Oil dialysis system based on ISO 4406 standard to optimize lubricant use and extend the life of internal components in cat 785C trucks in an open-pit mining operation.

Chávez- Diaz Wiles Fredi, Ingeniero Industrial[1], y Quispe-Vásquez Luis Roberto, Doctor en Ciencias Económicas[2]
[1,2]Universisdad Privada del Norte, Perú, *wiles.chavez@hotmail.com* , *luisquiva05@gmail.com*

Abstract– In response to the need to enhance sustainability in mining operations, this study proposes the optimization of the oil dialysis process for CAT 785C mining trucks, aiming to reduce lubricant consumption and extend the service life of critical components. The proposal focuses on improving the cleanliness of hydraulic and axle oils in accordance with the ISO 4406 standard, through the implementation of online particle counting technology and oil recovery tanks. The results estimate a 35% reduction in lubricant consumption during the first year, reaching up to 70% in subsequent years, along with a 25% increase in component durability. The financial analysis confirms the technical and economic feasibility of the project, showing a Net Present Value (NPV) of USD 696,622 and an Internal Rate of Return (IRR) of 171% over a six-year period.

Keywords-- Maintenance, Oil Dialysis, ISO 4406, Lubricant Contamination.

Sistema de diálisis de aceites basado en la norma ISO 4406 para optimizar el uso de lubricantes y prolongar la vida útil de los componentes internos en camiones CAT 785C de una operación minera a cielo abierto.

Chávez- Diaz Wiles Fredi, Ingeniero Industrial[1] y Quispe-Vásquez Luis Roberto, Doctor en Ciencias Económicas[2]
[1,2]Universisdad Privada del Norte, Perú, *wiles.chavez@hotmail.com, luisquiva05@gmail.com*

***Resumen*– Ante la necesidad de mejorar la sostenibilidad en la minería, este estudio propone optimizar la diálisis de aceites usados en camiones mineros CAT 785C, con el objetivo de reducir el consumo de lubricante y prolongar la vida útil de sus componentes. La propuesta se basa en mejorar la limpieza de los aceites hidráulicos y de ejes, conforme a la norma ISO 4406, mediante el uso de nuevos equipos con tecnología de medición en línea y tanques de recuperación. Se estima una reducción del consumo de lubricante del 35 % en el primer año y de hasta el 70 % en los años siguientes, junto con un aumento del 25 % en la durabilidad de los componentes. El análisis financiero respalda la viabilidad del proyecto, con un VAN de 696 622.00 USD y una TIR del 171 % a seis años.**

***Palabras clave*-- Mantenimiento, Diálisis de Aceite, ISO 4406, Contaminación de Lubricantes.**

I. Introducción

Hasta el año 2025, en el sector automotriz, vehicular y flota pesada el consumo mundial de lubricantes ha mostrado un crecimiento constante como se muestran los datos que en el año 2020 el consumo global de lubricantes se estimó en 37 millones de toneladas métricas, y se espera que para 2028 supere los 38 millones [1]. En el sector automotriz, se proyecta que el mercado de lubricantes pase de 22 mil millones de litros en 2024 a 27 mil millones en 2029, con un crecimiento anual del 3.52% [2]. Este aumento se atribuye al avance tecnológico, la expansión del mercado automotor y la creciente demanda de mantenimiento industrial. No obstante, estas proyecciones pueden verse afectadas por factores económicos y regulatorios.

El consumo de lubricantes en la minería peruana ha crecido de forma sostenida, impulsado por la expansión del sector y la creciente demanda de minerales vinculados a las energías limpias. Empresas de lubricantes como “Mobil” han fortalecido su posición en el mercado ofreciendo productos de alto rendimiento y soporte técnico especializado [3]. La minería continúa siendo clave para la economía del país, y el uso eficiente de lubricantes es esencial para el mantenimiento de maquinaria, ante al aumento de la demanda de lubricantes, se han desarrollado soluciones más sostenibles, como los biolubricantes. Según el representante de Primax, se proyecta que el mercado de lubricantes en Perú experimente un crecimiento anual del 3% durante los próximos tres años, impulsado principalmente por proyectos mineros y de infraestructura. En este contexto de expansión, el sector de lubricantes para la minería muestra una alta competitividad, con Mobil (Terpel) liderando el mercado con una participación del 23.09%, seguido por Shell con 15.90% y Castrol con 14.42%.

Por otra parte, la contaminación de los lubricantes constituye un problema crítico en la industria minera, ya que incluso niveles mínimos de impurezas, como agua o partículas sólidas, pueden afectar gravemente el rendimiento y la durabilidad de los componentes. Un ejemplo ilustrativo es que una presencia de apenas 1% de agua en el aceite puede reducir hasta en un 90% la vida útil de un rodamiento [4]. En esta misma línea estudios revelan que la contaminación de los lubricantes en las maquinarias aumenta el consumo del mismo entre un 31% a un 33% debido a cambios anticipados de componentes o por la necesidad de limpiar componentes contaminados, reparaciones imprevistas originando paradas no programadas de la maquinaria y reducen la disponibilidad del equipo y afectan a los indicadores de producción y productividad minera.

En el contexto minero peruano se tiene un desafío importante ya que la maquinaria pesada como los camiones CAT 785C están expuestos a condiciones operativas extremas, lo que incrementa la probabilidad de contaminación en los lubricantes, y acelera el desgaste de los componentes, eleva los costos de mantenimiento y genera un consumo excesivo de aceites. La falta de una adecuada gestión en la limpieza de lubricantes no solo compromete la eficiencia operativa, sino que también representa una carga económica considerable para las empresas del sector [5]. En correlación las operaciones mineras a tajo abierto presentan problemas serios, como el consumo excesivo de lubricantes y el desgaste acelerado de componentes en camiones CAT 785C causado por la falta de un mantenimiento adecuado y la ausencia de un sistema eficiente de diálisis de aceites además de la contaminación de los lubricantes usados como son el SAE-10W y SAE-60 lo que genera mayores costos operativos, paradas no programadas, reducción de la vida útil de los componentes con reemplazos promedio de 4.1 a 4.6 años con costos promedio de $7845 y $52935; sin embargo la vida útil puede extenderse hasta 10

años si se realiza un mantenimiento adecuado y un uso de lubricantes limpios y libre de contaminaciones.

El proceso de diálisis de aceites lubricantes es una técnica de limpieza y regeneración que permite prolongar la vida útil del aceite al eliminar contaminantes que afectan su rendimiento especialmente en sistemas hidráulicos y de lubricación previniendo hasta el 40% de los costos de mantenimiento relacionados con fallas en los equipos [6]. En el ámbito de estudio de la presente investigación se utiliza un sistema de diálisis para los aceites hidráulicos HD10W y del eje posterior HD 60, estos no se logran mantener en los niveles establecidos por la norma ISO 4406: 2021[7] , ya que está limitado por falta de tanques recuperadores, ausencia de contadores de partículas en tiempo real, bajo rendimiento de las bombas y deficiencias el proceso de filtración obligando a realizar cambios de lubricantes antes de las 2400 horas programadas.

