 µm	≥ 6 µm	≥ 14 µm	NAS 1638	
12/10/06	4.000	1.000	64	-	
12/10/07	4.000	1.000	130	1	
12/10/08	4.000	1.000	250	-	
13/11/08	8.000	2.000	250	2	
14/12/09	16.000	4.000	500	3	Rango de resultados en el caso de aplicación permanente de la filtración by-pass KLEENOIL
15/13/10	32.000	8.000	1.000	4	
16/14/11	64.000	16.000	2.000	5	
16/14/12	64.000	16.000	4.000	-	Rango de resultados predominante en caso de aplicación temporal de sistemas de filtración KLEENOIL
17/15/12	130.000	32.000	4.000	6	
18/16/13	250.000	64.000	8.000	7	
19/17/14	500.000	130.000	16.000	8	Clase de limpieza mín. requerida para hidráulica de alta presión y servo hidráulica
20/18/15	1.000.000	250.000	32.000	9	
21/19/16	2.000.000	500.000	64.000	10	
22/20/16	4.000.000	1.000.000	64.000	-	
22/20/17	4.000.000	1.000.000	130.000	11	Alta contaminación
22/20/18	4.000.000	1.000.000	250.000	-	
23/21/18	8.000.000	2.000.000	250.000	12	Elevada probabilidad de fallos de máquinas

Fig. 22. Rangos de resultados KLEENOIL indicados en códigos de limpieza ISO 4406 / NAS 1638

Como será la primera vez que se instale este sistema de microfiltración en la pala 6040FS, se estimó que se podría alcanzar un código ISO de 18/**16/13**, a expectativa de un código superior.

El último cambio de aceite hidráulico que tuvo la pala fue el 3/04/2022, y después de este cambio de aceite, los 2 primeros códigos ISO de las muestras fueron 21/**17/12** y 20/**18/14**.

Teniendo esos valores como código de limpieza actual, se realizó la intersección con el código de limpieza que se desea obtener (ISO 18/**16/13**) en la *Extensión Life Table*, como se muestra a continuación:

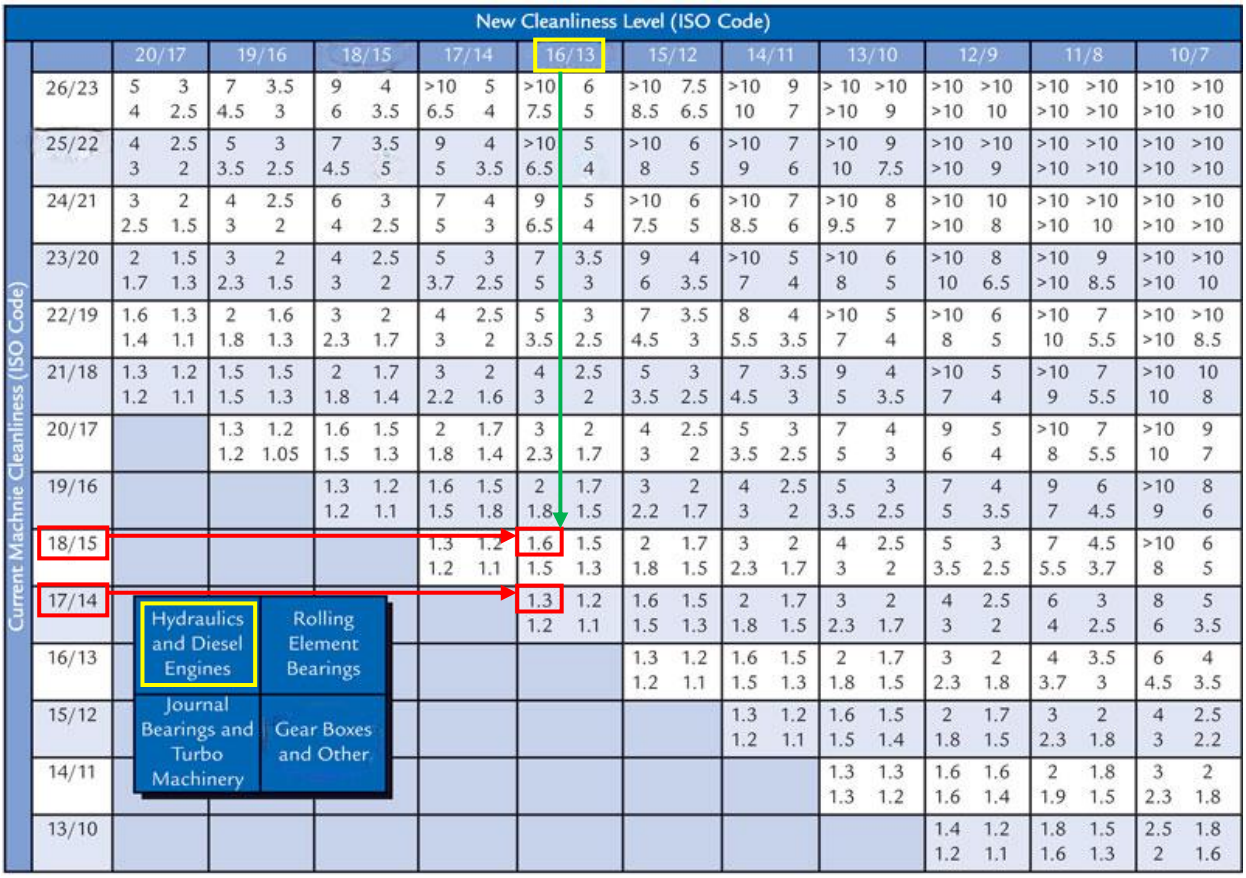


Fig. 23. Estimación del factor multiplicativo para el mejoramiento del código de limpieza ISO – *Extensión Life Table*

De la Fig. 23, se estima un factor multiplicativo entre 1.3 y 1.6, tomando como valor final 1.4, siendo este un factor más conservador para el siguiente análisis técnico-económico.

Para la simplificación del cálculo, tomaremos como referencia el trabajo anual de la pala (aproximadamente 5,500 horas) y con esto calcularemos los resultados en ahorros anuales.

TABLA III

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MICROFILTRACIÓN

Horas de trabajo anual de la pala 6040FS	5,500

Factor según Extensión Life Table	1.4

MANTENIMIENTO PREVENTIVO - LUBRICANTES

				ESTRATEGIA ACTUAL SIN MICROFILTRACIÓN			ESTRATEGIA RECOMENDADA CON MICROFILTRACIÓN		
Lubricante	Volumen (gal)	Costo de compra ($/gal)	Costo total por cambio ($)	Frecuencia de cambio (horas)	Cambios al año	Costo anual por cambio ($/año)	Frecuencia de cambio (horas)	Cambios al año	Costo anual por cambio ($/año)
Aceite hidráulico Mobiltrans HD 10W	1,691	9.7	15,390	6,000	0.9	**15,051**	10,000	0.6	**9,031**

MANTENIMIENTO PREVENTIVO - CONSUMIBLES

Repuesto consumible	Cantidad (und)	Costo de compra ($/und)	Costo total por cambio ($)	Frecuencia de cambio (horas)	Cambios al año	Costo anual por cambio ($/año)	Frecuencia de cambio (horas)	Cambios al año	Costo anual por cambio ($/año)
Filtro de retorno (tanque principal)	16	144.6	2,314	1,200	4.6	10,604	1,000	5.5	12,725
Filtro de retorno (reservorio de enfriamiento)	2	144.6	289	600	9.2	2,651	1,000	5.5	1,591
Filtros de alta presión (bombas de trabajo)	4	253.5	1,014	1,200	4.6	4,648	1,000	5.5	5,577
Filtros de carga de giro	3	113.6	341	1,200	4.6	1,562	1,000	5.5	1,874
Filtro de pilotaje (servo)	1	101.7	102	1,200	4.6	466	1,000	5.5	559
Elemento micro filtrante de fineza ≤ 1.0 µm	6	130	780	-	-	-	1,000	5.5	4,290
						19,931			**26,616**

