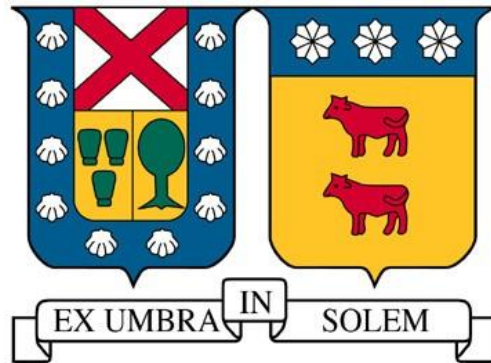


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS VALPARAISO – CHILE



Impacto de la filtración cerámica avanzada en la Confiabilidad y el Costo Total de Propiedad (TCO) de cargadores frontales Caterpillar 994H.

OSCAR NIBALDO OLIVARES JORQUERA

**TRABAJO EXAMEN PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN
GESTIÓN DE ACTIVOS Y MANTENIMIENTO**

PROFESOR GUÍA: SR. Fredy Kristjanpoller.

NOVIEMBRE 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título; ☒ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Impacto de la filtración cerámica avanzada en la Confiabilidad y el Costo Total de Propiedad (TCO) de cargadores frontales Caterpillar 994H.

Nombre del candidato(a): Oscar Olivares Jorquera

Carrera / Grado: Magister en Gestión de Activos y Mantenimiento

Campus: Santiago Vitacura; Departamento: Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Fredy Kristjanpoller Rodriguez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 02/12/2025 ; Firma: _____

F. Kristjanpoller

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 02-12-2025 ; Firma: _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Índice

Índice	2
Resumen Ejecutivo	1
Introducción	2
Marco Referencial	3
1. Objetivos	5
1.1 Objetivo General	5
1.2 Objetivos Específicos	5
2. Metodología Propuesta	6
2.1 Antecedentes	6
2.2 Antecedentes de la empresa	6
3. Descripción de la faena en estudio	6
4. Descripción del proceso productivo	8
4.1 Explotación y extracción en rajo abierto	9
4.2 Abastecimiento de agua y energía	9
4.3 Trituración y molienda	9
4.4 Separación por flotación y producción de concentrados	9
4.5 Preparación y entrega de productos	9
4.6 Manejo de relaves	10
4.7 Proyecto Nueva Centinela – expansión y modernización	10
5. Cargador Frontal Caterpillar 994H	12
5.1 Características técnicas principales	12
5.2 Condiciones Operativas	13
5.3 Estrategia de Mantenimiento	13
5.4 Oportunidad de Mejora: Implementación de Filtros Cerámicos.	13
6. Marco Teórico	15
6.1 Fundamentos de Tribología y Desgaste Abrasivo	15
6.2 El Mecanismo de "Blow-by" como Causa Raíz	15
6.3 Gestión de Contaminación y el Estándar ISO 4406	16
6.4 Teoría de Filtración: Eficiencia Nominal vs. Absoluta	16
6.5 Filtración Bypass (Ruta de la Propuesta)	17
6.6 Mantenimiento	17
6.7 Políticas de Mantenimiento	18
6.8 Mantenimiento Correctivo	18

6.9 Mantenimiento Preventivo	19
6.10 Mantenimiento Predictivo	19
6.11 Mantenimiento Proactivo	20
6.12 Mantenimiento Mejorativo	21
6.13 Disponibilidad.	21
6.14 Principio de Pareto.	23
6.15 Diagrama de dispersión.	24
7. Desarrollo de propuesta de solución.	26
7.1 Aplicación diagrama Pareto	27
7.2 Aplicación de Jack-knife a sistemas críticos.	28
7.3 Análisis del Vínculo Causa-Efecto: Conexión del Sistema de Admisión con el Desgaste del Motor	29
7.4 El Proceso de Falla	30
7.5 Oportunidad de Mejora: Implementación de Filtros Cerámicos.	30
7.6 Análisis Comparativo de Tecnologías	31
7.7 Modelo de Evaluación Técnico-Económica.	32
7.7.1 Justificación de Supuestos del Modelo.	32
7.7.2 Modelo de Disponibilidad.	33
7.7.3 Modelo de Costos.	34
7.7.4 El Caso de Negocio: Valor Total del Impacto (Análisis Financiero)	35
7.7.5 Valorización de la Intervención: Ahorro OPEX y Valor por Disponibilidad	35
7.7.6 Justificación de la Eliminación del Riesgo	36
7.7.7 Indicadores de Rentabilidad y Conclusión del Caso de Negocio	36
7.8 Análisis de Resultados y Gráficos Comparativos	38
8. Conclusión.	41
9. Bibliografía.	42

Resumen Ejecutivo

El presente estudio de tesis evalúa el impacto técnico-económico de implementar una mitigación de ingeniería —filtración cerámica avanzada— en los motores de los cargadores frontales Caterpillar 994H, activos críticos en un entorno minero de alta contaminación.

El diagnóstico inicial (OE 1) identificó que la estrategia de mantenimiento convencional es ineficaz. El Análisis de Pareto determinó que el sistema de "Admisión" es el principal "mal actor" en frecuencia de fallas. Un Análisis Causa-Raíz demostró que la falla de contención del filtro de aire permite el ingreso de sílice, la cual contamina el sistema de lubricación (vía "Blow-by") y causa el desgaste prematuro del motor.

La tesis propone la filtración cerámica de aceite no como una simple mejora, sino como una "Defensa en Profundidad" (Defensa de Ingeniería Secundaria) para capturar el contaminante que el sistema de admisión no puede detener, rompiendo así la cadena de falla (Contaminación -> Desgaste -> Falla).

Para cuantificar el impacto (OE 2 y 3), se desarrolló un modelo de simulación técnico-económico basado en benchmarks de la industria. Los resultados son concluyentes:

1. Impacto en Confiabilidad (OE 2): La intervención mitiga la causa raíz del desgaste (validado por los análisis ISO 4406 y Fe ppm), permitiendo extender los intervalos de PM de 500 a 2.000 horas y eliminando el riesgo de falla prematura de inyectores. Esto genera un aumento de Disponibilidad Mecánica del 0.80%, equivalente a 70.2 horas productivas ganadas al año por activo.
2. Impacto en Costos (OE 3): El modelo TCO demuestra un ahorro en OPEX (mantenimiento y riesgo) de 30.503 USD anuales. Sin embargo, el valor principal proviene del Costo de Oportunidad: la captura de las 70.2 horas de disponibilidad (utilizando un conservador 3.000 USD/hora) genera un valor de 210.600 USD.

El caso de negocio final (OE 3) valida la intervención como una inversión estratégica de alto retorno. Frente a un CAPEX de 15.000 USD, el proyecto genera un valor total anual de 241.103 USD, presentando un Período de Recupero (Payback) de 23 días y un Valor Actual Neto (VAN) de 899.418 USD a 5 años.