El uso de lubricantes en minería está regulado por normas ambientales que exigen una gestión responsable como es el cumplimiento de disposiciones del Ministerio del Ambiente y del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), la implementación de sistemas de manejo seguro de residuos (Norma Técnica Peruana NTP 900.050:2022), la promoción de lubricantes biodegradables y el uso de plataformas digitales como SOFIA o SOS Web para monitorear la salud de los aceites y prevenir contaminación. Teniendo como referencia la norma ISO 4406 que establece un sistema para evaluar la contaminación en lubricantes, usando un código numérico que indica la cantidad de partículas por mililitro de fluido. El código se expresa en tres valores separados por barras, refleja el número de partículas mayores o iguales a 4, 6 y 14 micrómetros [8]. En este sentido, gracias a este sistema, es posible determinar el nivel de limpieza del lubricante, establecer límites de contaminación aceptables y planificar acciones de mantenimiento, además de facilitar decisiones técnicas sobre filtración y protección de equipos.

En el ámbito de estudio de la presente investigación se hace uso de camiones mineros CAT 785C, que son vehículos robustos y eficientes diseñados para transportar grandes volúmenes en minería, con una capacidad de carga de 136 toneladas, motor de 1005 kW y transmisión de seis velocidades que le permite operar en condiciones extremas. Es preciso indicar que el presente estudio tiene como base la tesis denominada: “Diseño de implementación de un sistema de diálisis de aceites mediante la norma ISO 4406 para reducir el consumo de lubricantes y extender la vida útil de los componentes internos de la flota de camiones CAT 785C en una empresa minera a tajo abierto, presentada por Wiles Chávez de la Universidad Privada del Norte sede Cajamarca-Perú [9]. En este sentido, se planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿En qué medida la implementación de un sistema de diálisis de aceites mediante la norma ISO 4406 optimiza el consumo de lubricantes y prolonga la vida útil de los componentes internos de la flota de camiones mineros C0AT 785C en una empresa minera a cielo abierto? Para realizar la investigación se planteó como objetivo general, implementar un sistema de diálisis de aceites mediante la norma ISO 4406, para optimizar el consumo de lubricantes y prolongar la vida útil de los componentes internos de la flota de camiones CAT 785C en una empresa minera a cielo abierto; y como objetivos específicos, diagnosticar la condición actual del proceso de diálisis para la flota de camiones mineros CAT 785C de la empresa minera a tajo abierto; implementar la mejora del proceso de diálisis mediante la norma ISO 4406; realizar una prueba piloto para determinar la efectividad y factibilidad de un sistema de diálisis optimizado; y elaborar el análisis costo beneficio para la implementación de la propuesta en un periodo de 6 años.

Como hipótesis se consideró: La implementación de un sistema de diálisis de aceite mediante la norma ISO 4406 optimiza el consumo de lubricantes y prolonga la vida útil de los componentes internos de la flota de camiones mineros CAT 785C en una empresa minera a tajo abierto.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación según su propósito es una investigación aplicada debido a que se enfoca a identificar mecanismos o estrategias que facilita el logro de un objetivo específico y concreto, es decir resolver problemas prácticos [10]; el nivel de profundidad es una investigación Preexperimental, ya que se verificará el efecto de la implementación del sistema de diálisis y su resultado en el consumo de lubricantes y la vida útil de los componentes de los camiones CAT 785C. Considerando que se realizará análisis matemáticos, procedimientos de medición se considera que es una investigación cuantitativa según la naturaleza de los datos [11].

La investigación tiene una población de 34 caminos mineros modelo CAT 785C, pertenecientes a la flota de carguío de la empresa minera en estudio, para lo cual se ha seleccionado por conveniencia en una primera etapa 19 equipos los cuales se analizaron los resultados de los análisis de aceite hidráulico y del eje posterior, de ellos se seleccionó 4 equipos para realizar la prueba piloto del sistema de diálisis optimizado; la selección de estos 4 equipos se da debido a que se escogieron equipos en función a los criterios como horas de componente, facilidad para la ejecución de la prueba, disponibilidad de los equipos, horas del lubricante y nivel actual de contaminación del lubricante.

Para la recolección de datos se hizo uso del análisis documental y la revisión de data histórica de los años 2022 y 2023 de los resultados de análisis de aceites SOS que se encuentran registrados en el portal web de Ferreyros - Caterpillar [12]; así mismo se recolectó la información

administrada por el área de confiabilidad de la empresa minera, esta información permitió realizar un análisis estadístico descriptivo que determinó el promedio de la vida útil actual de los componentes principales de los equipos como Diferencial, Mandos finales, Convertidor de torque y Cilindros de levante de tolva del sistema hidráulico identificando patrones y tendencias.

El presente estudio se desarrolló siguiendo un enfoque metodológico dividido en cuatro fases principales, orientadas a evaluar la eficiencia del sistema de diálisis de aceites implementado bajo los lineamientos de la norma ISO 4406. A continuación, se describe el procedimiento aplicado durante el periodo de investigación.

Fase 1. Determinación de la calidad del aceite

En esta primera fase se verificó la calidad del lubricante procesado mediante el análisis del nivel de limpieza, expresado según el código ISO 4406. Este procedimiento permitió comparar la condición del aceite antes y después del proceso de diálisis, con el fin de determinar la efectividad del sistema en la reducción de contaminantes sólidos presentes en el fluido lubricante.

Fase 2. Determinación de la vida útil de los componentes

En la segunda fase se evaluó la vida útil de los componentes internos de los camiones CAT 785C a partir del registro de las horas efectivas de operación. Este análisis permitió establecer la relación entre la mejora en la limpieza del aceite y la extensión del tiempo de servicio de los elementos críticos del sistema mecánico, evidenciando el impacto positivo del proceso de diálisis en la durabilidad de los componentes.

Fase 3. Evaluación del consumo de lubricante

Durante esta fase se analizó el consumo anual de lubricante no programado, con el objetivo de identificar el efecto del sistema de diálisis en la optimización del uso de aceites. Para ello, se recopilaron registros históricos de consumo y se compararon con los valores obtenidos tras la implementación del sistema, permitiendo así cuantificar la reducción en el uso de lubricantes y su incidencia en los costos operativos.

Fase 4. Determinación de la eficiencia de filtración mediante una prueba piloto

Finalmente, se llevó a cabo una prueba piloto para evaluar la eficiencia del sistema de diálisis a través de la medición del tiempo de procesamiento del aceite durante un ciclo completo de trabajo. El propósito de esta evaluación fue determinar la capacidad del sistema para remover partículas contaminantes en función del tiempo operativo, considerando las condiciones reales de operación de los camiones CAT 785C en el entorno minero a cielo abierto.

III. RESULTADOS

3.1. Diagnóstico actual del proceso de diálisis en la empresa

La empresa minera en estudio emplea un sistema de diálisis de aceites como parte de su estrategia de mantenimiento preventivo, disponiendo de equipos especializados para la diálisis de aceites utilizados.



Fig.1 Equipo dializador para aceite Hidráulico SAE-10W de 1µ

En la Fig. 1 se muestra un equipo dializador de una sola etapa (1 micra) utilizado para el aceite hidráulico SAE 10W (MOBILTRANS™ HD 10W) en sistemas hidráulicos de equipos mineros. Este aceite presenta una viscosidad de 6.3 cSt a 100°C y un intervalo de cambio de 2400 horas, debiendo ser dializado cada 600 horas.