INTERCAMBIO DE COMPONENTES PRINCIPALES

Componente	Cantidad (und)	Costo de reparación ($/und)	Costo total por reparación ($)	Frecuencia de reparación (horas)	Reparaciones al año	Costo anual por reparación ($/año)	Frecuencia de reparación (horas x fact.)	Reparaciones al año	Costo anual por reparación ($/año)
Cilindro de BOOM (pluma)	2	28,300.0	56,600	10,000	0.6	31,130	14,000	0.4	22,236
Cilindro de STICK (mango)	2	20,200.0	40,400	8,000	0.7	27,775	11,200	0.5	19,839
Cilindro de BUCKET (cucharón)	2	20,200.0	40,400	8,000	0.7	27,775	11,200	0.5	19,839
Cilindro de CLAM (compuerta de bucket)	2	11,000.0	22,000	5,000	1.1	24,200	7,000	0.8	17,286
Válvula de control de implementos	2	85,500.0	171,000	20,000	0.3	47,025	28,000	0.2	33,589
Bomba principal de trabajo	4	21,900.0	87,600	10,000	0.6	48,180	14,000	0.4	34,414
Bomba de giro	3	9,100.0	27,300	10,000	0.6	15,015	14,000	0.4	10,725
Swivel	1	22,100.0	22,100	10,000	0.6	12,155	14,000	0.4	8,682
Válvula de control de traslación	2	47,100.0	94,200	20,000	0.3	25,905	28,000	0.2	18,504
Motor de traslación	4	11,600.0	46,400	10,000	0.6	25,520	14,000	0.4	18,229
						284,680			**203,343**
					TOTAL	**319,662**		**TOTAL**	**238,990**

Con los valores obtenidos de ambas estrategias, podemos indicar que se estima un ahorro de US$ 80,672 anuales, sin embargo, para el primer año se le tuvo que descontar el monto de inversión por la adquisición e instalación del equipo de microfiltrado, el cual fue el siguiente:

TABLA IV
COSTO DE INVERSIÓN POR LA INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE MICROFILTRADO

Descripción	Costo ($)
Equipo de microfiltración 6S-350-C12, marca KLEENOIL	8,250
Mangueras y accesorios para instalación (fabricación local)	240
Mano de obra (1 mecánico cat. A, 01 mecánico cat. B, 1 soldador cat. B)	346
TOTAL	**8,836**

Por lo que del análisis técnico-económico, concluimos que con la instalación del sistema de microfiltración, podremos generar el primer año de trabajo un ahorro de US$ 71,836 y los años posteriores si poder llegar o incluso superar los US$ 80,672; ya que el aceite no será cambiado exclusivamente a las 10,000 horas de trabajo, sino que con el apoyo de la sub-área de mantenimiento predictivo y confiabilidad, se realizará seguimiento al desempeño del lubricante con este nuevo sistema, pudiéndose extender un poco más el uso de este aceite.

3.4.3 Designación del equipo de carguío

De las 04 palas que tenemos en operación, se decidió instalar a la PAL-01 puesto que de los reportes SOS que nos emitía la sub-área de mantenimiento predictivo y confiabilidad, esta pala era la que contenía mayor cantidad de Si y Al, metales presentes en el polvo de mineral que abunda en la mina. Además, era una de las palas que tenía los componentes con muchas horas de trabajo, muy cerca de su PCR (programación de reparación de componente), por lo que instalar el equipo de microfiltración para tratar de hacer rendir más esos componentes, era un gran reto por afrontar.

Fig. 24. Equipo de carguío PAL-01 de COSAPI MINERÍA

3.4.4 Revisión y ubicación de los componentes en el equipo

- ✓ Equipo de microfiltrado: Al ser un equipo de considerable peso y tamaño (especificaciones en Figura 2), se tenía que buscar un espacio con el tamaño adecuado y que no tenga exposición dentro de las áreas de tránsito del personal, por lo que se designó como ubicación de instalación detrás de la caja del condensador de la pala.

Fig. 25. Ubicación designada para la instalación del equipo de microfiltrado

Para la fijación del equipo de microfiltrado en la estructura indicada en la Figura 4, fue necesario fabricar unos soportes metálicos, los cuales permitían fijar correctamente el equipo de microfiltrado mediante pernos.

Fig. 26. Fabricación de soportes metálicos para fijación del equipo de microfiltrado

Según lo especificado por el fabricante KLEENOIL, este sistema de microfiltración debe de ser instalado en paralelo al sistema de filtración del propio equipo (tipo *by-pass*), esto con la finalidad de que sea lo menos invasivo posible. También lo ideal es instalarlo en una línea de retorno para poder aprovechar la presión residual del sistema y no tener que depender de otra bomba para impulsar el fluido hacia el equipo de microfiltrado, lo que generaría mayores recursos.

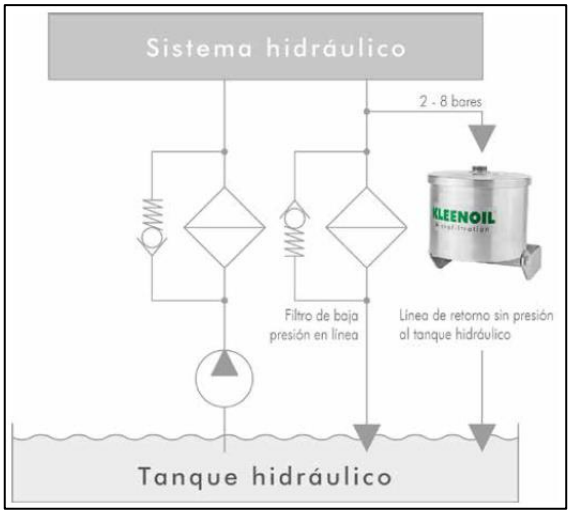


Fig. 27. Esquema de instalación del equipo de microfiltrado según fabricante KLEENOIL

- ✓ Punto de suministro: En revisión del plano hidráulico, se determinó tomar una de las salidas taponeadas del bloque de retorno de la válvula de control de implementos-traslación lado derecho, la cual tenía una presión de 12 bar.

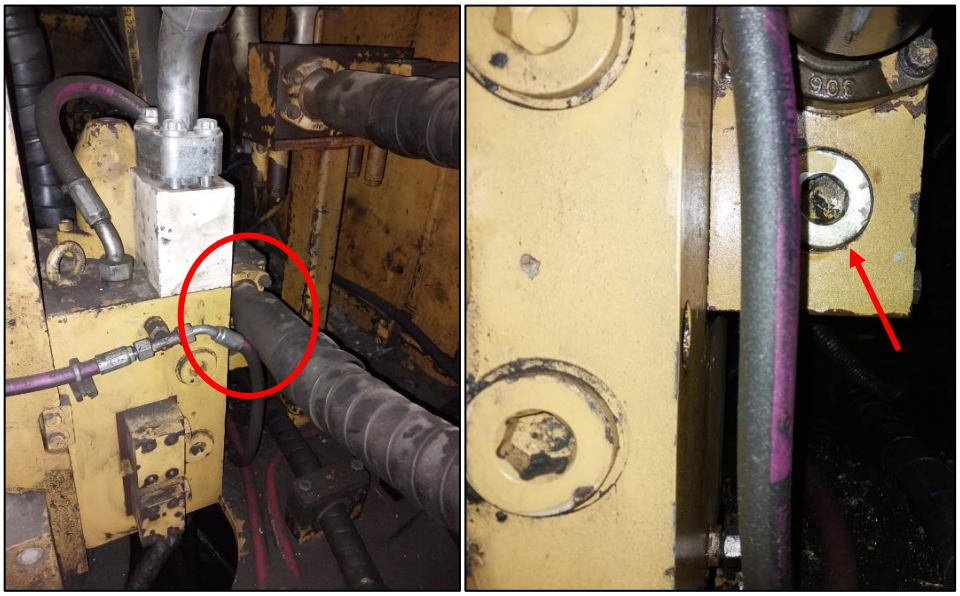


Fig. 28. Punto de suministro de caudal hidráulico para el equipo de microfiltrado

- ✓ Punto de descarga: tal como muestra la Figura 25, el retorno debía de ser instalado directamente al tanque hidráulico. Puesto que el tanque es cerrado y todas las entradas y salidas estaban conectadas, se tuvo que realizar una modificación en la tapa donde soporta los respiradores del tanque, colocándole un codo de 3/4" (soldado) para una conexión directa. Como este proceso no podía llevarse en la tapa que estaba instalada, se tomó una tapa usada que se encontraba en talleres y se realizó la modificación indicada, para posteriormente ser cambiada.