Introducción

La minería ha sido desde sus inicios una de las actividades económicas más importantes a nivel mundial, impulsando el desarrollo tecnológico, industrial y económico de los países. La extracción de minerales, especialmente en Chile, ha requerido del uso de maquinaria pesada cada vez más sofisticada, donde los cargadores frontales y camiones de alto tonelaje se han consolidado como equipos críticos en el transporte y manipulación de material. La eficiencia operativa de estos equipos depende directamente de la gestión de activos y del mantenimiento efectivo, los cuales aseguran la disponibilidad, confiabilidad y sostenibilidad de la operación minera. En la última década, la gestión de activos físicos ha evolucionado de un enfoque tradicional, centrado en el mantenimiento correctivo, hacia un modelo integral basado en el ciclo de vida del equipo, conocido como Asset Management según ISO 55000. Este enfoque considera no solo el mantenimiento preventivo y predictivo, sino también la planificación estratégica de reemplazo de componentes, la optimización del costo total de propiedad y la mejora continua de los procesos. En este contexto, la ingeniería de confiabilidad y los sistemas de mantenimiento predictivo han permitido maximizar la disponibilidad de equipos críticos, reduciendo interrupciones no planificadas y aumentando la seguridad operacional. El mantenimiento de filtros de aceite es un ejemplo claro de cómo la ingeniería aplicada puede extender la vida útil de los motores, disminuir costos de operación y reducir el impacto ambiental. Los filtros cerámicos, en particular, representan un avance tecnológico significativo respecto a los filtros tradicionales, ya que permiten una mayor eficiencia en la retención de partículas, un mayor intervalo de cambio de aceite y una reducción de la frecuencia de reemplazo de los filtros. Diversos estudios internacionales y experiencias en faenas mineras han mostrado que la implementación de estos filtros contribuye a la optimización del consumo de lubricantes, a la disminución de fallas mecánicas y al incremento de la confiabilidad de los equipos. Minera Centinela, ubicada en la Región de Antofagasta, ha experimentado un crecimiento sostenido en su producción, lo que ha llevado a la necesidad de optimizar los programas de mantenimiento de su flota de cargadores frontales CAT 994. Estos equipos, al ser críticos para el transporte de material dentro de la faena, requieren de indicadores de desempeño precisos, tales como MTBF (Mean Time Between Failures), MTTR (Mean Time To Repair), disponibilidad operacional y eficiencia global del equipo (OEE). La combinación de estos indicadores con tecnologías de filtrado avanzadas permite evaluar con precisión el impacto de cambios tecnológicos en la operación, logrando mejoras sostenibles en productividad y costos. El objetivo de

esta tesis es analizar el efecto del uso de filtros cerámicos en los cargadores frontales CAT 994 de Minera Centinela, evaluando su impacto en la vida útil de los motores, en la disponibilidad de los equipos y en los costos de operación. Además, se busca integrar un marco de gestión de activos y mantenimiento basado en estándares internacionales, que permita a la empresa contar con información técnica robusta para la toma de decisiones estratégicas y la planificación de mejoras continuas en su flota de maquinaria pesada.

Marco Referencial

La evolución de la minería y la ingeniería de mantenimiento ha estado históricamente marcada por la búsqueda de eficiencia operativa y confiabilidad de los equipos. Desde la explotación artesanal de minerales en siglos pasados hasta la minería moderna, el progreso tecnológico ha permitido desarrollar maquinaria cada vez más robusta y especializada. Los cargadores frontales, camiones mineros y equipos pesados son hoy esenciales para el transporte y manejo de grandes volúmenes de material, pero su eficiencia depende directamente de sistemas avanzados de mantenimiento y gestión de activos. En las décadas de 1960 y 1970, la industria minera comenzó a transitar desde un modelo de mantenimiento correctivo, en el que los equipos se reparaban solamente después de presentar fallas, hacia un mantenimiento preventivo, basado en intervalos programados y reemplazo rutinario de componentes. Este enfoque permitió reducir interrupciones inesperadas y mejorar la disponibilidad de equipos críticos, aunque aún generaba costos significativos debido a reemplazos innecesarios de piezas con vida útil remanente. Posteriormente, la aparición de sensores, tecnología hidráulica avanzada y software de monitoreo en tiempo real abrió paso al mantenimiento predictivo, que utiliza datos de operación, monitoreo de vibración, análisis de aceite y telemetría para anticipar fallas y optimizar los programas de mantenimiento. En la actualidad, la gestión de activos en la minería se ha consolidado como una disciplina estratégica basada en estándares internacionales como ISO 55000, que integra planificación, monitoreo, confiabilidad y análisis económico. Estudios recientes sobre filtros cerámicos y lubricación avanzada en motores de maquinaria pesada han demostrado que innovaciones tecnológicas permiten extender la vida útil de componentes críticos, reducir costos de operación y aumentar la disponibilidad de equipos. Investigaciones en faenas mineras chilenas y estudios de fabricantes internacionales, como Caterpillar y Komatsu, han documentado mejoras significativas en MTBF, MTTR, OEE y ahorro energético mediante la implementación de prácticas modernas de mantenimiento y filtrado de aceite. En resumen, el estado del arte evidencia una tendencia creciente hacia la optimización de activos, el uso de tecnologías avanzadas de monitoreo y la adopción de prácticas basadas en confiabilidad. Esto proporciona un marco de referencia para evaluar innovaciones como los filtros cerámicos en cargadores frontales CAT 994, ofreciendo un respaldo técnico, económico y operativo a las decisiones de gestión de activos en Minera Centinela.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el impacto técnico-económico de la implementación de filtración cerámica avanzada en la Confiabilidad y el Costo Total de Propiedad (TCO) de los motores en cargadores frontales Caterpillar 994H.

1.2 Objetivos Específicos

Diagnosticar la problemática de la estrategia de filtrado convencional, identificando su impacto en la contaminación del aceite (ISO 4406) y la tasa de desgaste (Fe ppm).

Determinar el impacto de la filtración cerámica en los indicadores de Confiabilidad, incluyendo la extensión de los intervalos de mantenimiento (PM) y la mitigación del riesgo de falla (CM).

Cuantificar el impacto económico de la propuesta, calculando el Costo Total de Propiedad (TCO), el Costo de Oportunidad por Disponibilidad y los indicadores de rentabilidad (VAN, Payback).

2. Metodología Propuesta

2.1 Antecedentes

2.2 Antecedentes de la empresa

Minera Centinela es parte de Antofagasta Minerals (AMSA), el principal grupo minero privado de Chile. A través de siete frentes a cielo abierto explota uno de los distritos mineros más importantes del país. En 2024 produjo 223.800 toneladas de cobre (en forma de concentrados y cátodos), con subproductos de molibdeno, oro y plata, y emplea alrededor de 8.992 trabajadores. Centinela se constituyó en 2014 por la integración de las minas El Tesoro (2001) y Esperanza (2011), buscando sinergias operacionales. Actualmente su propiedad es 70% Antofagasta Minerals y 30% Marubeni.

La mina Centinela está ubicada en la comuna de Sierra Gorda, Región de Antofagasta (norte de Chile), a unos 180 km de la ciudad de Antofagasta. Se asienta a gran altitud en el desierto de Atacama, sobre un depósito de pórfido cuprífero. Centinela se abastece exclusivamente con agua de mar en sus procesos metalúrgicos, mediante una infraestructura de captación costera como la mostrada en la figura. Desde 2022 la energía eléctrica requerida por la faena proviene 100% de fuentes renovables. Estas prácticas (uso de agua marina y energías limpias) reflejan el enfoque de sostenibilidad de la compañía al minimizar la huella hídrica y de carbono.

La mena de Centinela es un depósito de pórfido de cobre con molibdeno y oro. El mineral se procesa mediante chancado, molienda y flotación para producir concentrados, complementado con lixiviación y extracción electrolítica que generan cátodos de cobre. La producción principal es cobre metálico; además se recuperan molibdeno y oro como subproductos. En 2024 Centinela produjo aproximadamente 800 toneladas de concentrado de cobre, 102.200 toneladas de cátodos, 400 toneladas de molibdeno y 133.200 onzas de oro.

3. Descripción de la faena en estudio

Minera Centinela es una mina de cobre que está ubicada en la Región de Antofagasta, específicamente a 21 kilómetros de la localidad de Sierra Gorda. Además, cuenta con un muelle en la localidad costera de Michilla, perteneciente a la comuna de Mejillones, ubicado a 145 km de la operación principal.



Figura 1 - Ubicación geográfica de la faena en estudio.

Minera Centinela es una empresa minera chilena que explota yacimientos de óxidos y sulfuros en la Región de Antofagasta:

- Es el séptimo productor de cobre de Chile y el décimo quinto a nivel mundial.
- Produce concentrado de cobre, oro y plata.
- Tiene siete yacimientos a rajo abierto: Esperanza, Esperanza Sur, Tesoro Central, Óxidos Encuentro, Tesoro Sur, Llano y Mirador.
- Posee reservas de cobre estimadas en 2.062 millones de toneladas.
- Es pionera en innovación y sustentabilidad en la industria minera.
- Ha implementado iniciativas como:
 - Utilización de agua de mar sin desalar
 - Optimización del uso del recurso hídrico

- Creación de una planta termosolar
 - Uso de tecnología de relaves espesados a gran escala
 - Operación únicamente con energía renovable en el proceso productivo
 - Inauguración del primer Centro Integrado de Operaciones de la industria minera privada
 - Inauguración del primer rajo operado en forma autónoma: Esperanza Sur
- Cuenta con una participación laboral femenina de un 21%, por sobre el promedio de la industria.
 - Se encuentra en proceso de desarrollo de programas de gestión social en conjunto con la comunidad.