Fig. 2 Equipo dializador para aceite de eje posterior XDF de 7u

La Fig. 2 muestra el equipo dializador para aceite de eje posterior XDF, con capacidad de filtrado de 7 micras, utilizado en equipos que emplean el lubricante Mobilube™ XFD 60 X1 (grado SAE 60, viscosidad 24.9 cSt a 100 °C). Este aceite tiene un intervalo de cambio de 2400 horas y debe dializarse cada 600 horas. Sin embargo, dicho sistema no alcanza los niveles de limpieza exigidos por la norma ISO 4406 y la FMS International Inc [13], la cual establece como mínimo aceptable una clasificación inferior o igual al código 15/13/10 en sistemas hidráulicos y a 18/16/13 en sistemas de transmisión o engranajes (eje posterior). Teniendo en cuenta los registros del sistema SOS Web de Ferreyros [12], se realizó el seguimiento en 15 camiones, comparando los códigos inicial y final tras la diálisis.

Equipo	Fecha	ISO Inicial			ISO Final			Códigos reducidos		
		4u	6u	14u	4u	6u	14u	4u	6u	14u
CAM-01	16/11/2022	21	18	12	21	17	11	0	1	1
CAM-01	9/3/2023	22	19	12	21	18	11	1	1	1
CAM-02	3/9/2022	23	20	13	23	18	11	0	2	2
CAM-03	21/5/2022	21	19	13	20	16	11	1	3	2
CAM-03	12/1/2023	20	17	11	19	15	10	1	2	1
CAM-03	2/5/2023	21	18	12	21	17	11	0	1	1
CAM-04	13/7/2022	22	17	12	21	16	11	1	1	1
CAM-04	14/7/2023	22	17	12	21	16	10	1	1	2
CAM-10	19/1/2023	21	17	11	21	16	10	0	1	1
CAM-17	17/3/2024	22	19	14	22	15	10	0	4	4
CAM-21	2/1/2023	22	18	12	22	17	10	0	1	2
CAM-21	23/4/2023	22	18	11	21	17	11	1	1	0
CAM-25	9/9/2023	21	19	15	20	14	11	1	5	4
CAM-28	2/3/2023	22	20	14	21	17	11	1	3	3
CAM-31	21/2/2024	22	18	13	21	16	10	1	2	3
	Promedio	**22**	**18**	**12**	**21**	**16**	**11**	**1**	**2**	**1**

Fig. 3 Resultados obtenidos en comparación con el código ISO 4406 de la diálisis de aceite hidráulico HD10W

La Fig. 3 muestra el seguimiento del análisis del aceite utilizado en el sistema hidráulico de los equipos con una duración de 4 a 6 horas, empleando el dializador para aceite Hidráulico SAE-10W con filtración de 1 u, en el cual se muestra que el nivel de limpieza inicial de los lubricantes del sistema es de 22/18/12 y luego de la diálisis es de 21/16/11 por lo que es necesario reducir 7/5/2 (7 códigos en el canal de 4u, 5 códigos en el canal de 6u y 2 códigos en el canal de 14u), y poder alcanzar el objetivo de acuerdo a la ISO 4406 de 15/13/10, necesarios para extender la vida útil de los componentes de sistema hidráulico y se prolongue 2 veces más la duración de lo que en la actualidad duran con el nivel de limpieza ISO 21/16/11 esto basándonos en [14] .

Eje "Y" de limpieza actual de la máquina (código ISO)	Nuevo nivel de limpieza (ISO 4406)										
	22/20/17	21/19/16	20/18/15	19/17/14	18/16/13	17/15/12	16/14/11	15/13/10	14/12/9	13/11/8	12/10/7
28/26/23	5	7	9	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10
27/25/22	4	5	7	9	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10
26/24/21	3	4	6	7	9	>10	>10	>10	>10	>10	>10
25/23/20	2	3	4	5	7	9	>10	>10	>10	>10	>10
24/22/19	1.6	2	3	4	5	7	8	>10	>10	>10	>10
23/21/18	1.3	1.6	2	3	4	5	7	9	>10	>10	>10
22/20/17		1.3	1.6	2	3	4	5	7	9	>10	>10
21/19/16			1.3	1.6	2	3	4	5	7	9	>10
20/18/15*				1.3	1.6	2	3	4	5	7	>10
19/17/14					1.3	1.6	2	3	4	6	8
18/16/13						1.3	1.6	2	3	4	6
17/15/12							1.3	1.6	2	3	4
16/14/11								1.3	1.6	2	3
15/13/10									1.4	1.8	2.5

Fig. 4 Extensión de vida útil de los componentes del sistema hidráulico

Resultados con Dializador de 7u - Aceite Eje Posterior										
Equipo	Fecha	ISO Inicial Situación actual			ISO Final Situación actual			Códigos reducidos en Situación actual		
		4u	6u	14u	4u	6u	14u	4u	6u	14u
CAM-03	12/01/2023	23	22	16	23	21	11	0	1	5
CAM-05	22/04/2023	23	21	15	21	18	10	2	3	5
CAM-06	12/01/2023	23	22	12	23	20	11	0	2	1
CAM-07	30/12/2022	24	23	17	24	22	12	0	1	5
CAM-08	19/01/2023	24	23	15	23	22	11	1	1	4
CAM-08	30/05/2023	24	23	20	23	17	13	1	6	7
CAM-09	19/01/2023	24	23	16	24	22	10	0	1	6
CAM-13	29/01/2023	24	23	17	24	22	11	0	1	6
CAM-16	22/06/2023	23	21	16	23	20	14	0	1	2
CAM-19	30/07/2023	23	22	13	23	20	11	0	2	2
CAM-20	3/01/2023	23	23	19	23	21	15	0	2	4
Promedio de resultados Situación actual		23	22	16	23	20	12	0	2	4

Fig. 5 Resultados obtenidos en comparación el código ISO 4406 de la diálisis de aceite de eje posterior Mobil XFD 60

La Fig. 5 muestra el seguimiento del análisis del aceite utilizado en el eje posterior de los equipos, empleando el dializador de una sola etapa con filtración de 7 micras. Los resultados presentados indican que antes de la diálisis el aceite registraba un nivel promedio de contaminación de 23/22/16, mientras que después del proceso se redujo a 23/20/12, logrando una disminución de 1 a 2 códigos, sin alcanzar el objetivo establecido de 18/16/13 determinado por la ISO 4406. En tal sentido, sería necesario reducir en 5/6/3 códigos el nivel de contaminación de este tipo de lubricantes utilizados en el eje posterior, con ello de acuerdo con la tabla de extensión de vida útil se podría llegar al objetivo deseado incrementando hasta en dos veces las horas de operación de los mandos finales y diferencial esto según la Fig. 6 extraída de [14].