Fig. 29. Punto de descarga de caudal hidráulico hacia tanque principal

3.4.5 Instalación del equipo de microfiltrado

La instalación se realizó en el equipo el 01/12/22 según lo identificado.

Fig. 30. Instalación del equipo de microfiltrado en la pala

Para la instalación de la línea hidráulica del suministro al equipo de microfiltrado, se fabricó un acople especial para la salida del bloque de retorno, luego se conectó una manguera de 3/4" de diámetro y 4.5 metros de largo hasta el equipo de microfiltrado, donde antes del ingreso, se colocó una válvula antirretorno y una válvula de paso de tipo bola (llave de cierre).

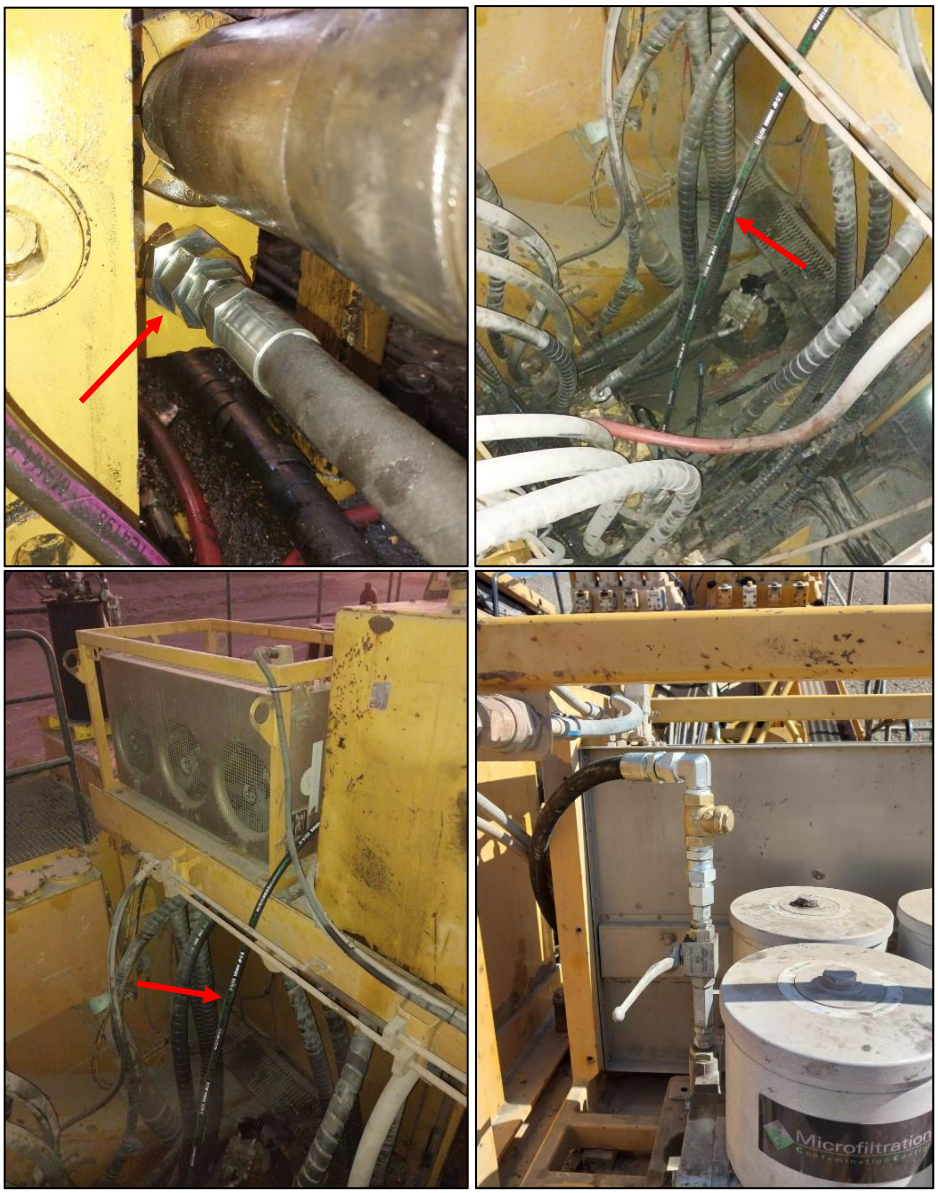


Fig. 31. Instalación de línea de suministro del equipo de microfiltrado

Para la instalación de la línea de descarga hacia el tanque hidráulico, se instaló una válvula antirretorno de 3/4" y se conectó una manguera de 3/4" de diámetro y 5.5 metros de largo hacia el ingreso de la tapa de respiraderos del tanque hidráulico que modificamos.