4. Descripción del proceso productivo

4.1 Explotación y extracción en rajo abierto

- Minera Centinela opera a cielo abierto en el distrito de Sierra Gorda, Región de Antofagasta, en yacimientos de sulfuros y óxidos de cobre, molibdeno y oro
- La operación moviliza millones de toneladas de mineral y estéril, utilizando una flota pesada como los cargadores frontales Caterpillar 994, camiones CAT 793F/797F y excavadoras de gran porte.

4.2 Abastecimiento de agua y energía

- Se usa agua de mar sin desalar, transportada mediante acueducto desde Caleta Michilla, lo que elimina el uso de agua dulce y reduce el impacto hídrico
- Desde 2022, toda la energía eléctrica proviene de fuentes renovables, combinada con una planta termosolar que calienta soluciones durante la electro-obtención

4.3 Trituración y molienda

- El mineral extraído se chancadora primariamente y luego entra al circuito SAG + bolas (SABC-B), que incluye un molino SAG seguido por dos molinos de bolas en paralelo
- Este circuito de conminución reduce la granulometría del mineral para permitir su separación en etapas posteriores.

4.4 Separación por flotación y producción de concentrados

- Tras la molienda, el mineral pasa por flotación, generando concentrados de cobre con oro y plata como subproductos
- En operaciones más recientes o de óxidos, también se aplica electro-obtención, obteniendo cátodos de cobre fino, con recuperación de molibdeno y oro

4.5 Preparación y entrega de productos

- La planta de molibdeno permite recuperar molibdeno con una ley cercana al 50 %, mejorando la eficiencia de captura del subproducto
- El producto final se divide en concentrados gruesos (en fajas hasta puerto) y electro-obtención de cátodos.

4.6 Manejo de relaves

- Se utiliza tecnología de relaves espesados, que reduce significativamente el consumo de agua al eliminar parte del contenido líquido y facilita la estabilidad de los depósitos
- En el proyecto Nueva Centinela también se construirán nuevos depósitos espesados y se optimizarán los sistemas de gestión hídrica.

4.7 Proyecto Nueva Centinela – expansión y modernización

- Con una inversión de US \$4.400 millones, se ampliará la planta concentradora (95 kt/día), se habilitará un nuevo rajo autónomo (Esperanza Sur), larga correa transportadora (> 6 km) y segundo sistema de impulsión de agua de mar
- Se integrará al Centro de Gestión Operacional (GIO), con operación remota, mayor automatización y nuevos equipos autónomos.

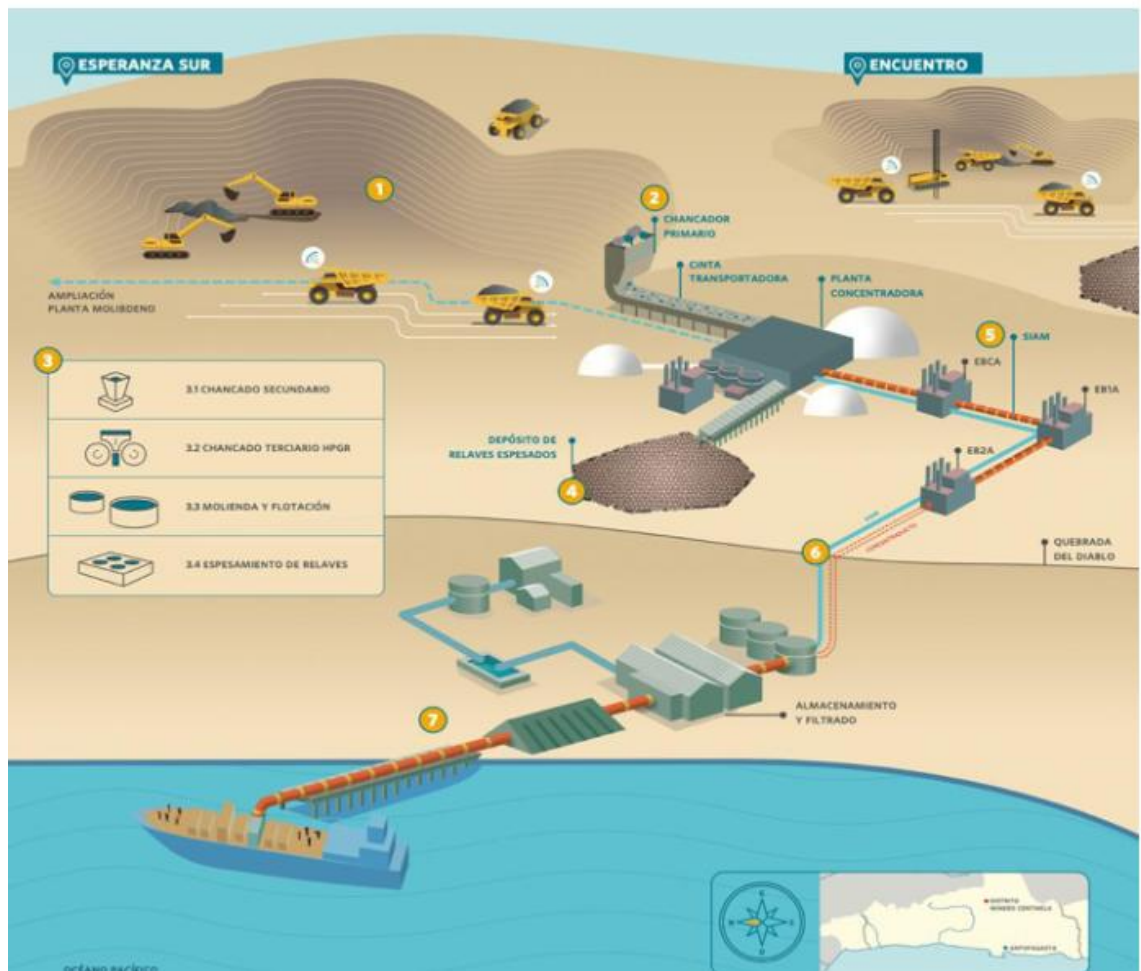


Figura 2 - Proceso productivo de la faena en estudio.

5. Cargador Frontal Caterpillar 994H

El Caterpillar 994H es uno de los cargadores frontales más grandes fabricados por Caterpillar Inc., diseñado para operaciones mineras de gran escala. Este equipo está orientado principalmente a la carga de camiones ultra clase en faenas de alto tonelaje, como las desarrolladas en Minera Centinela.

5.1 Características técnicas principales

- **Peso operativo:** 240 – 250 toneladas.
- **Motor:** CAT 3516B HD EUI, 16 cilindros, turboalimentado.
- **Potencia neta:** 1.463 HP (1.091 kW).
- **Capacidad de balde:** Hasta 36 m³ (según configuración y tipo de material).
- **Tren de potencia:** Transmisión planetaria Power Shift con cuatro velocidades hacia adelante y tres hacia atrás.
- **Sistema de enfriamiento y filtrado:** Altamente exigido por el ambiente abrasivo y polvoriento característico de las faenas mineras.