Eje "Y" de limpieza actual de la máquina (código ISO)	Nuevo nivel de limpieza (ISO 4406)										
	22/20/17	21/19/16	20/18/15	19/17/14	18/16/13	17/15/12	16/14/11	15/13/10	14/12/9	13/11/8	12/10/7
28/26/23	2.5	3	3.5	4	5	6.5	7	9	10	>10	>10
27/25/22	2	2.5	3	3.5	4	5	6	7.5	9	>10	>10
26/24/21	1.5	2	2.5	3	4	5	6	7	8	10	>10
25/23/20	1.3	1.5	2	2.5	3	3.5	4	5	6.5	8.5	10
24/22/19	1.1	1.3	1.7	2	2.5	3	3.5	4	5	5.5	8.5
23/21/18	1.1	1.3	1.4	1.6	2	2.5	3	3.5	4	5.5	8
22/20/17		1.05	1.3	1.4	1.7	2	2.5	3	4	5.5	7
21/19/16			1.1	1.3	1.5	1.7	2	2.5	3.5	4.5	6
20/18/15*				1.1	1.3	1.5	1.7	2	2.5	3.7	5
19/17/14					1.1	1.3	1.5	1.7	2	2.5	3.5
18/16/13						1.1	1.3	1.5	1.8	3	3.5
17/15/12							1.1	1.4	1.5	1.8	2.2
16/14/11								1.2	1.4	1.5	1.8
15/13/10									1.1	1.3	1.6

Fig. 6 Extensión de vida útil de cajas de engranajes y otros sistemas

Asimismo, se ha determinado que el sistema actual requiere hasta 2.5 horas para procesar 150 galones de aceite por compartimento (hidráulico y diferencial), debido a la baja capacidad de la bomba utilizada (5 GPM), lo que limita la eficiencia del proceso. Según registros de otras operaciones mineras con condiciones similares, se requieren al menos tres ciclos de diálisis para alcanzar resultados óptimos. Esta limitación técnica y operativa compromete la efectividad del tratamiento del aceite dentro de los tiempos disponibles durante los mantenimientos programados.

Flota Camiones	PRE-PM	PM02	PRE-PM	PM03	PRE-PM	PM02	PRE-PM	PM04
Frecuencia de PM's (Horas)	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400
Aceite HD10W (150 Galones)	C	C	C					C
Aceite XFD 60 (140 Galones)	C	C	C					C

C	Cambio programado en cada PM04 (2400 Horas aprox.)
C	Cambio con pocas horas de aceite (50-600 horas)

Cambios por asentamiento de componentes, flushin por desgaste prematuro, fallas intermedias de componentes contaminación prematura, etc)

Fig. 7 Principales causas del cambio de aceite antes de las horas programadas en los camiones CAT 785C

En la Fig. 7 observamos que el cambio de aceite en los camiones mineros CAT 785C está programado de acuerdo a criterios técnicos y recomendaciones del fabricante Caterpilar, cada 2400 horas (PM04), en muchos casos este se realiza entre 50 y 600 horas de uso. Las principales razones incluyen: asentamiento de componentes, flushing por desgaste, fallas intermedias y contaminación temprana del aceite. Estos factores obligan a ejecutar mantenimientos no programados (PRE-PM, PM02 o PM03) antes de alcanzar el ciclo de vida esperado del lubricante. Estas intervenciones prematuras reflejan mayor consumo y costos adicionales.

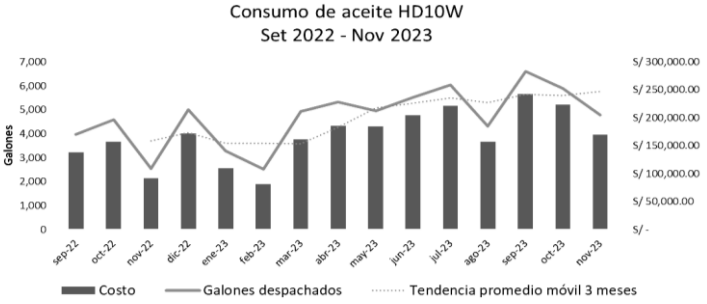


Fig. 8 Tendencia de despacho de lubricantes de tipo Mobil HD10W

La figura anterior muestra, el análisis del consumo de

lubricante HD10W entre septiembre de 2022 y noviembre de 2023 revela un patrón cíclico de despachos mensuales que varía entre 2000 y 5500 galones, causado principalmente por la falta de alineación entre el abastecimiento y la distribución desde almacén. La tendencia general, evaluada mediante un promedio móvil trimestral, muestra un incremento en el consumo, lo cual sugiere una mayor demanda por parte de la flota de camiones CAT 785C. En términos económicos, los costos asociados al consumo de este lubricante oscilan entre S/. 100,000 y S/. 250,000 mensuales, representando un gasto significativo para el área de mantenimiento.

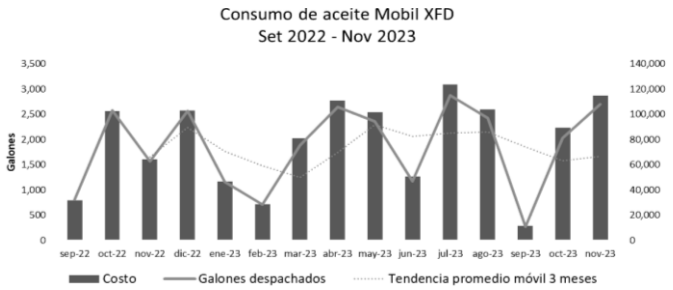


Fig. 9 Tendencia de despacho de lubricantes de tipo Mobil XFD 60

Como se puede apreciar en la Fig. 9, el despacho de aceite Mobil XFD 60, utilizado en los ejes posteriores de la flota de camiones, muestra un consumo constante a lo largo del año 2023, según la tendencia de promedio móvil trimestral. Los volúmenes registrados varían entre 500 y 3,000 galones mensuales, manteniendo una relación directa con los costos, los cuales oscilan entre S/. 10,000 y S/. 120,000.

Histórico de consumo promedio mensual de Lubricantes Set.22 - Nov.23						
Tipo Aceite	UM	Consumo promedio mensual	Consumo anual estimado	Costo x Gln		Total
MOBIL TRANS HD 10W	Gln	4871	58452	$ 9.71	$	567,568.92
MOBILUBE XFD 60 X1	Gln	1793	21516	$ 11.68	$	251,306.88
				Costo Total x año	**$**	**818,875.80**

Fig. 10 Consumo de lubricantes para el sistema hidráulico y de eje posterior de la flota de camiones CAT 785C entre 2022 y 2023

La Fig. 10 muestra que el consumo promedio mensual y el costo total de lubricantes utilizados por toda la flota de equipos, basado en datos desde septiembre de 2022 hasta noviembre de 2023. En particular, los lubricantes más importantes del sistema hidráulico y del tren posterior (diferencial y mandos finales) representan un gasto total de $818,875.80 en los camiones mineros CAT 785C.

Consumo no programado de lubricantes por año						
Tipo Aceite	UM	Factor de consumo	Consumo anual estimado	Costo x Gln		Total
MOBIL TRANS HD 10W	Gln	31%	18355	$ 9.71	$	178,229.39
MOBILUBE XFD 60 X1	Gln	33%	7120	$ 11.68	$	83,158.87
				Costo Total x año	**$**	**261,388.26**

Fig. 11 Consumo de lubricantes no programadas de mantenimiento por año

En la Fig.11 observamos que el volumen de lubricante reemplazado antes de lo programado representa un costo aproximado de $261,388.26. Según los registros históricos, entre el 31% y 33% del consumo total corresponde a cambios no programados por causas como lubricantes fuera de especificación, flushing, asentamiento de componentes nuevos, o fugas internas y externas, entre otros motivos similares.