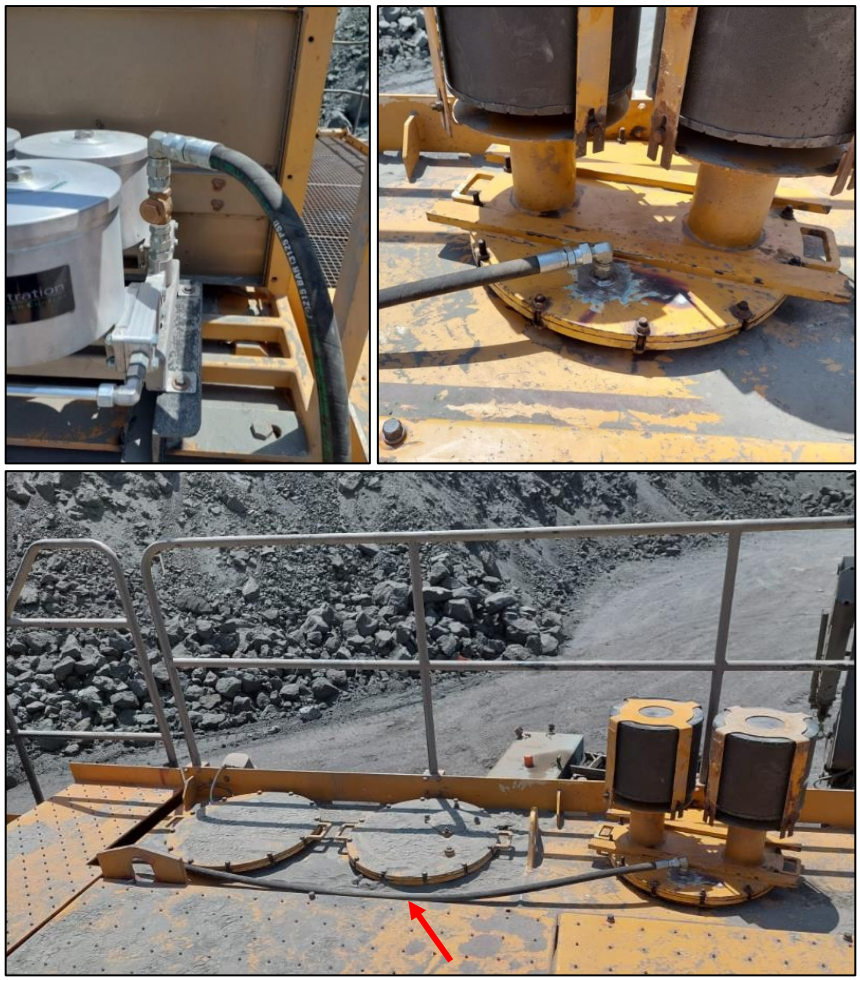


Fig. 32. Instalación de línea de descarga del equipo de microfiltrado

Fig. 33. Vista completa del equipo de microfiltrado conectado

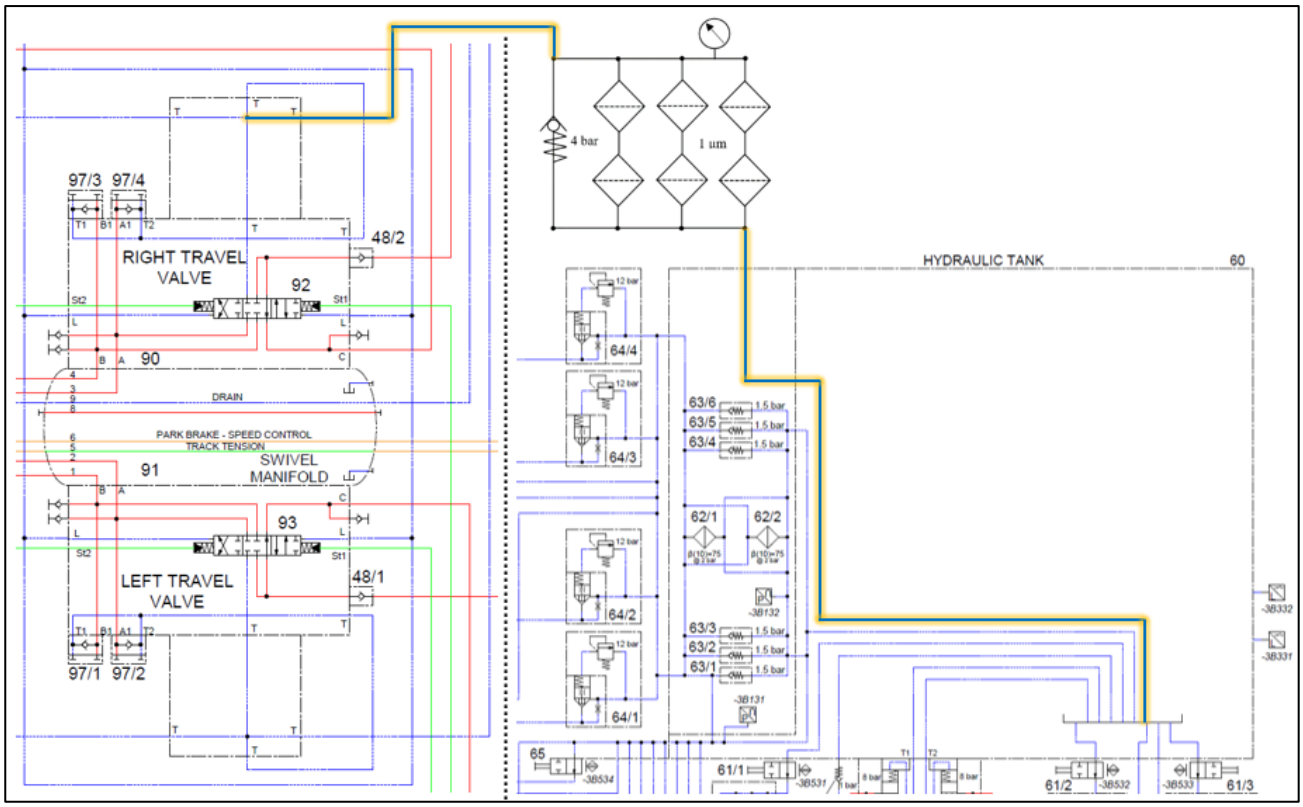


Fig. 34. Representación del equipo de microfiltrado instalado en el plano hidráulico de la pala 6040FS

3.4.6 Funcionamiento del equipo de microfiltrado

Una vez el aceite hidráulico es utilizado para el accionamiento de los cilindros de boom, stick o bucket, este retorna hacia las válvulas de control principal, para posteriormente llegar hacia el bloque de retorno de la válvula de control de implementos-traslación lado derecho. Es ahí donde parte de ese caudal de retorno es direccionado hacia el equipo de microfiltrado y el resto continúa su circuito normal.

Este equipo de microfiltrado consiste en 06 recipientes instalados en serie y paralelo, los cuales tienen un cartucho filtrante, compuesto de celulosa de fibras largas, polipropileno y poliéster. El funcionamiento de estos filtros se basa en la deposición por profundidad, es decir que, con una presión baja y un caudal ralentizado, el aceite atraviesa el cartucho axialmente reteniendo hasta micropartículas de 1 µm y el agua.

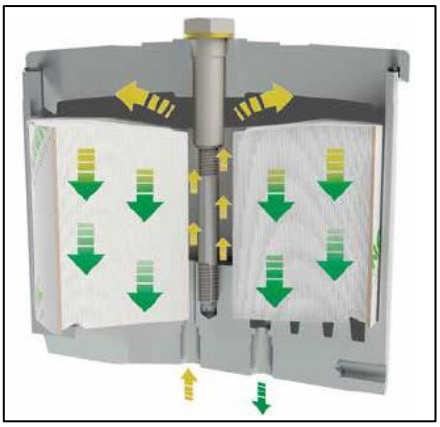


Fig. 35. Esquema de recorrido de aceite por el cartucho filtrante KLEENOIL

Estos cartuchos filtrantes también cuentan con una vida útil estimada, y según el fabricante aproxima esta vida útil al sistema donde se emplee y la severidad de la operación.

Empleo	Condición de empleo	Intervalo de cambio
Hidráulica móvil	Normal Severa*	500 h de servicio 250 h de servicio
Hidráulica industrial (locales cerrados / operación continua)	Normal Severa*	2.000 h de servicio 1.000 h de servicio
Engranajes en el sector industrial	Normal Severa*	2.000 h de servicio 1.000 h de servicio
Motor - trafico de corta distancia, máquinas de obras publicas	Normal Severa*	20.000 km / 500 h de servicio 15.000 km / 250 h de servicio
Motor - trafico de larga distancia, motores estacionarios	Normal Severa*	60.000 Km / 1.000 h de servicio 30.000 Km / 500 h de servicio

Fig. 36. Intervalos de cambio de los cartuchos filtrantes según fabricante KLEENOIL

Una vez el aceite termina de recorrer los 06 cartuchos filtrantes, sale directamente por una manguera hacia el tanque hidráulico, sin ninguna otra restricción, para que el aceite limpio depositado, pueda ser succionado por las bombas de la pala.

3.4.7 Monitoreo de comportamiento de la microfiltración

Para el correcto seguimiento del comportamiento de la microfiltración en el sistema hidráulico, nos apoyamos de las muestras de aceite recolectadas por la sub-área de mantenimiento predictivo y confiabilidad, las cuales se toman en cada mantenimiento preventivo (cada 300 horas). Para el seguimiento al proyecto, se redujo la frecuencia de muestro del aceite cada 150 horas aproximadamente, salvo se requiera realizar una contramuestra.

Fig. 37. Punto de muestreo y muestras de aceite del tanque hidráulico.

Estas muestras son enviadas al Laboratorio de Análisis de Fluidos (SOS) de la empresa Ferreyros [20], debidamente rotulados con toda la información posible tanto del aceite como del equipo y componente del cual se tomó la muestra. Una vez en el laboratorio, este aplica las siguientes técnicas para descifrar el estado del lubricante:

- ✓ **Análisis de desgastes, contaminantes y paquete de aditivos:** permite analizar los 22 elementos metálicos comúnmente presentes en un fluido de forma cuantitativa, según la clasificación de la Norma ISO 4406, mediante la técnica de espectroscopía de emisión por un equipo de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP),

- ✓ **Análisis de contaminantes:** muestra los niveles de hollín, oxidación, nitración, sulfatación y restos de contaminantes como agua, glicol y combustible, mediante la técnica de espectroscopía de emisión por un equipo de análisis infrarrojo.

- ✓ **Análisis de la viscosidad:** determina la viscosidad del aceite en centistokes (cSt) a 100°C mediante un viscosímetro cinemático de alta temperatura.

- ✓ **Análisis ferromagnético (PQ):** identifica el nivel de partículas ferromagnéticas presentes en cualquier tipo de aceite, mediante un equipo de desechos ferrosos.

Con todos estos análisis que se realizan a las muestras de aceite, el Laboratorio de Análisis de Fluidos (SOS) nos emite un informe y tendencia de estado del lubricante el cual podemos descargar de su plataforma S.O.S. Services Web.

Este informe principalmente detalla lo siguiente:

- Partículas metálicas presentes en el fluido, en ppm.
- Aditivos presentes en el fluido, en ppm.
- Contaminantes presentes en el fluido, en ppm.

- Código ISO del fluido.
- Interpretación y recomendaciones según los valores anteriores.