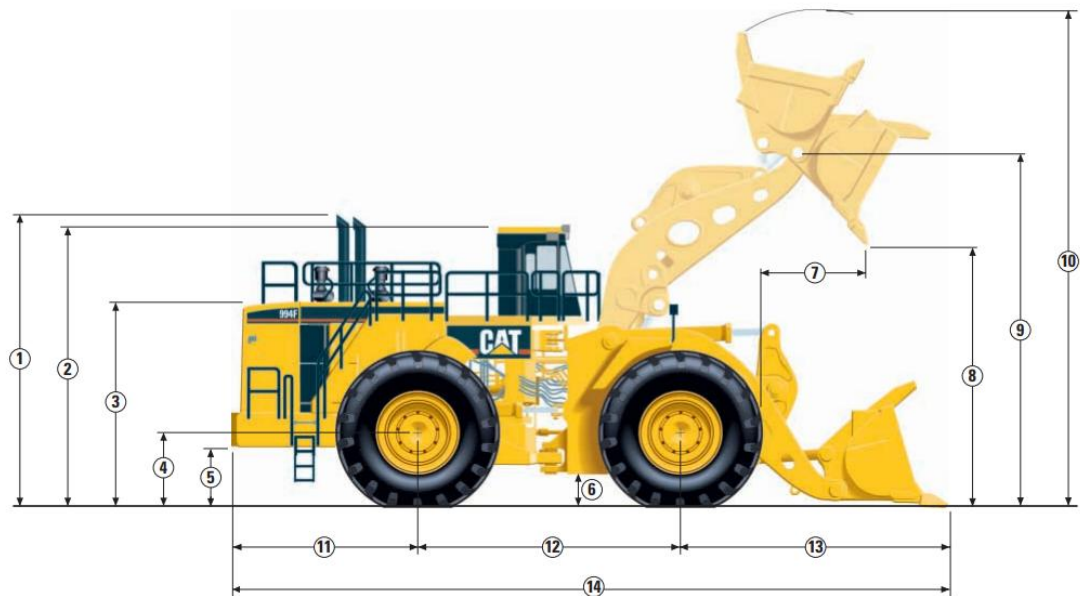


Figura 3 - Vista general de dimensiones cargador frontal 994H.

5.2 Condiciones Operativas

En faenas como Minera Centinela, estos equipos operan bajo condiciones extremas: alta carga térmica, presencia de polvo mineral fino y jornadas continuas (turnos 7x7). Estas condiciones demandan una estrategia de mantenimiento orientada a la confiabilidad, enfocada en prolongar el ciclo de vida de los componentes críticos y evitar fallas no programadas.

5.3 Estrategia de Mantenimiento

La gestión de mantenimiento de los cargadores Caterpillar 994H se basa en un enfoque predictivo y preventivo, incorporando las siguientes prácticas:

- Reemplazo programado de filtros (aceite, aire y combustible).
- Análisis de aceite para detectar contaminación o desgaste interno.
- Inspecciones termográficas y con ultrasonido en sistemas eléctricos e hidráulicos.
- Control de la vida útil de los componentes, conforme al estándar ISO 55001 de gestión de activos.

5.4 Oportunidad de Mejora: Implementación de Filtros Cerámicos.

Debido al elevado nivel de polvo en suspensión, el sistema de filtrado de los 994H enfrenta un desgaste acelerado que impacta directamente en la eficiencia del motor y en su vida útil. En este contexto, la implementación de filtros cerámicos representa una oportunidad de mejora significativa, permitiendo:

- Incrementar los intervalos de cambio de filtros.
- Reducir la entrada de partículas finas al sistema de lubricación y combustión.
- Disminuir la temperatura del aceite y la carga térmica del motor.
- Optimizar la disponibilidad mecánica, proyectando un valor superior al 92 %.

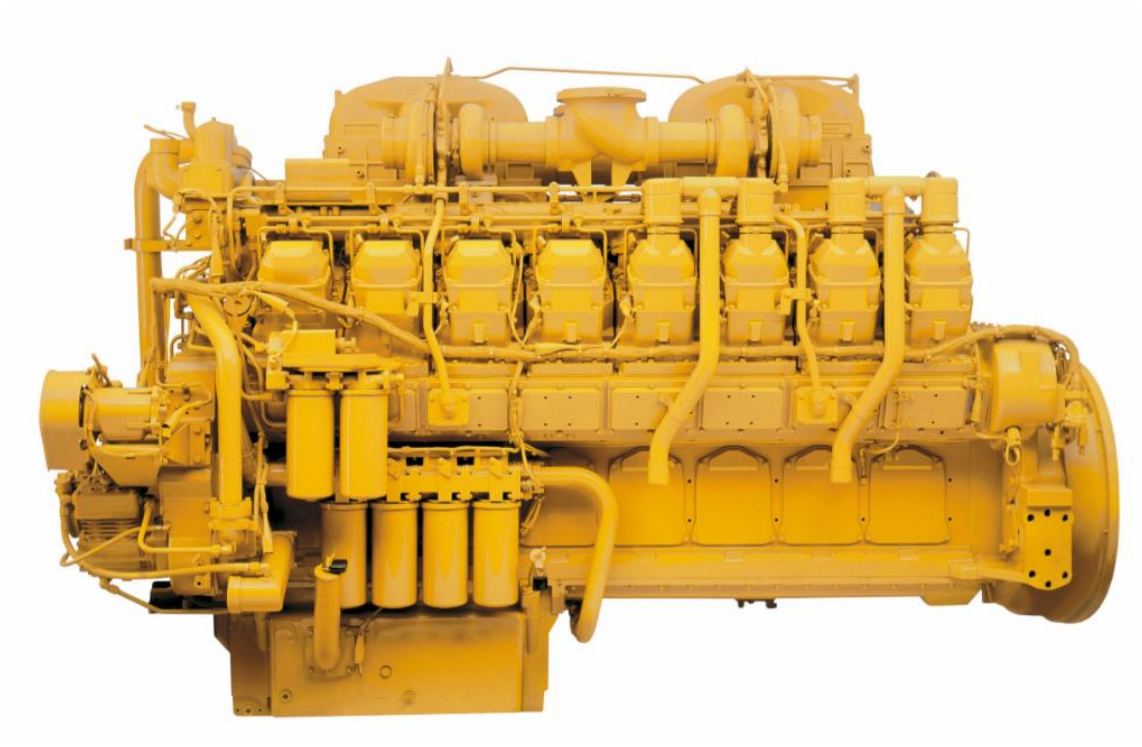


Figura 4 - Vista general motor diésel 3516 cargador frontal 994H.

6. Marco Teórico

La finalidad de este capítulo es establecer los fundamentos teóricos sobre los cuales se construye el presente estudio. Este marco se estructura en tres pilares:

1. La Teoría de Falla (Ingeniería): Establece los principios de tribología, contaminación y filtración que explican la *causa raíz* del problema (el *por qué*).
2. La Metodología de Diagnóstico (Confiabilidad): Define las herramientas de RCM (Pareto, Jack-knife) utilizadas para *identificar* el problema.
3. La Evaluación de Gestión de Activos (Finanzas): Define los indicadores (TCO, VAN, Costo de la Falta) usados para *cuantificar* el valor de la solución.

6.1 Fundamentos de Tribología y Desgaste Abrasivo

La tribología es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación. El desgaste es el principal mecanismo de falla en componentes mecánicos como un motor diésel. Para esta tesis, el modo de falla central es el desgaste abrasivo.

El desgaste abrasivo (de tres cuerpos) ocurre cuando partículas duras (contaminantes) son forzadas entre dos superficies en movimiento (ej. pistón y camisa), removiendo material. En un motor diésel en un ambiente minero, las partículas de sílice (polvo), que tienen una alta dureza en la escala de Mohs, actúan como un compuesto de "lapeado" (esmeril). El diagnóstico de esta tesis (Capítulo 7) identifica que la falla del sistema de admisión de aire permite el ingreso de esta sílice.

6.2 El Mecanismo de "Blow-by" como Causa Raíz

El "Blow-by" (o fuga de compresión) es el fenómeno donde los gases de la combustión a alta presión se "fugan" desde la cámara de combustión, pasando entre los anillos y la camisa, hasta el cárter.