TABLA I
COSTO DE COMPONENTES PRINCIPALES SEGÚN SU CICLO DE VIDA ÚTIL ACTUAL

Costo estimado de inversión por cambio de componentes de acuerdo a su vida útil actual						
Componente	Costo estándar de reparación por componente $	# Equipos	Horas Trabajadas por componente promedio	Horas anuales trabajadas estimado x Equipo	Tiempo de reemplazo (Año)	Costo total de reemplazo a nivel de flota
Diferencial	$ 15,991.00	34	27178	6660	4.1	$ 543,694
Mando Final	$ 52,935.00	34	29592	6660	4.4	$ 1,799,790
Convertidor de Torque	$ 23,498.00	34	30526	6660	4.6	$ 798,932
Cilindro de Levante	$ 7,845.00	34	30000	6660	4.5	$ 266,730
					Total	**$ 3,409,146**

Según la Tabla 1, la inversión se proyecta en un periodo de entre 4.1 y 4.6 años, correspondiente a la vida útil estimada de cada componente Para este cálculo se consideró, el costo total de reemplazo en función de dicha vida útil, el costo de una reparación estándar (sin daños mayores) y un promedio anual de 6,660 horas de operación por equipo. Tomando en cuenta los 34 camiones de la flota, se estimó la inversión necesaria para la reposición cíclica de los principales componentes del sistema hidráulico y del eje posterior de los equipos CAT 785C, en total fue de $ 3 409 146.

3.2. Desarrollo de la propuesta de mejora del proceso de diálisis mediante la norma ISO 4406

En base al diagnóstico del proceso de diálisis en la flota de camiones CAT785C, se determina la necesidad de optimizar su desempeño para cumplir con los objetivos.

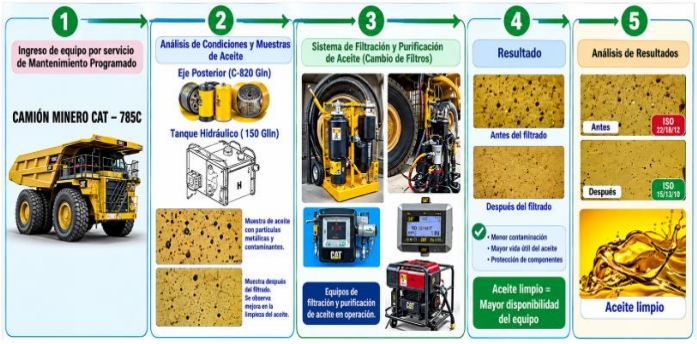


Fig. 12 Diagrama de operaciones para el proceso de diálisis de aceite

La Fig. 12 muestra el procedimiento de diálisis del aceite en los sistemas hidráulicos y el eje posterior, considerando los recursos y facilidades requeridos dentro de la propuesta de mejora del proceso.

Paso 01: Ingreso de Equipo por servicio de Mantenimiento Programado:

En la propuesta del sistema de diálisis se plantea que los camiones CAT 785C realicen la diálisis del sistema hidráulico y del eje posterior cada 500 horas de mantenimiento programado, actividades que deberán incluirse en la programación general y coordinarse en las reuniones semanales de planificación. Asimismo, en los mantenimientos correctivos no programados, el aceite proveniente del sistema hidráulico y del eje posterior deberá ser recuperado en tanques especiales para posteriormente someterlo a un proceso de diálisis externa. Esta práctica permitirá evitar el desperdicio de lubricantes, reducir su consumo y prolongar la vida útil de los componentes internos. Para su adecuada implementación, es indispensable una coordinación permanente entre las áreas de Planeamiento y Ejecución, con el fin de consolidar esta medida como parte de la estrategia integral de gestión y conservación de los activos de la empresa.

Paso 02: Compartimentos de aceite a intervenir:

Como parte de la propuesta de mejora del proceso de diálisis de aceite, se establece que los lubricantes a tratar corresponderán a dos sistemas principales:

- Sistema hidráulico, que utiliza aceite tipo HD10W con una capacidad aproximada de 150 galones.
- Sistema del eje posterior, que emplea aceite tipo SAE60 o XFD con una capacidad de 140 galones.

Con el propósito de garantizar la correcta ejecución del proceso de diálisis de aceites, se propone implementar una campaña de información y sensibilización dirigida al personal técnico y a la línea de supervisión. Dicha campaña tendrá como objetivo reforzar las buenas prácticas operativas, promover el uso adecuado de los equipos de diálisis y fortalecer las rutinas de mantenimiento preventivo y correctivo de las unidades de filtrado. De esta manera, se asegurará el cumplimiento de los niveles de limpieza establecidos por la norma ISO 4406 en cada procedimiento de recuperación de lubricantes. Asimismo, se establece que, previo al inicio del proceso de diálisis, deberá realizarse la toma de una muestra mínima de 100 ml de lubricante de cada sistema, con el fin de determinar su nivel de contaminación inicial.

Paso 03: Equipos necesarios para el proceso de control de contaminación mediante la diálisis de aceite

Con el propósito de optimizar el sistema actual de diálisis y alcanzar los niveles de limpieza establecidos por la norma ISO 4406, se proponen equipos de diálisis de aceite con tecnología de doble etapa de filtración. La primera etapa de filtración deberá contar con un filtro de 9 micras, mientras que la segunda etapa deberá disponer de un filtro de 3 micras, ambos con una eficiencia de 99.9%. Asimismo, se plantea que los equipos incorporen bombas con capacidad mínima de 15 GPM, permitiendo reducir el tiempo de diálisis actuales. Además, deberán contar con un sistema de control térmico que mantenga la temperatura del lubricante por encima de los 20 °C, asegurando una viscosidad adecuada. También se propone la instalación de al menos cuatro tanques recuperadores de aceite, cada tanque deberá estar debidamente identificado según el tipo de aceite (FDAO, XFD o HD10W) y contar con conexiones rápidas, visores de nivel, termómetro y resistencia térmica. Por último, para garantizar el control del nivel de limpieza durante el proceso de diálisis, se recomienda el uso de contadores de partículas en línea, los cuales permiten monitorear en tiempo real el cumplimiento de los estándares establecidos por la norma ISO 4406, modelo obtenido de [15].



Fig. 13 Modelo de contador de partículas en línea

Asimismo, se propone incorporar un contador de partículas portátil como equipo de respaldo, destinado a apoyar las mediciones cuando los instrumentos principales presenten fallas o se encuentren en proceso de calibración. Este dispositivo permitirá realizar un seguimiento continuo del nivel de contaminación de los lubricantes, incluso durante la operación de los equipos, facilitando la toma de decisiones correctivas de manera oportuna, como se observa en la Fig. 14 extraída de [16].



Fig. 14 Modelo de contador de partículas portátil

Paso 04: Seguimiento de resultados

En esta etapa se plantea establecer un procedimiento de seguimiento y control del proceso de diálisis, que incluya la toma de muestras periódicas de aceite, al menos una por hora, considerando que el volumen procesado (140–150 galones) y la capacidad de la bomba (15 GPM) permiten una corrida completa del sistema en menos de una hora. Para cumplir con los niveles de limpieza exigidos por la norma ISO 4406, se estima un tiempo total de diálisis de aproximadamente 2.5 horas. Además, determinar la frecuencia óptima de cambio de los elementos filtrantes, por otra parte, el monitoreo de las partículas presentes en el aceite facilitará la detección

temprana de desgastes anormales en componentes como hierro, cobre o silicio. Si los niveles se mantienen dentro de los rangos aceptables, indicará un funcionamiento adecuado del sistema; en caso contrario, será necesario realizar acciones preventivas o correctivas que eviten daños mayores y aseguren la continuidad operativa de los equipos.