Con estos valores, respecto a los valores de fábrica del lubricante Mobiltrans HD 10W [23], podremos determinar qué tan desgastados están sus aditivos (horas de trabajo en el equipo), que tan contaminado está el fluido por partículas metálicas (desgaste de los componentes) o que tan contaminado está el fluido por agentes externos (polvo, agua, etc.).

Luego de haber enviado las muestras, estos son los resultados y tendencias hasta abril del 2023:

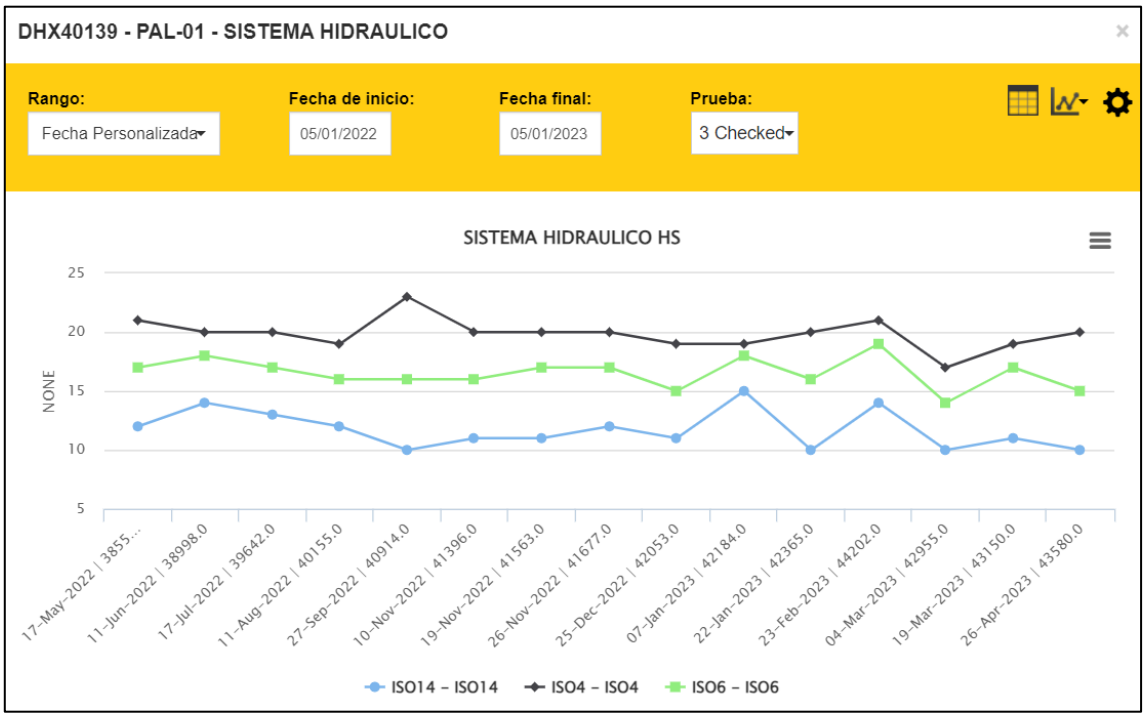


Fig. 38. Gráfico de tendencia del código de limpieza ISO de la PAL-01

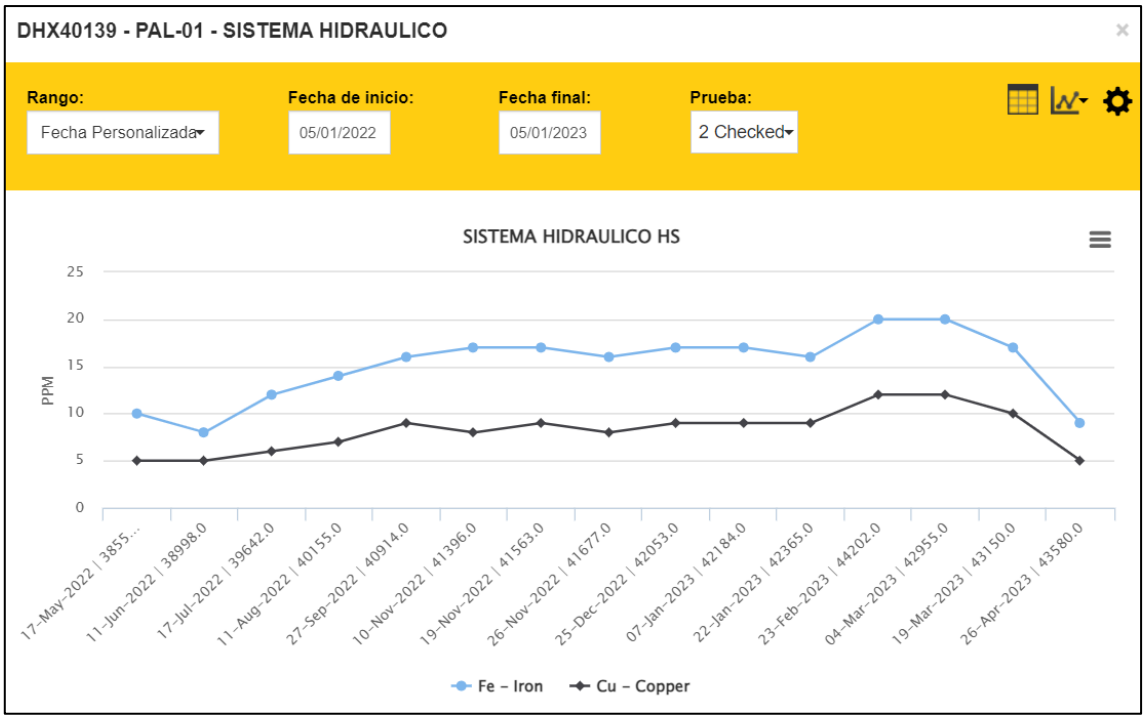


Fig. 39. Gráfico de tendencia del código metales de desgaste de la PAL-01

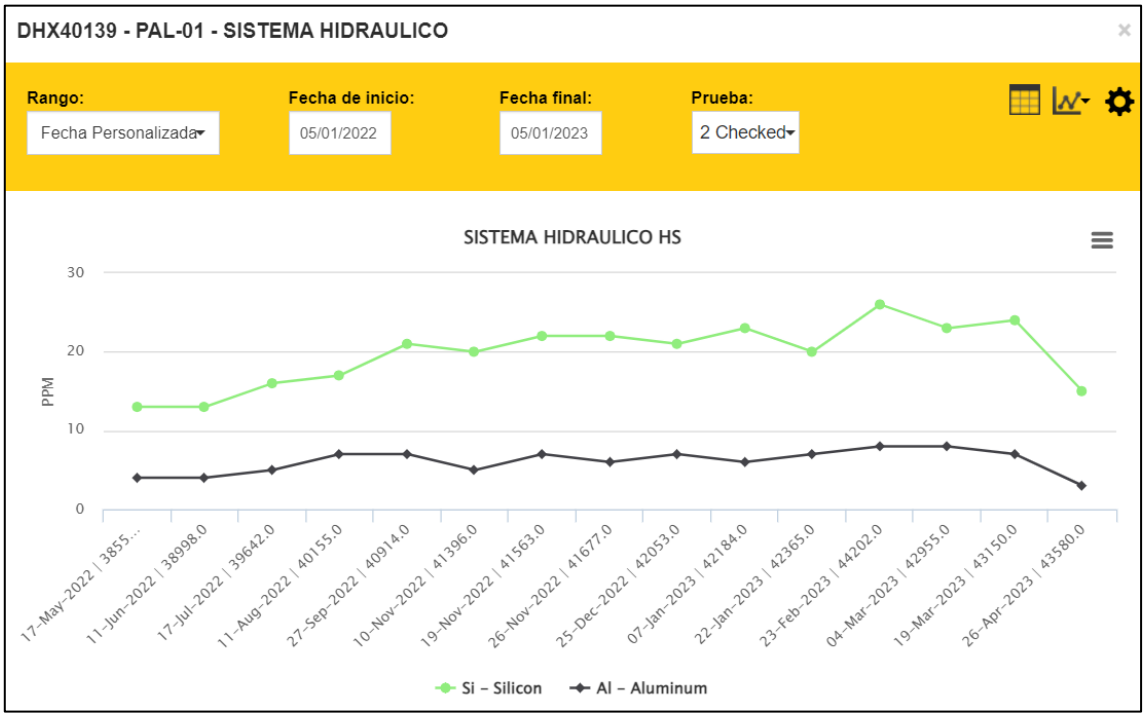


Fig. 40. Gráfico de tendencia del código metales de contaminación externa de la PAL-01