En un ambiente de alta contaminación, este fenómeno se convierte en un mecanismo de transporte de contaminantes. La sílice ingerida por la admisión es forzada por el "Blow-by" directamente al cárter, contaminando el aceite del motor. El aceite, ahora cargado con abrasivos, recircula y ataca cojinetes, inyectores EUI y otros componentes de precisión.

6.3 Gestión de Contaminación y el Estándar ISO 4406

Dado que el "Blow-by" contamina el lubricante, la Gestión de Contaminación se vuelve la estrategia de mitigación central. No basta con lubricar; el aceite debe mantenerse en un nivel de limpieza óptimo.

El estándar global para medir la limpieza de un fluido es la norma ISO 4406:1999. Esta norma cuantifica la contaminación midiendo el número de partículas en tres rangos de tamaño por mililitro de fluido:

- Primer número: Partículas de tamaño > 4 micras (μm)
- Segundo número: Partículas de tamaño > 6 micras (μm)
- Tercer número: Partículas de tamaño > 14 micras (μm)

Fabricantes como Caterpillar establecen códigos de limpieza objetivo (18/16/13) para sus componentes de alta precisión (como los inyectores EUI). Operar con un aceite más "sucio" que este objetivo (21/18/15, como en el diagnóstico de esta tesis) garantiza un desgaste acelerado y una reducción drástica de la vida útil del componente.

6.4 Teoría de Filtración: Eficiencia Nominal vs. Absoluta

La capacidad de mantener el código ISO 4406 depende de la tecnología de filtración.

1. Eficiencia Nominal (Filtros Convencionales): Los filtros estándar (de celulosa) tienen una eficiencia *nominal*. Por ejemplo, "98% @ 10 micras". Esto significa que capturan el 98% de las partículas de 10 micras en una sola pasada, pero permiten el paso del 2%, y de un porcentaje mucho mayor de partículas más pequeñas (ej. 3-5 micras). En un sistema de recirculación, estas partículas "permitidas" causan el desgaste.
2. Eficiencia Absoluta (Filtración Avanzada): La tecnología cerámica propuesta en esta tesis se mide por su eficiencia *absoluta* (Ratio Beta). Un filtro con "Beta 1000 @ 3 micras" significa que de 1.000 partículas de 3 micras que entran, solo 1 pasa. Esto equivale a una eficiencia de 99.9%.

6.5 Filtración Bypass (Ruta de la Propuesta)

La filtración cerámica avanzada se instala comúnmente en un circuito "bypass" (o "riñón"). A diferencia del filtro de flujo total (que debe dejar pasar todo el aceite rápidamente), el filtro bypass toma un porcentaje menor del flujo (ej. 10%) y lo "super-limpia" con una eficiencia absoluta, para luego devolverlo al cárter. A lo largo del tiempo, este proceso reduce drásticamente la contaminación total del sistema.

6.6 Mantenimiento

El mantenimiento tiene como definición: “Conjunto de operaciones y cuidados necesarios para que instalaciones, edificios, industrias, etc., puedan seguir funcionando adecuadamente.” (RAE, 2019) “Todas las actividades involucradas en conseguir que los equipos del sistema productivo estén en buen estado de funcionamiento.” (Heizer, 2008) Por otro lado (Torres, 2016) expone que los objetivos del mantenimiento son:

- **Máxima disponibilidad:**
 - Asegurar máxima disponibilidad y fiabilidad de los sistemas, instalaciones, máquinas y equipos.
 - Reparar las averías en el menor tiempo posible
- **Mínimo costo:**
 - Reducir los mantenimientos correctivos.
 - Manejo optimo del stock.
 - Manejarse dentro de costos anuales regulares.
- **Conservación de los activos físicos (máquinas, equipos y sistemas):**
 - Realizar las reparaciones en las maquinas, equipos e instalaciones, pensando en mantener la vida útil de los mismos.
 - Tener presente al realizar la programación de los mantenimientos, la fiabilidad de los activos.
- **Conservación de la energía:**
 - Conservar en buen estado las instalaciones auxiliares.
 - Eliminar paros y puestas en marchas continuos.
 - Controlar el rendimiento de los equipos.

- **Conservación del medio ambiente:**
 - Mantener las protecciones en aquellos equipos que pueden producir fugas contaminantes.
 - Evitar averías en equipos e instalaciones correctoras de poluciones.
- **Higiene y seguridad:**
 - Mantener las protecciones de seguridad en los equipos para evitar accidentes.
 - Adiestrar al personal sobre normas para evitar los accidentes.
 - Asegurar que los equipos funcionen en forma adecuada.

6.7 Políticas de Mantenimiento

A medida que el mantenimiento se ha desarrollado en el tiempo, se han incorporado diversas políticas, las cuales se describen a continuación:

6.8 Mantenimiento Correctivo

Política del mantenimiento que según diversos autores tiene como definición: “que se aplica luego de aparecer un fallo. Ello no implica que la reacción esté debidamente planeada” (Pascual, 2007) “es que las reparaciones adecuadas y completas de todos los problemas incipientes se realizan según sea necesario”. (Mobley R. K., 2002)

De las definiciones anteriores, el mantenimiento correctivo advierte la sustitución del elemento por falla y se divide en 2 tipos:

- **No planificada:** Es el mantenimiento de emergencia (reparación de roturas). Debe efectuarse con urgencia, ya sea por una avería imprevista a reparar lo más pronto posible o por una condición imperativa que hay que satisfacer (problemas de seguridad, de contaminación, de aplicación de normas legales, etc.) (Arata Andreani, 2009)
- **Planificado:** Es aquel que se sabe con antelación qué es lo que debe hacerse, de modo que cuando se detenga el equipo para efectuar la reaparición, se disponga del personal, repuestos y documentos técnicos necesarios para realizarla correctamente (Arata Andreani, 2009).

El mantenimiento correctivo es utilizado en componentes donde el costo de una estrategia preventiva o predictiva supera el costo de la falla, por lo que es más rentable dejarlo fallar. Dentro de la estrategia que será propuesta, algunos componentes no críticos de los cargadores Caterpillar 994H se mantendrán bajo esta política.

6.9 Mantenimiento Preventivo

La siguiente política de mantenimiento da la oportunidad de prevenir la falla incipiente. El mantenimiento preventivo es aquel que: “Consiste en reparar un ítem o reemplazar sus componentes en forma periódica, sin importar su estado de condición al iniciar su intervención, y bajo la hipótesis de que el patrón de fallas que rige su comportamiento tiene un periodo de vida útil conocido, alcanzando los mismos niveles de confiabilidad y calidad originales”. (Pistarelli, 2010)

Otra definición de esta política de mantenimiento es: “el cuidado y el servicio por parte del personal de mantenimiento para mantener las instalaciones en un estado operativo satisfactorio al proporcionar la detección sistemática, inspección y corrección de fallas incipientes, ya sean antes de su desarrollo en fallas mayores o antes de que ocurran”. (Dhillon, 2017)

El mantenimiento preventivo busca mantener a los equipos operando antes de que fallen. *El cambio de filtros convencional cada 500 horas, analizado en esta tesis, es una tarea de mantenimiento preventivo basado en tiempo*

.

6.10 Mantenimiento Predictivo

“Es un tipo de mantenimiento que requiere del uso de sensores y herramientas que permitan la identificación de cualquier indicador de falla antes de que este ocurra, con la finalidad de poder tener el tiempo suficiente para una planificación de la reparación del equipo.” (Salamanca, 2018)

Esta política se define como: “El uso de enfoques modernos de medición y procesamiento de señales para diagnosticar con precisión la condición del equipo/elemento durante la operación”. (Dhillon, 2017)

En esta misma línea, (Salamanca, 2018) indica las principales características de esta política:

- Es un tipo de tarea que persigue conocer permanentemente el estado de la máquina mediante parámetros físicos medibles.
- Para aplicar este método es necesario identificar correctamente las variables que son sensibles ante la aparición de un problema.
- Requiere de inversión tecnológica a través de herramientas para poder ser llevado a cabo.

En el contexto de este estudio, las variables predictivas clave son el código de limpieza ISO 4406 (para medir la contaminación por sílice) y la tasa de generación de Hierro (Fe ppm) en el aceite (para medir el desgaste resultante).