3.3. Prueba piloto para determinar la efectividad y factibilidad de un sistema de diálisis optimizado

Con el propósito de verificar la eficacia del diseño propuesto y su capacidad para cumplir con los niveles de limpieza establecidos por la norma ISO 4406, se realizaron dos pruebas experimentales utilizando equipos de diálisis. La primera se aplicó al aceite del sistema hidráulico de un camión minero, mientras que la segunda se efectuó sobre el aceite del eje posterior (diferencial y mandos finales) en tres unidades CAT 785C pertenecientes a la flota de la empresa minera.

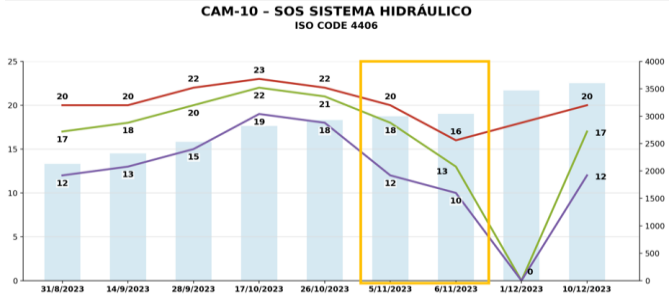


Fig. 15 Desempeño del proceso de diálisis en la prueba piloto en CAM-10

La Fig. 15 presenta los resultados obtenidos en la diálisis del sistema hidráulico del camión CAM-10, perteneciente a una empresa minera de tajo abierto, donde el proceso se ejecutó durante 12 horas continuas, entre el 5 y 6 de noviembre de 2023, evidenciando el cambio en las condiciones del aceite antes y después del tratamiento.

TABLA II
RESULTADOS ISO 4406 – SISTEMA HIDRÁULICO CAM-10

Resultados ISO 4406	**Canal**		
05-Nov-23 al 06-Nov-23	**4u**	**6u**	**14u**
Muestra antes de la diálisis	20	18	12
Muestra después de la diálisis	16	13	10
Reducción de contaminación	**4**	**5**	**2**

La tabla 2 resume los resultados del proceso de diálisis realizado en el sistema hidráulico del camión CAM-10, evidenciando una disminución de 2 a 5 puntos en el nivel de contaminación. Este resultado confirma que la prueba piloto cumplió con los estándares de limpieza establecidos por la norma ISO 4406, alcanzando el nivel 15/13/10 requerido para este tipo de sistema. Para esta prueba piloto, se emplearon elementos filtrantes nuevos con una eficiencia de $\beta_1 = 1000$ y se efectuó la diálisis durante 12 horas continuas, demostrando que es posible alcanzar los niveles de limpieza exigidos por la norma ISO 4406 mediante un proceso adecuadamente controlado.

En el caso del aceite del eje posterior, se utilizó un equipo de diálisis de doble etapa (6 µ y 3 µ), debido a que este lubricante presenta mayor viscosidad (>26 cSt). Por ello, fue necesario contar con un sistema de mayor capacidad, equipado con una bomba de al menos 15 GPM para garantizar un flujo adecuado y un proceso eficiente. Esta prueba piloto fue realizada en los siguientes equipos CAM-02; CAM-27 y CAM-29 entre el 25 de mayo de 2023 y el 08 de agosto de 2023, los resultados fueron los siguientes.

Resultados con Dializador de dos etapas 6u + 3u Aceite Eje Posterior									
Equipo	Fecha	ISO Inicial antes del diálisis			ISO Final con Método propuesto			Códigos reducidos con Método propuesto		
		4u	6u	14u	4u	6u	14u	4u	6u	14u
CAM-02	27/06/2023	23	19	11	20	15	11	3	4	0
CAM-02	16/07/2023	22	18	15	21	16	12	1	2	3
CAM-27	25/05/2023	23	21	13	19	15	11	4	6	2
CAM-27	25/06/2023	23	21	13	18	15	11	5	6	2
CAM-27	11/07/2023	23	20	13	19	15	11	4	5	2
CAM-27	3/08/2023	23	22	14	22	16	11	1	6	3
CAM-29	22/07/2023	24	23	18	21	17	13	3	6	5
CAM-29	8/08/2023	24	23	17	23	19	11	1	4	6
Promedio de resultados de prueba piloto		23	21	14	20	16	11	3	5	3

Fig. 16 Resultado de diálisis del aceite de eje posterior en la prueba piloto

La Fig. 16 evidencia que el sistema de diálisis propuesto logra reducir entre 3 y 5 códigos ISO, superando al proceso actual que solo disminuye entre 1 y 2. Con las optimizaciones recomendadas, el sistema podría alcanzar el nivel de limpieza 18/16/13 establecido por la norma ISO 4406. Con base en los resultados obtenidos en la prueba piloto, se evidencia la posibilidad de extender la vida útil de los componentes del sistema hidráulico hasta en cuatro veces y la de los componentes del eje posterior hasta en el doble, lo que sustenta el incremento de la durabilidad de dichos elementos, expresado en años de servicio.

3.4. Análisis costo - beneficio para la implementación de la propuesta en un periodo de 6 años

Con la finalidad de cuantificar los beneficios generados por la implementación de las mejoras propuestas en el proceso de diálisis, y considerando un horizonte de análisis de seis años, se proyectan los impactos directos sobre el consumo de lubricantes, la vida útil de los componentes y los costos operativos asociados. [17]. Considerando que el consumo de lubricante estimado por año es de $261,389 se obtiene la siguiente proyección:

TABLA III
BENEFICIO POR REDUCCIÓN DE CONSUMO DE LUBRICANTES

Año	**Año 01 -35%**	**Año 02 -70%**	**Año 03 -70%**	**Año 04 -70%**	**Año 05 -70%**	**Año 06 -70%**
Ahorro	$ 91,486	$ 182,972	$ 182,972	$ 182,972	$ 182,972	$ 182,972

En la tabla 3 se detallan los beneficios económicos estimados derivados de la reducción en el consumo de lubricante, alcanzada mediante la optimización del proceso y la mejora en los niveles de limpieza del aceite. Durante el primer año se contempla un ahorro del 35%, atribuible a la

fase de adecuación y al proceso de aprendizaje del personal técnico y del equipo de supervisión. A partir del segundo año, se espera una estabilización de los indicadores de ahorro y eficiencia, reflejando el efecto sostenido de la implementación.

La tabla 4 presenta los resultados económicos obtenidos al considerar un incremento del 25 %, estimación conservadora, según Ref. [17], en la vida útil de los componentes. En este escenario, se genera un ahorro debido a la extensión de un año adicional en el periodo operativo de los componentes principales, lo que implica que las inversiones destinadas a su reparación se efectuarían cada seis años, en lugar de cada cinco años como ocurre en la situación actual.

TABLA IV
BENEFICIO POR INCREMENTO DE VIDA ÚTIL

Costo estimado de inversión por cambio de componentes luego de la implementación de mejora						
Componente	Costo estándar de reparación por componente ($)	# Equipos	Horas Trabajadas por componente promedio	Horas anuales trabajadas estimado x Equipo	Tiempo de reemplazo (Año)	Costo total de reemplazo a nivel de flota
Diferencial	$ 15,991.00	34	33973	6660	**5.1**	$ 543,694
Mando Final	$ 52,935.00	34	36990	6660	**5.6**	$ 1,799,790
Convertidor de Torque	$ 23,498.00	34	38158	6660	**5.7**	$ 798,932
Cilindro de Levante	$ 7,845.00	34	37500	6660	**5.6**	$ 266,730
				Total	**$**	**3,409,146**

De acuerdo con la propuesta desarrollada se han identificado los equipos e instrumentos requeridos para la implementación de la mejora. La Fig. 17 presenta el detalle de dichos elementos, junto con los costos estimados correspondientes a su adquisición.