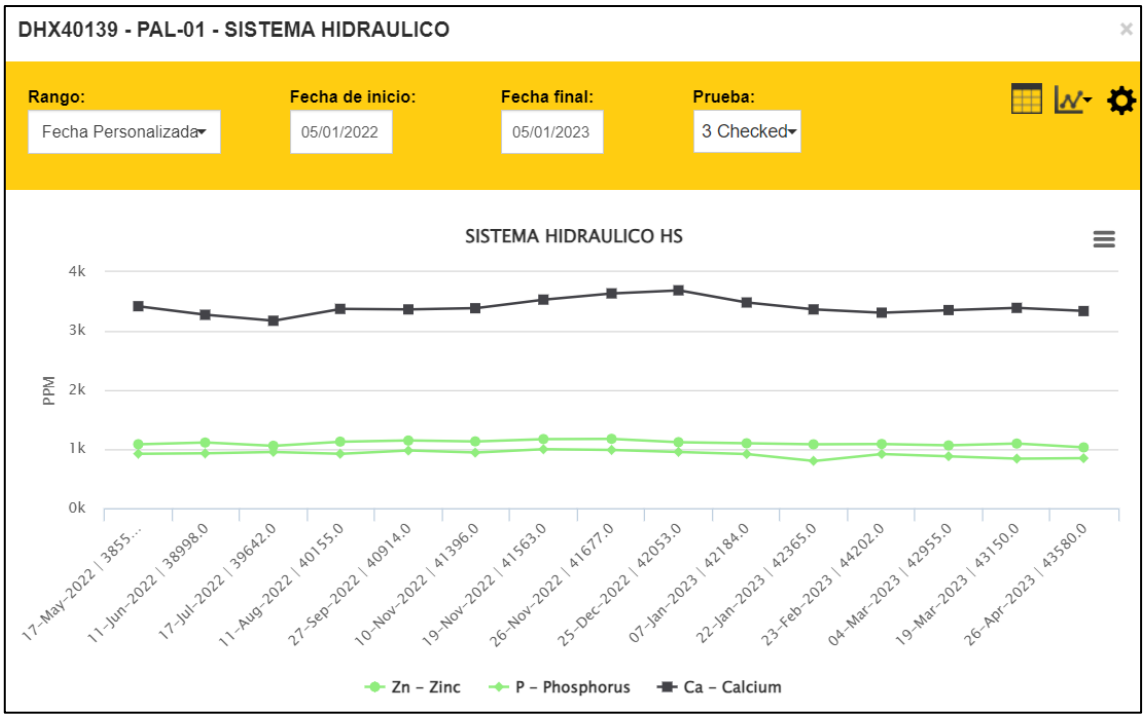


Fig. 41. Gráfico de tendencia del código metales de aditivos de la PAL-01

TABLA V

RESULTADOS DE LAS MUESTRAS DE ACEITE DE LA PAL-01 ANTES Y DESPUÉS DE LA MICROFILTRACIÓN

					METALES DE DESGASTE		METALES DE CONTAMINACIÓN		METALES PRESENTES EN LOS ADITIVOS		
FECHA DE MUESTRA	**HORÓMETRO DE EQUIPO**	**HORAS DE ACEITE**	**CÓDIGO ISO**	**ÍNDICE DE PQ**	**HIERRO (Fe)**	**COBRE (Cu)**	**ALUMINIO (Al)**	**SILICIO (Si)**	**CALCIO (Ca)**	**FÓSFORO (P)**	**ZINC (Zn)**
17/5/2022	38,550	836	21/17/12	42	10	5	4	13	3419	922	1084
11/6/2022	38,998	1,284	20/18/14	40	8	5	4	13	3274	929	1112
17/7/2022	39,642	1,928	20/17/13	40	12	6	5	16	3173	954	1058
11/8/2022	40,155	2,441	19/16/12	39	14	7	7	17	3374	922	1128
27/9/2022	40,914	3,200	23/16/10	39	16	9	7	21	3365	977	1146
10/11/2022	41,396	3,682	20/16/11	44	17	8	5	20	3385	942	1132
19/11/2022	41,563	3,849	20/17/11	42	17	9	7	22	3531	999	1171
26/11/2022	41,677	3,963	20/17/12	49	16	8	6	22	3636	987	1175
25/12/2022	**42,053**	**4,339**	**19/15/11**	**38**	**17**	**9**	**7**	**21**	**3688**	**954**	**1119**
7/1/2023	42,184	4,470	19/18/15	43	17	9	6	23	3482	918	1100
22/1/2023	42,365	4,651	20/16/10	41	16	9	7	20	3365	802	1082
23/2/2023	42,402	4,688	21/19/14	45	20	12	8	26	3310	918	1088
4/3/2023	42,955	5,241	17/14/10	36	20	12	8	23	3354	880	1064
19/3/2023	43,150	5,436	19/17/11	38	17	10	7	24	3391	840	1095
26/4/2023	43,580	421	20/15/10	36	9	5	3	15	3337	847	1030

Primera muestra después del cambio de aceite

Primera muestra después de la instalación del sistema de microfiltración

CAPÍTULO IV: APORTES A LA INSTITUCIÓN

Como aporte a la institución y al área de mantenimiento de equipos en la cual se desarrolló el proyecto, se plantea una solución alterna al control de contaminación existente, con la cual podemos obtener mejores resultados que la filtración convencional y además de eso, puede ir instalado en el equipo y trabajar con la propia energía del equipo (presiones de retorno).

Anteriormente para tratar de recuperar la salud del lubricante, se instalaba en la pala un equipo dializador de aceite, el cual tenía que estar instalado en el equipo entre 4 a 6 horas para filtrar la mayor cantidad de aceite posible, puesto que era un equipo de filtrado mucho más pequeño y con filtros de hasta 4 µm. También tenía que ser alimentada con energía eléctrica proveniente de otra fuente (moto-soldadora, luminaria, etc.) para su funcionamiento. Generalmente este dializado se programaba durante las intervenciones preventivas.

Con este nuevo sistema de microfiltrado a bordo, se busca la mayor filtración de partículas (hasta 1 µm), en tiempo real y sin afectar el funcionamiento normal de la pala. A mayor retención de partículas, podremos asegurar la extensión de las horas de trabajo del aceite y la extensión de la vida útil de los componentes hidráulicos, que finalmente aterriza en ahorro de costos a la empresa tanto en mantenimiento preventivo como correctivo.

Adicionalmente, hay reconocimientos importantes como lo es la “reducción de huella de carbono”, “ranking de excelencia ambiental” y demás, que son importantes dentro del sector minero, puesto que denotan que la empresa busca de que sus actividades en el rubro impacten lo menos posible al medio ambiente, buscando un desarrollo sostenible en la minería. Este proyecto plantea beneficios como lo es la reducción del consumo del aceite hidráulico, y por ende menor uso de hidrocarburos, lo que podría ser motivo para la obtención de este tipo de reconocimientos.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este proyecto, se concluye que es posible mejorar el control de contaminación del aceite hidráulico, y por ende extender el uso de este lubricante. Sin embargo, cabe mencionar que también se tuvo evidencia de que los metales presentes en los aditivos del aceite van disminuyendo con el uso de este sistema de microfiltración.

El aceite Mobiltrans HD 10W de la marca Mobil que se usa en esta pala, es un aceite del Grupo II, al cual en su formulación se le añaden aditivos anti-desgaste (AW) y extra-presión (EP), como el zinc (Zn) y fósforo (P) para que pueda cumplir con las exigencias requeridas en el sector industrial y minero. Esta disminución de aditivos es perjudicial para el aceite Mobiltrans HD 10W, puesto que son los que ayudan al aceite base de este lubricante para que tenga las propiedades de aplicación en un sistema, y sin estos aditivos, pues se volvería nuevamente aceite base, el cual no tiene las propiedades necesarias para la protección de las superficies en contacto por sí mismo.