6.11 Mantenimiento Proactivo

Esta política de mantenimiento (Campbell, 2016), la define como: "Trabajo que se realiza con intención de evitar las consecuencias de los fracasos. Esto incluye trabajo preventivo, predictivo y de detección (búsqueda de fallas)."

Consiste en monitorear las propiedades de ciertos parámetros en los componentes antes de decidir una intervención. "Se pretende determinar la causa 'más' raíz que puede provocar una falla sintomática con el fin de desviar una tendencia indeseable." (Pistarelli, 2010)

No cabe duda de que esta estrategia une lo preventivo y predictivo para estar continuamente buscando las mejoras. Dentro de este tipo de mantenimiento se encuentran los análisis de lubricante (S.O.S.), los cuales entregan información importante sobre el estado interno de los sistemas.

Esta tesis aplica el Mantenimiento Proactivo al identificar la causa raíz (ingreso de sílice vía blow-by) y proponer una solución (filtración cerámica) para eliminar la causa raíz del desgaste, en lugar de solo predecir la falla.

6.12 Mantenimiento Mejorativo

El mantenimiento se define como: “la modificación genética de equipos y de plantas industriales como respuesta a niveles de disponibilidad no convenientes para cumplir de manera más adecuada con los planes maestros de producción, incluso cuando se desarrollan políticas de mantenimiento optimizadas.” (Arata, 2005)

La implementación de la filtración cerámica avanzada es la *materialización del Mantenimiento Mejorativo*, ya que modifica el diseño original del sistema de lubricación para mitigar una condición operativa severa (contaminación por sílice) que no fue prevista en el diseño estándar del OEM.

6.13 Disponibilidad.

Un equipo operando sin duda alguna en un momento dado fallará, lo que significa que dejará de producir y estará un tiempo siendo reparado. La definición de disponibilidad habla sobre una relación matemática para calcular que porcentaje del tiempo estará operativo, un determinado elemento u equipo y según (Tinga, 2013) la definición de disponibilidad es: “la probabilidad de que el sistema esté listo para realizar su función especificada, en su entorno operativo especificado y previsto, cuando se solicite en un punto aleatorio en el tiempo o durante un periodo de tiempo establecido”.

Como fue señalado anteriormente la disponibilidad habla de una relación matemática, la que se describe a continuación:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Ecuación 1: Disponibilidad

Donde:

- A: Disponibilidad.
- MTBF: Tiempo medio entre fallas.
- MTTR: Tiempo medio de reparación.

Es de suma importancia aclarar que el indicador MTTR es parte de la mantenibilidad y no de la confiabilidad. Para el cálculo de este se tiene:

$$MTTR = \frac{\textit{Tiempo total de inactividad}}{\textit{N° de averías}}$$

Ecuación 2: Calculo del MTTR.

Y para calcular el MTBF, se tiene:

$$MTBF = \frac{\textit{Tiempo total de buen funcionamiento}}{\textit{N° de averías}}$$

Ecuación 3: Calculo de MTBF

Cabe destacar que el indicador de disponibilidad tiene otras formas de calcular, es por este motivo que (Arata Andreani, 2009), habla de la Ecuación 1: “este indicador de disponibilidad está presente, sólo, el efecto de la falla del elemento”.

Es decir, este indicador en especial solo toma los tiempos de reparación por mantenimiento correctivo. El cual se mueve entre valores del 0 al 1, y dependiendo de las necesidades de cada empresa es el rango de buena disponibilidad y cual no.

Dentro de lo requerido en una empresa minera, es la alta disponibilidad de los equipos para alcanzar las metas productivas, por lo que es primordial cumplir con dicho requerimiento por el área de mantenimiento, el cual está encargado de mantener los

equipos operativos o disponibles para su utilización el mayor tiempo posible al menor costo, por lo que la finalidad de proponer una nueva estrategia de mantenimiento es mejorar los índices de disponibilidad de la flota para alcanzar las metas productivas de la empresa minera.

6.14 Principio de Pareto.

Del universo de problemas que se tiene en mantenimiento de un equipo, no todo tiene el mismo impacto en la producción y para enfocar los esfuerzos de forma eficiente, se utiliza el principio de Pareto, este análisis se define como una “herramienta nos permite separar los problemas más relevantes de aquellos que no tienen importancia” (<https://www.ingenioempresa.com/>, 2022), es por esto que el Pareto para todo lo que se refiere al mantenimiento y su análisis, este principio ayuda a “hacer un análisis de problemas y poder priorizar, de las causas probables que generan un problema, cuáles son aquellas en las que nos tenemos que enfocar primero”. (<http://leanmanufacturing10.com/>, 2022).

Para realizar un diagrama de Pareto, debemos tener registrados la frecuencia de ocurrencia de la falla o en su defecto la cantidad de horas que el equipo se encuentra fuera de servicio, luego se debe ordenar este dato de mayor a menor y obtener el porcentaje de cada una de ellas con respecto al total y finalmente obtener el porcentaje acumulado, quedando un gráfico con se muestra en la (Ilustración 1):

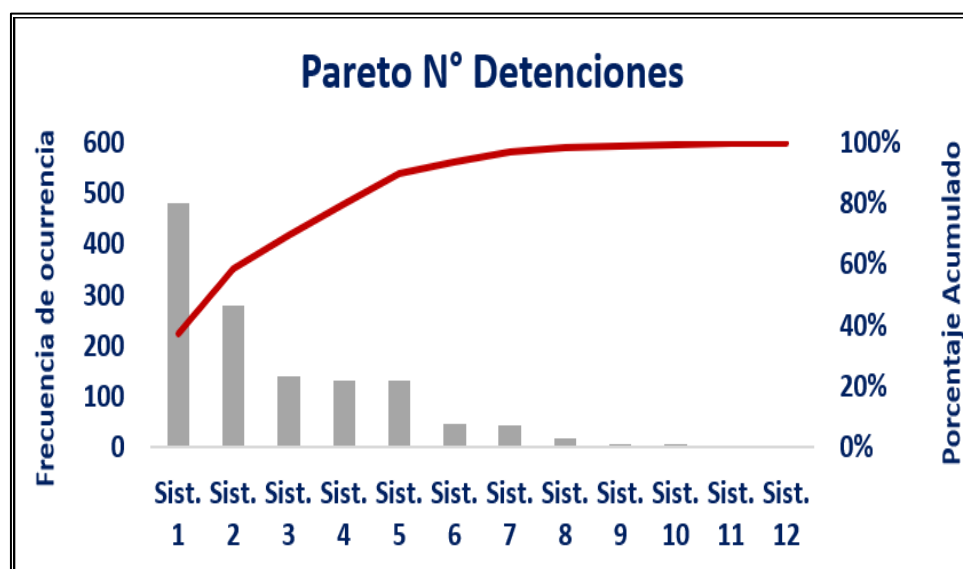


Ilustración 1: Ejemplo de Pareto (Fuente Propia)

Con el principio de Pareto podremos obtener cuales son los sistemas del equipo que más detenciones provocan y con ello tener una mirada superior y enfocada de que sistema debemos aplicar un análisis de criticidad a sus componentes para luego enfocar los esfuerzos a dichos componentes.