Descripción	Imagen referencial	Cantidad	Costo	Total
Equipo dializador de aceite XFD ó FDAO de 9u – 3u (B=1000) de 20 GPM con contador de partículas ISO CODE 4406 en línea incluido.		01	$ 20 000.00	$ 20 000.00
Equipo dializador de aceite SAE – 10W de 9u – 3u (B=1000) de 20 GPM con contador de partículas ISO CODE 4406 en línea incluido.		02	$ 18 000.00	$ 36 000.00
Tanque recuperador de 250 Glns para Aceite SAE-10W, XFD y FDAO (Propuesta para habilitar TOTES disponibles en la operación)		04	$ 1800.00	$ 7 200.00
Elementos filtrantes de 9u y 3u (B=1000)		03	$ 400.00	$ 1 200.00
Contador de partículas portátil ISO Code 4406: Código de Contaminación: ISO 4406, Interfaz: Inalámbrico, Cable y USB, medición de partículas por láser, bomba integrada, sensor integral.		01	$ 10 000.0	$ 10 000.00
		TOTAL	**$ 74 400.00**	

Fig. 17 Requerimiento para la implementación del sistema de diálisis

Asimismo, se han identificado los gastos operativos que deberán considerarse anualmente.

TABLA V
GASTOS OPERATIVOS ANUALES PROYECTADOS DEL SISTEMA DE DIÁLISIS

N°	**Descripción**	**Frecuencia**	**Unidad**	**Cantidad**	**Costo**	**Total**
1	Elementos Filtrantes	Cambio de elementos cada mes	Unidad	36	$ 400.00	$ 14,400.00
2	Servicio de Calibración de contadores de partículas	Anual	Unidad	3	$ 1,600.00	$ 4,800.00
3	Servicio de mantenimiento de equipos filtrantes y tanques de recuperación	3 horas por semana	H-H	156	$ 10.00	$ 1,560.00
4	Servicio de entrenamiento en prácticas de control de contaminación	2 horas por mes	H-H	24	$ 20.00	$ 480.00
5	Implementación de dispositivos visuales (stickers, láminas, impresiones, etc.)	Renovación semestral	Unidad	2	$ 300.00	$ 600.00
6	Otros gastos de contingencia		Unidad	1		$ 1,500.00
Total						**$ 23,340.00**

La tabla 5 presenta el desglose de dichos costos, los cuales comprenden consumibles, servicios de calibración, labores de mantenimiento, entre otros.

Como parte de la evaluación financiera, se procede a calcular el Costo Promedio Ponderado del Capital (WACC), para esto se consideró el monto total de Inversión ($ 74,400.00) del cual, el 50% será cubierto con capital de la empresa y el restante 50% mediante apalancamiento financiero, en base a ello se determinan los valores de D y P (D = $ 37,200.00 y P = $ 37,200.00)

Se estimaron también los factores del costo de la deuda (Kdt) y del patrimonio o capital propio (Ke) en base a estimaciones del área de costos de la empresa minera a tajo abierto, donde Kdt = 8% y Ke = 14% se aplicaron a la ecuación (1) del WACC:

$$WAAC = 0.08\ x\ \left(\frac{37{,}200.00}{37{,}200.00 + 37{,}200.00}\right) + 0.14\ x\ \left(\frac{37{,}200.00}{37{,}200.00 + 37{,}200.00}\right) = 11\% \quad \ldots(1)$$

El WACC obtenido del 11 % constituye la tasa de descuento de referencia para la evaluación económica del proyecto, la cual se utilizará en la comparación con los indicadores de rentabilidad, Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR); con el fin de determinar la viabilidad económica de la propuesta de mejora mediante el proceso de diálisis del aceite lubricante.

TABLA VI
CÁLCULO DE VAN Y TIR DE LA PROPUESTA DE MEJORA

Año	0	1	2	3	4	5	6
Inversión	$ -74,400			$ -38,000			
Gastos Operativos		$ -17,340	$ -23,340	$ -23,340	$ -23,340	$ -23,340	$ -23,340
Ahorro en consumo de aceite		$ 91,486	$ 182,972	$ 182,972	$ 182,972	$ 182,972	$ 182,972
Ahorro en extensión de vida de componentes						$ 3,409,146	$ -3,409,146
Beneficio	**$ -74,400**	**$ 74,146**	**$ 159,632**	**$ 121,632**	**$ 159,632**	**$ 3,568,778**	**$ -3,249,514**

La tabla 6 muestra que, al evaluar la inversión inicial, los beneficios proyectados y los costos operativos, se determinó un VAN de $696,622.00 y una TIR del 171%, aplicando una tasa de descuento del 11%. Estos resultados confirman la viabilidad del proyecto, evidenciando un ahorro significativo para la empresa minera a tajo abierto, junto con ventajas adicionales como la reducción del consumo de lubricantes y el aumento de la vida útil de los componentes.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A. Discusión

El presente estudio sobre la implementación de un sistema de diálisis de aceites en camiones CAT 785C mostró resultados consistentes con investigaciones previas sobre tratamiento y reutilización de lubricantes. La Ref. [20] desarrolló un sistema de diálisis para vehículos livianos, mientras que la Ref. [21] destacó su contribución a la sostenibilidad en la industria manufacturera. Sin embargo, la presente investigación se desarrolló en un contexto minero caracterizado por mayores niveles de contaminación y condiciones de operación más exigentes, lo que requirió adaptaciones técnicas específicas. Estos antecedentes respaldan la viabilidad del sistema propuesto para reducir costos operativos y prolongar la vida útil de los componentes. Asimismo, desde el punto de vista teórico, se confirmó la utilidad de la norma ISO 4406 como estándar para evaluar la limpieza del lubricante mediante el conteo de partículas sólidas. Su aplicación permitió identificar deficiencias del sistema actual, como la limitada capacidad de bombeo, la ausencia de contadores de partículas en línea y de tanques de recuperación, justificando la incorporación de un sistema de doble filtración y equipos de mayor capacidad para optimizar el proceso.

Los resultados evidenciaron una relación directa entre el nivel de limpieza del lubricante, el consumo de aceite y la vida útil de los componentes, en concordancia con los principios de la tribología y con lo reportado en las Ref. [22], [23]. Los niveles promedio de contaminación (22/18/12) superaron los valores recomendados por la ISO 4406, favoreciendo el desgaste prematuro de los componentes. En este contexto, la propuesta permitiría reducir el consumo de lubricantes entre un 35 % y 70 % e incrementar la vida útil de los equipos, fortaleciendo las estrategias de mantenimiento predictivo y gestión de activos. Por otro lado, el tiempo de procesamiento del sistema actual (2.5 horas para 150 galones) limitó la eficiencia del mantenimiento debido a la baja capacidad de bombeo y a la necesidad de múltiples ciclos de diálisis. La propuesta de incorporar bombas de mayor capacidad y filtración en dos etapas constituye una alternativa técnica para reducir los tiempos de servicio y mejorar la disponibilidad de la flota, siendo así que el estudio se desarrolló únicamente en una flota de 34 camiones CAT 785C pertenecientes a una sola empresa minera, lo que restringe la generalización de los resultados. Además, la ausencia de sistemas de monitoreo continuo y la dependencia de registros históricos limitaron la precisión del seguimiento del estado del lubricante.