Entonces, vemos que el sistema de microfiltración por una parte si cumple disminuyendo el código ISO, lo que se traduce en que no hay tanta cantidad de partículas de tamaños de 4, 6 y 14 µm fluyendo con el lubricante, pero también hay degradación del aceite al quitarle estos aditivos. Estos aditivos anti-desgaste, según lo revisado en los fundamentos de lubricación, tienen la propiedad principal de la polaridad, lo que hace que las moléculas de aditivo “encierren” la partícula metálica dispersa, y al pasar por el equipo de microfiltrado, retiene esta partícula junto con el aditivo, generando que poco a poco estos aditivos queden retenidos en el filtro, ocasionando que el lubricante disminuya su composición de aditivos, volviéndolo un lubricante no apto para la aplicación para lo que inicialmente se propuso.

RECOMENDACIONES

- ✓ Para poder obtener todos los beneficios de la microfiltración, se recomienda que se migre el aceite del sistema hidráulico a un lubricante del Grupo III, el cual está compuesto casi en su totalidad por aceite base (más refinado) y en su mayoría está exento de aditivos metálicos.

- ✓ En caso de que por un tema de costos o estrategia no se pueda migrar a un aceite del Grupo III, se recomienda el uso de aditivos externos, los cuales en los casos en los que el lubricante pierda estos aditivos, pueda compensarlo y restaurar la cantidad de ppm y así poder seguir trabajando en la aplicación designada. Sin embargo, para este ejercicio se requiere de una alta precisión y especialización.

- ✓ Para evitar la excesiva contaminación del tanque hidráulico, también se recomienda elevar la altura de trabajo de los respiradores del tanque, ya que se evidenció que los filtros respiraderos salían mojados, y esto es producto de que al momento de giro o traslado de la pala, se generan olas de aceite dentro del tanque, que llegan a mojar los filtros respiradores por su ubicación cercana y por ende las partículas de polvo quedan adheridas, y al volver a pasar una ola de aceite, esas partículas de polvo ingresan directamente al tanque, generando una fuente directa de contaminación.

- ✓ Al ser el sistema hidráulico el más importante de la pala, se recomienda que el muestreo de aceite sea cada 150 horas o 1 vez por semana, para así poder tomar las medidas necesarias respecto al estado del lubricante, como cambio de filtros, inspecciones por contaminación externa o incluso cambio de aceite.

- ✓ Diariamente, se recomienda una inspección minuciosa principalmente en lo que son las líneas hidráulicas, para poder detectar y corregir a tiempo las fugas, que son fuentes principales de contaminación. También se recomienda la medición de presiones del sistema hidráulico cada 600 horas o 1 vez por mes, para así asegurar el correcto funcionamiento de las bombas y evitar cavitaciones.

- ✓ Elaborar un plan de codificación y cambio de las mangueras por horas de trabajo, principalmente las que interactúan con el sistema de alta presión, con esto podríamos evitar paradas correctivas no programadas por cambio de mangueras (fuga, rotura, etc.), ya que, durante estos cambios de mangueras, se eleva la probabilidad de ingreso de contaminación al sistema, y más si el equipo se encuentra en frente de carguío y no por mantenimiento.

- ✓ Cumplir el programa de cambio de componentes por horas de trabajo, puesto que, si bien se puede controlar la contaminación del sistema para evitar mayores daños, si un componente ya cumplió con la expectativa de vida útil, este desgaste o desprendimiento de material será inevitable y solo estaríamos aplazando el cambio del componente.

- ✓ Instalar un equipo contador de partículas junto al equipo de microfiltrado, con este equipo podríamos saber en tiempo real cual es el código ISO del fluido antes y después de ingresar por el equipo de microfiltrado. Con esto podríamos saber que tanta es la efectividad del sistema de microfiltración a bordo instalado y que tan limpio es el aceite que está retornado al tanque hidráulico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] E. K. Villanueva Cruz, *Regeneración del aceite usado en los camiones Komatsu 930 ES, a través del sistema de micro filtrado para reducir costos en la Compañía Minera Antamina Huaraz-2020,* Chimbote, Perú: Universidad César Vallejo, 2020.

[2] J. P. Ames Porras, E. Meza Puchoc y S. A. Liberato Duran, *Diseño de un sistema de limpieza para aceite de motores diésel mediante filtros centrífugos portables,* Huancayo, Perú: Universidad Continental, 2021.

[3] J. L. Rodríguez Pereda y J. N. Sopla Vilchez, *Sistema de regeneración de aceites lubricantes para su reutilización en máquinas de voladura minera, La Libertad,* Trujillo, Perú: Universidad César Vallejo, 2022.

[4] COSAPI, «Cosapi Minería - Servicios Mineros,» 2024. [En línea]. Available: https://www.cosapi.com.pe/Site/Index.aspx?aID=1778.

[5] COSAPI, «Cosapi Minería - Nosotros,» 2024. [En línea]. Available: https://www.cosapi.com.pe/Site/Index.aspx?aID=1785.

[6] COSAPI, «Cosapi Minería - Proyectos,» 2024. [En línea]. Available: https://www.cosapi.com.pe/Site/Index.aspx?aID=2616&pg=1.

[7] COSAPI, «¿Qué es SCOPe?,» 2024. [En línea]. Available: https://intranet.cosapi.com.pe/scope/.

[8] PEOPLESOFT LAT, «¿Qué es Oracle PeopleSoft?,» 2022. [En línea]. Available: https://peoplesoft.lat/que-es-oracle-peoplesoft/.

[9] D. Troyer y J. Fitch, Oil Analysis Basics, México: Noria Latín América, 2004.

[10] Oiltanking GmbH, «El Proceso de Refinación de Petróleo,» 2015. [En línea]. Available: https://www.oiltanking.com/es/publicaciones/glosario/el-proceso-de-refinacion-de-petroleo.html.

[11] Noria Latín América, «Clasificación de bases lubricantes por API 1509,» Noria Corporation, 2024. [En línea]. Available: https://noria.mx/lube-learn/analisis-de-aceite/clasi-cacion-de-bases-lubricantes-por-api-1509/.

[12] Noria Latín América, «ISO Viscosity Grades,» *Machinery Lubrication,* vol. V, pp. 1-6, 2001.

[13] A. Barron y P. Raja, Physical Methods in Chemistry and Nano Science, Texas: Rice University, 2019.

[14] Noria Latín América, «La viscosidad cinemática explicada,» Noria Corporation, 2020. [En línea]. Available: https://noria.mx/lube-learn/lubricacion-maquinaria-lube-learn/certificacion-mltii/la-viscosidad-cinematica-explicada-2/.

[15] ROSHFRANS, «Diferencias entre el aceite monogrado y el multigrado,» 2023. [En línea]. Available: https://www.roshfrans.com/blog/diferencias-entre-el-aceite-monogrado-y-el-multigrado.

[16] Wikipedia, «Curva de Stribeck,» 2023. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Curva_de_Stribeck#:~:text=La%20curva%20de%20Stribeck%20es,velocidad%20de%20arrastre%20del%20lubricante..

[17] Noria Latín América, «Qué es la tribología,» Noria Corporation, 2023. [En línea]. Available: https://noria.mx/lube-learn/que-es-la-tribologia/.

[18] Wikipedia, «Tribología,» 19 04 2024. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Tribolog%C3%ADa.

[19] Grupo Herres, «¿Qué es un Filtro de aceite, cómo funciona y qué tipos existen?,» 2019. [En línea]. Available: http://www.grupoherres.com.mx/filtro-de-aceite/.

[20] FERREYROS, «Laboratorio de Análisis de Fuidos (SOS),» FERREYROS S.A., 2019. [En línea]. Available: https://www.ferreyros.com.pe/servicios/laboratorio-de-analisis-de-flujos-sos/.

[21] KLEENOIL PANOLIN AG, «KLEENOIL Microfiltration,» 2016. [En línea]. Available: https://www.kleenoil.com/de-wAssets/docs/KLEENOIL/KLEENOIL_Microfiltration_ES.pdf.

[22] Noria Latín América, «Cómo maximizar los intervalos de cambio de aceite,» Noria Corporation, 2024. [En línea]. Available: https://www.machinerylubrication.com/Read/29903/oil-change-intervals.

[23] Exxon Mobil Corporation, «Mobiltrans HD Series,» *Mobil Commercial Vehicle, Peru*, pp. 1-2, 2022.