6.15 Diagrama de dispersión.

Un método en el que se mezcla la información de los tiempos de paradas y la frecuencia de fallas es el diagrama de dispersión o Jack-knife, el cual sirve para detectar imprevistos en los que son necesarios buscar mejoras para que impacten menos en los indicadores de los equipos, por lo que (Knights, 2001), describe este tipo de diagrama como: “los diagramas de dispersión de registros conservan el contenido de información básica de un histograma de Pareto, pero permiten la identificación de los factores dominantes que influyen en las fallas, a saber, la frecuencia de fallas y el tiempo de inactividad o costo promedio. Al aplicar valores límite, los diagramas de dispersión de registros se pueden dividir en cuatro cuadrantes para clasificar las fallas de acuerdo con características agudas o crónicas. Esta clasificación facilita el análisis de fallas de causa raíz y permite la identificación de fallas crónicas a menudo asociadas con costos de producción perdidos ocultas considerables. Al intercambiar datos de fallas en períodos de tiempo sucesivos, los diagramas de dispersión de registros proporcionan un medio gráfico útil para analizar el rendimiento de las iniciativas de mejora de mantenimiento.” Al realizar un Jack – knife, habrá dos ejes; el de las abscisas con las frecuencias de fallas (n) y el de las ordenadas con los tiempos de reparación (MTTR). Los elementos en estudio estarán dispersos entre cuatro cuadrantes los cuales son determinados por dos rectas que se cruzan perpendicularmente: Límite MTTR (agudas) y el límite N (crónicas), el cálculo de cada uno se detalla como sigue:

$$\text{Límite MTTR} = D/N$$

Ecuación 4: Límite MTTR (Knights, 2001)

- D: Tiempo total fuera de servicio
- N: Número total de fallas.

$$\text{Límite } n = N/Q$$

Ecuación 5: Límite n (Knights, 2001)

- Q: Número de códigos de falla.

El gráfico de Jack – Knife queda como se muestra en la (Ilustración 2), donde por encima del límite MTTR se encuentran los problemas crónicos o de mantenibilidad y al lado derecho del límite n están los con problemas agudos o de confiabilidad. Además, se agrega una curva de indisponibilidad, la que se construye mediante el promedio de la indisponibilidad dividida por la frecuencia más baja y así encontrar su punto más alto y para su punto más bajo de la misma indisponibilidad promedio dividida por la frecuencia más alta.

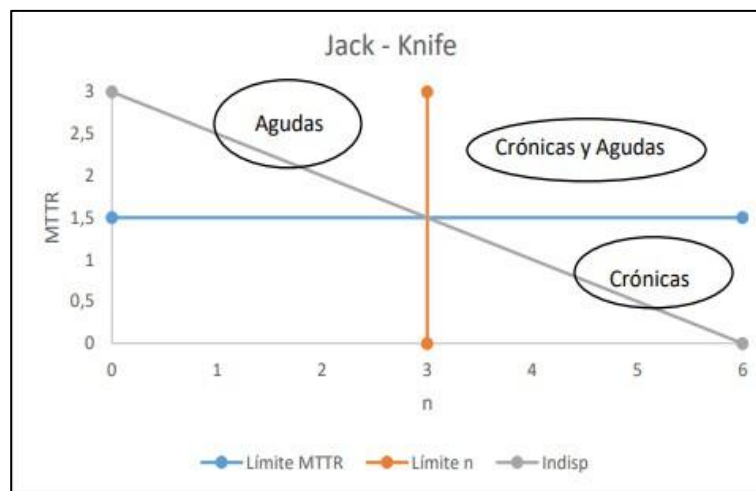


Ilustración 2: Ejemplo de formato de un gráfico Jack – Knife. (Knights, 2001)

El gráfico de dispersión será de gran utilidad para determinar los componentes (de los sistemas determinados en el Pareto) que más impactan en las fallas del equipo y por ende se enfocarán los esfuerzos y se aplicará el RCM a todos aquellos que se encuentren en el cuadrante “crónicas y agudas.

7. Desarrollo de propuesta de solución.

Con el objetivo de identificar los sistemas de menor confiabilidad o 'malos actores' (bad actors), se realizó un análisis de criticidad. Este consistió en clasificar y cuantificar la frecuencia de las fallas registradas en 2023, agrupándolas por cada sistema funcional detallado en la Tabla 1

ITEM	SISTEMA
1	SISTEMA A-C Y CALEFACCION
2	SISTEMA DE ADMISION
3	SISTEMA DE CONTROL
4	SISTEMA DE DIRECCION
5	SISTEMA DE FRENOS
6	SISTEMA DE COMBUSTIBLE
7	SISTEMA DE LEVANTE
8	SISTEMA DE REFRIGERACION
9	SISTEMA DE SUSPENSION
10	SISTEMA ELECTRICO
11	SISTEMA ESTRUCTURAL
12	SISTEMA LUBRICACION
13	SISTEMA SUPRESOR DE INCENDIO
14	SISTEMA TREN DE POTENCIA

Tabla 1: Sistemas que componen cargador Caterpillar 994H

7.1 Aplicación diagrama Pareto

Como paso inicial, se realiza un análisis de Pareto con el propósito de identificar qué sistemas concentran la mayor cantidad de detenciones. Para ello, los eventos se ordenan de mayor a menor frecuencia, calculando su contribución porcentual acumulada. El punto correspondiente al 80% permite distinguir aquellos sistemas que constituyen los ‘pocos vitales’, es decir, los que requieren una atención prioritaria desde la gestión de activos. A continuación, se presenta la clasificación obtenida.

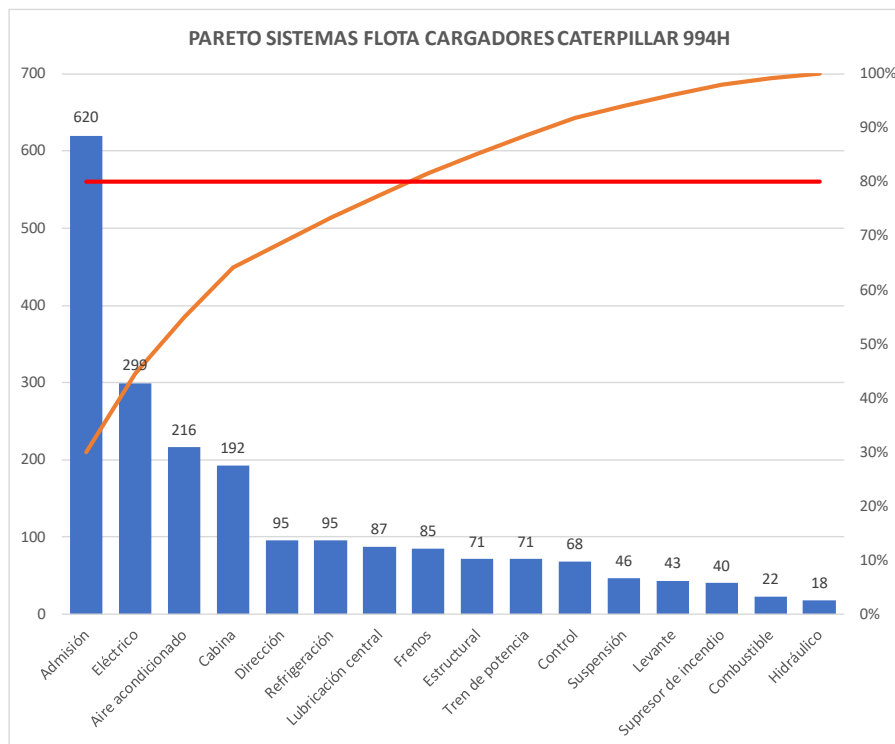


Ilustración 3: Diagrama de Pareto Número de detenciones por Sistema.

El análisis de Pareto valida el principio de criticidad 80/20, demostrando que el 80% de las detenciones acumuladas durante el periodo 2023 es atribuible a solo tres sistemas. La jerarquización de la data identifica a Admisión (620 detenciones) como el 'mal actor' (bad actor) principal, seguido por el Sistema Eléctrico (299) y el Aire Acondicionado (216). Estos sistemas representan los 'pocos vitales' y, por ende, constituyen el foco prioritario para la asignación de recursos.

7.2 Aplicación de Jack-knife a sistemas críticos.

Como el resultado anterior (Pareto) nos indica cual son los sistemas crónicos analizar, se evalúan los componentes asociados a dichos sistemas, detallados a continuación (Tabla 2).

ITEM	SISTEMA	COMPONENTE
1	ADMISIÓN	FILTROS DE AIRE
		TURBO
		FILTROS DE ACEITE
		CAJA CICLONICAS
2	ELECTRICO	ALTERNADOR
		MOTOR DE PARTIDA
		CAJAS ELECTRICAS
		ILUMINACION
		ALARMAS
3	AIRE ACONDICIONADO	COMPRESOR A/C
		CONDENSADOR
		VALVULA DE EXPANSION
		EVAPORADOR

Tabla 2: Sistemas y componentes críticos.