Finalmente, se recomienda ampliar la investigación a otras operaciones mineras e industriales e incorporar tecnologías de monitoreo en tiempo real, como contadores de partículas y sensores de calidad del aceite, para fortalecer las estrategias de mantenimiento predictivo y optimizar la gestión de lubricantes conforme a la norma ISO 4406.

B. Conclusiones

El diagnóstico del sistema actual de diálisis de aceites en la flota de camiones CAT 785C evidenció un incumplimiento de los estándares de limpieza establecidos por la norma ISO 4406, alcanzando un promedio de 22/18/12, valor que se encuentra significativamente por encima del nivel recomendado de 18/16/13. Esta desviación se atribuye principalmente a la baja capacidad de las bombas de filtración, que requieren aproximadamente 2.5 horas por ciclo de trabajo, afectando la eficiencia del proceso. Asimismo, se identificó un consumo anual no programado de 25,475 galones de lubricante y una vida útil promedio de los componentes de 4.4 años, lo que refleja un margen importante de mejora operativa. Siendo así que, la propuesta de mejora del sistema de diálisis, basada en la aplicación de la norma ISO 4406, contempla la incorporación de bombas de mayor capacidad (hasta 15 GPM), la implementación de tanques recuperadores de aceite, la instalación de contadores de partículas en tiempo real y la adopción de un sistema de filtración en dos etapas (6 μm y 3 μm). Estas mejoras tecnológicas permitirán alcanzar los niveles de limpieza recomendados, optimizando el desempeño del sistema y reduciendo la tasa de contaminación del lubricante.

Los resultados obtenidos en la prueba piloto fueron altamente favorables. Se alcanzó un nivel de limpieza de 20/16/11 en el aceite del eje posterior, lo que representa una reducción del 93.6% de contaminantes, junto con una disminución del tiempo de procesamiento de aceite a 0.83 horas, equivalente a una mejora del 66.8% en la eficiencia del

proceso. Con base en estos resultados, se estima una reducción del consumo de lubricante de hasta el 70% y una extensión de la vida útil de los componentes en un 25%, lo que equivale aproximadamente a un año adicional de operación.

Finalmente se concluyó que el costo beneficio de la implementación del proyectado a seis años muestra una viabilidad económica y técnica del sistema propuesto. Los resultados financieros obtenidos con un WACC de 11%, un Valor Actual Neto (VAN) de $696,622.00 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 171% confirman la rentabilidad del proyecto, evidenciando que la inversión inicial se justifica plenamente por los ahorros proyectados en consumo de lubricantes y la prolongación de la vida útil de los componentes críticos de los equipos mineros.

REFERENCIAS

[1] Demanda de lubricantes a nivel mundial desde el año 2000 al 2028https://es.statista.com/estadisticas/599641/demanda-mundial-de-lubricantes/

[2] Intelligence, M. (01 de 02 de 2024). *Tamaño del mercado de lubricantes automotrices y análisis de participación tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029)*. Obtenido de Mordor Intelligence: https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/automotive-lubricants-market

[3] Interlub. (01 de Julio de 2021). *Crecimiento bio-sostenible: El impacto de la lubricación en la minería*. Obtenido de https://blog.interlub.com/es/blog/crecimiento-biosostenible-impacto-lubricacion-en-mineria/

[4] Sheffield. (2021). Beneficios de un programa de aceite limpio. *Noria Latin America*, 3. https://noria.mx/lube-learn/analisis-de-aceite/como-utilizar-los-estandares-de-limpieza-de-los-lubricantes-para-controlar-los-costos/

[5] Pirro, D., Daschner , E., & Webster , M. (2019). *Lubrication Fundamentals, Revised and Expanded.* Oxfordshire: CRC Press.

[6] Vedan, A. (01 de Julio de 2022). *La Importancia y Beneficios de los Sistemas de Lubricación.* Obtenido de TRACTIAN: https://tractian.com/es/blog/lubricacion-industrial-analicemos-los-diferentes-tipos-de-lubricantes-y-su-importancia

[7] Norma ISO 4406-2021 https://cdn.standards.iteh.ai/samples/79716/d9e67bb574834f389e27d374af881811/ISO-4406-2021.pdf

[8] Alvarez, F. (28 de Mayo de 2023). *Mecalub Ciencia en Lubricación*. Obtenido de La importancia del código ISO 4406 en la gestión de tus activos mecánicos lubricados: https://mecalub.com/2023/05/28/la-importancia-del-codigo-iso-4406-en-la-gestion-de-tus-activos-mecanicos-lubricados/

[9] Chavéz, Wiles.(2024) "Diseño de implementación de un sistema de diálisis de aceites mediante la norma iso 4406 para reducir el consumo de lubricantes y extender la vida útil de los componentes internos de la flota de camiones CAT 785C en una empresa minera a tajo abierto https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/42885?locale-attribute=es

[10] Ortega, C. (2023). Investigación aplicada: Definición, tipos y ejemplos. QuestionPro, 5.

[11] Hernández, S., Collado, F., & Baptista, L. (2014). Metodología de la investigación. México: McGraw-Hill.

[12] Ferreyros. (s.f.). *Laboratorio de Análisis de Fluidos (SOS)*. https://www.ferreyros.com.pe/servicios/laboratorio-de-analisis-de-flujos-sos/

[13] FMS Filtration. (s.f.). *Sitio web oficial de FMS Filtration*. https://fms-filtration.com/

[14] Chevron Lubricants. (s.f.). *Tabla de prolongación de la vida útil – Contenido de humedad y contaminación por partículas*. https://latinamerica.chevronlubricants.com/content/dam/external/marketingprograms/es_mx/marketinghub/Life%20Extension%20Factor%20Tables%20%20Moisture%20Content%20and%20Particulate%20Contamination%20Spanish.pdf

[15] Purifisa. (s.f.). *Contador de partículas*. https://www.purifisagp.com/contador-de-particulas/?form=MG0AV3

[16] STAUFF. (s.f.). *Producto 1810000291*. https://stauff.com.br/es/productos/1810000291

[17] Noria Corporation. (2018). *Contamination control and lubricant cleanliness*. Tulsa, OK: Noria Corporation. Disponible en https://www.noria.com

[18] Hydac International GmbH. (2017). *Hydraulic and lubrication oil contamination control: Technical documentation.* Sulzbach, Germany: Hydac International GmbH.

[19] Pall Corporation. (2019). *Effects of fluid cleanliness on hydraulic components life.* Port Washington, NY: Pall Corporation.

[20] Aldana Sánchez, D. (2019). *Diseño de una planta de diálisis de 20 litros/hora para disminuir la presencia de sólidos en el aceite automotriz de vehículos livianos, Olmos.* Chiclayo: Trabajo de Investigación.

[21] Saenz Suarez, J. (2013). *Diálisis de Aceites.* Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.

[22] Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2013). *Engineering Tribology* (4th ed.). Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/C2010-0-66387-6

[23] Totten, G. E. (2014). *Handbook of Lubrication and Tribology, Volume II: Theory and Design* (2nd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b16662