ANEXOS

ANEXO 01 Intervalos de servicio – Manual de operación y mantenimiento Pala 6040FS Caterpillar-Bucyrus

INSPECTION AND SERVICING PLANS – INSTRUCTIONS

Servicing Intervals

The inspection and servicing plan lists all jobs which have to be done on the machine at regular intervals.

The individual inspection and servicing plans are marked with letters providing a link between the operating hours (OH) recorded by the hours-run meter of the machine and the inspection and servicing plans.

Plan	Do all jobs ….
V	…once prior to initial commissioning.
N	…after initial commissioning and during the running-in period (after 100 OH).
T	…every 10 OH or every working shift [1)]
W	…every 60 OH or weekly .[2]
B	…after every 500 OH.
C	…after every 1000 OH.
D	…after every 5000 OH.
E	…after every 10000 OH.
OH = Bh = Operating hours	

Oils / Lubricants

For the specification of oils and lubricants to be used refer to the "LUBRICANTS / CONSUMABLES" section.

The numerals mentioned in the "Oil / Lubricant" column in the inspection and servicing plans have the following meaning:

I	Oils for combustion engines and compressors
II	Oils for hydraulic systems
IIIa, b	Oils for gearboxes
V	Lubricants for bearings and swing rings

Cleaning jobs

Cleaning jobs, especially on cooling systems, must be done at shorter intervals if the machine is exposed to severe dust build-up.

Components

The maintenance intervals for components, e.g. electric motor and gearboxes, are listed in the following CGM-HMS GmbH maintenance schedules.

It is possible that the manufacturer's documentation for these components states intervals deviating from the above-mentioned intervals.

In such case, only the maintenance intervals specified by CGM-HMS GmbH shall apply.

ANEXO 02 Instrucciones de servicio para mantenimiento del sistema hidráulico – Manual de operación y mantenimiento Pala 6040FS Caterpillar-Bucyrus

Plan **A** – after every 250 OH
(at 250, 750, 1250 … OH)

Plan **B** – after every 500 OH
(at 500, 1500, 2500 … OH)

Plan **C** – after every 1000 OH
(at 1000, 2000, 3000, 4000 … OH)

Plan **D** – after every 5000 OH
(at 5000, 15000, 25000 … OH)

Plan **E** – after every 10000 OH
(at 10000, 20000, 30000, … OH)

Location	Servicing work	Menge / No.	Plan A	Plan B	Plan C	Plan D	Plan E
Hydraulic system	Check pressure (see Service Manual)				●	●	●
Oil cooler							
- Bearing							
- Fastening bolts	Check for tightness				●	●	●
- Rubber bearing	Check condition				●	●	●
Return-flow filter	Replace	2 x 7			●	●	●
- Magnetic rod	Check / clean	2		●	●	●	●
- Bypass valve	Check / clean filter sieve	2 x 3			●	●	●
- O-Ring of filter chamber cover	Replace	2 x 1			●	●	●
Filterhousing (cooling circuit)							
- Return-flow filter	Replace	2			●	●	●
- Bypass valve	Check / clean filter sieve	2			●	●	●
- Magnetic rod	Check / clean	1			●	●	●
High-pressure filter (working hydraulics)	Replace	4				●	●
Filter (pump control circuit)	Replace	2 x 1				●	●
Filter (servo circuit)	Replace	1				●	●
Filter (swing charge pump)	Replace	2 x 2				●	●
Hydraulic oil reservoir	Carry out oil analysis	1		●	●	●	●
	Change oil	1 [7 8]					●
- Breather filter	Replace	2			●	●	●
Pressure accumulator	Check pressure (see Service Manual)	5			●	●	●
Cylinder (seals and guide rings)	Replace						●

ANEXO 03 Capacidades de llenado de lubricantes y grasa – Manual de operación y mantenimiento Pala 6040FS Caterpillar-Bucyrus

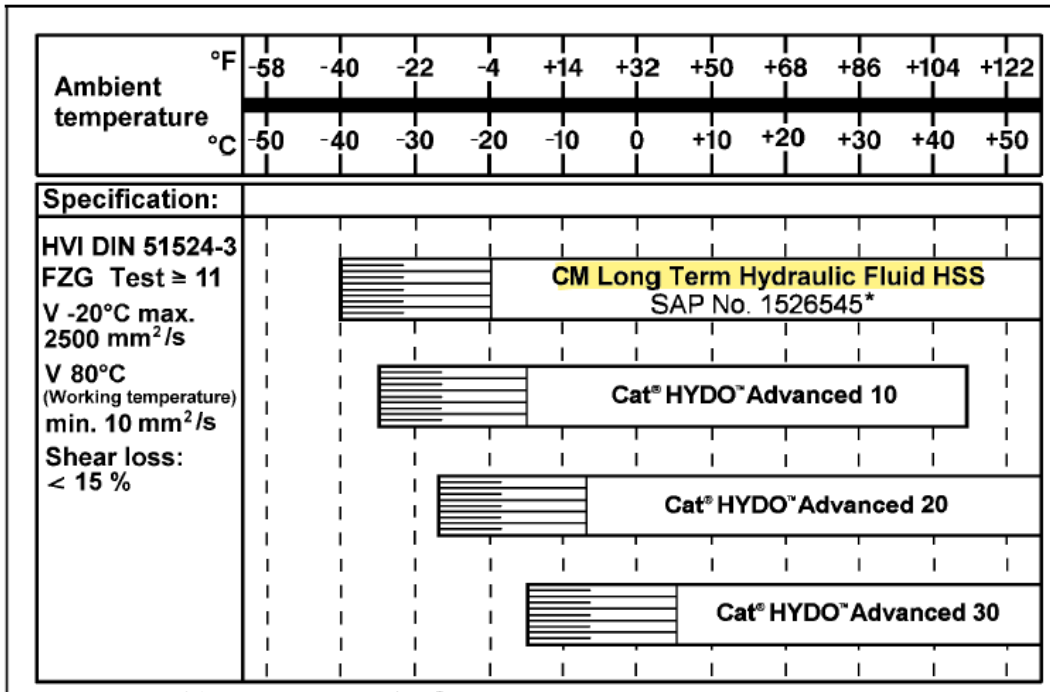
Filling quantities - oil

Location	Filling quantity		Oil
	litres	gal	
Hydraulic oil reservoir Hydraulic system	appr. 4000 appr. 6400	appr. 1057 appr. 1690.7	II
Pump drive gearbox - Pre-chambers, expansion reservoirs	appr. 149 1 x appr. 10	appr. 39.4 1 x appr. 2.6	III.a
Swing gearbox	3 x appr. 38	3 x appr. 10	III.b
Travel gearbox - Spur gear section - Pre-chambers	2 x appr. 80 2 x appr. 10 4 x appr. 0,3	2 x appr. 21.1 2 x appr. 2.6 4 x appr. 0.08	III.a
On-board crane (if equipped) - Crane drive engine - Hydraulic oil reservoir	 appr. 5.5 appr. 50	 appr. 1.45 appr. 13.2	 I II

Filling quantities - other

Location	Filling quantity	
	litres	gal
Fuel tank, crane drive engine (if equipped)	appr. 20	appr. 5.3
Screen washer	appr. 13	appr. 3.4

II. Oil for hydraulic system (selection)



* Barrel with 205 L volume (54.2 US gal)

Warming – up phase necessary before commencing operation.
Warm up hydraulic system for approx. 10 minutes, running at half speed and with repeated actuation of control valves.
Oils for lower temperatures can be quoted on request.

8002191

ANEXO 05 Tamaño de retención de partículas de los filtros del sistema hidráulico – Manual de operación y mantenimiento Pala 6040FS Caterpillar-Bucyrus

2.3.7 Filter elements for hydraulic system

Designation	rating [µm]	Quantity
High pressure filter element for working pumps	100	4
Return flow filter element for Hydraulic tank	10	7
Return flow filter element for oil cooling system		2
Filter element - feed line swing circuit	40	3
Filter element - servo circuit	6	1
Air breather filter - hydraulic tank		2
Bypass valve-screen - hydraulic tank	screen size 0.5 mm	6
Bypass valve-screen - return comp. oil cooling		2