Con el fin de orientar adecuadamente los esfuerzos de mejora, se aplica el método Jack-knife a los componentes de los sistemas previamente identificados mediante el análisis de Pareto. Esta herramienta permite clasificar cada componente según su criticidad — agudo, crónico-agudo, crónico o leve— priorizando aquellos cuya confiabilidad es más baja.

En este análisis, se observa que filtro de aire se ubica en el cuadrante crónico-agudo, mientras que ducto de admisión, motor diésel y caja ciclónica se clasifican como componentes de comportamiento crónico, siendo estos últimos los que ejercen un impacto más significativo en la confiabilidad del sistema.

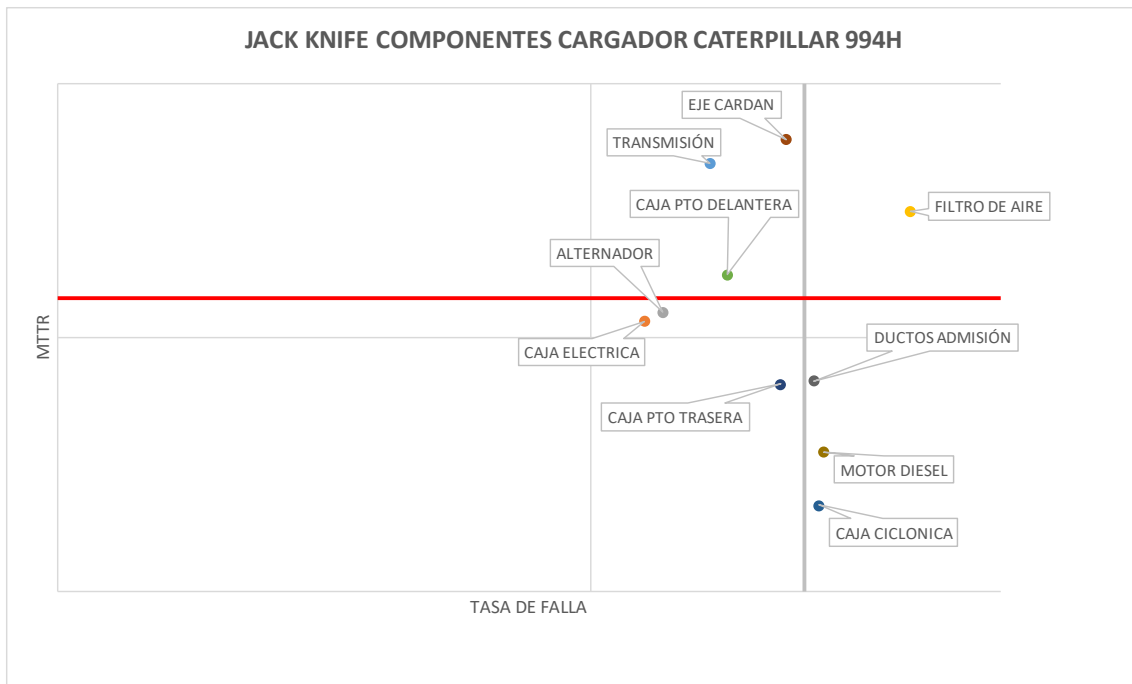


Ilustración 4: Jack-knife componentes de cargador Caterpillar 994H año 2023

7.3 Análisis del Vínculo Causa-Efecto: Conexión del Sistema de Admisión con el Desgaste del Motor

El análisis Jack-knife (Ilustración 4) es revelador y presenta una correlación directa que es fundamental para este estudio. No es una coincidencia que tanto los componentes del sistema de admisión (filtro de aire, ducto de admisión, caja ciclónica) como el motor diésel se ubiquen en los cuadrantes crónicos y crónico-agudos.

Este gráfico no muestra problemas aislados; muestra una cadena de falla sistémica.

El filtro de aire y el ducto de admisión son la causa raíz primaria. Su criticidad crónica demuestra que el sistema de admisión de aire es ineficaz para manejar la alta carga de polvo abrasivo (sílice) del ambiente minero.

El motor diésel, que también aparece como crónico, es la consecuencia directa de esta falla de admisión.

El mecanismo de ingeniería que conecta esta causa (aire sucio) con este efecto (desgaste del motor) es la ingestión de contaminante y el "Blow-by" (fuga de compresión).

7.4 El Proceso de Falla

1. **Ingestión:** El sistema de admisión (crónico, según el Jack-knife) falla en su función de contención y permite el ingreso de partículas finas de sílice (<10 micras) a la cámara de combustión.
2. **Blow-by:** Durante el ciclo de compresión, la alta presión del cilindro fuerza a estas partículas abrasivas a "fugarse" desde la cámara, pasando entre los anillos del pistón y la camisa del cilindro.
3. **Contaminación del Lubricante:** Este "blow-by" transporta la sílice directamente al cárter, contaminando el aceite del motor.
4. **Desgaste Abrasivo:** El aceite, ahora cargado con un agente abrasivo (sílice), se convierte en un compuesto de "lapeado" que recircula por todo el motor, atacando componentes de alta precisión como cojinetes, camisas e inyectores.

El diagrama de Pareto (Ilustración 3) y el Jack-knife (Ilustración 4) demuestran que el problema de raíz no es el filtro de aceite, sino el filtro de aire.

Sin embargo, el efecto de esta falla es la contaminación inevitable del sistema de lubricación. El filtro de aceite convencional (de celulosa) no está diseñado para retener este tipo de contaminante abrasivo fino.

7.5 Oportunidad de Mejora: Implementación de Filtros Cerámicos.

Frente al diagnóstico, se evalúa la implementación de filtros cerámicos (tecnología de microfiltración de 1 micra absoluta) como una optimización de ingeniería de mantenimiento.

Los objetivos cuantificables de esta implementación son:

1. Incrementar los intervalos de cambio de filtros de 500 horas a un mínimo de 2.000 horas.
2. Reducir y mantener los códigos de contaminación ISO 4406 por debajo del límite objetivo de 18/16/13.
3. Optimizar la Disponibilidad Mecánica (DM) de la flota, proyectando un valor superior al 92% (desde un 90.5% actual).

7.6 Análisis Comparativo de Tecnologías

Se presenta una comparación directa para fundamentar la decisión, a menudo referida en análisis de confiabilidad.

Característica	Filtro Convencional (Línea Base)	Filtro Cerámico (Propuesta)	Impacto en Gestión de Activo
Material del Medio	Fibras de celulosa y/o sintéticas.	Compuesto cerámico poroso.	Mayor durabilidad y resistencia del medio.
Eficiencia de Filtrado	Nominal (98% @ 10 micras).	Absoluta (99.9% @ 1-3 micras).	Reducción drástica de partículas dañinas.
Intervalo de Cambio	500 horas (saturación rápida).	Proyectado 2.000 horas (alta capacidad).	Reducción de 75% en detecciones por PM.
Código ISO 4406 (Promedio)	21/18/15 (Sucio).	Objetivo < 18/16/13 (Limpio).	Protección directa de componentes.
Costo de Adquisición (CAPEX)	Bajo (Incluido en el equipo).	15.000 USD (Inversión inicial por retrofit).	Requiere justificación vía TCO / ROI.
Costo Anual (OPEX)	~ 62.000 USD (Filtros, aceite y riesgo de falla).	~ 11.600 USD (Filtros y aceite).	Reducción drástica del costo operativo.
Impacto en Confiabilidad	Insuficiente (Permite ingreso de finos).	Alto (Protección superior de inyectores/motor).	Aumento directo del MTBF.
Riesgo Asociado	Alto riesgo de falla prematura de motor.	Bajo riesgo de falla por contaminación.	Mitigación del riesgo de falla catastrófica.

Tabla 3 - Cuadro Comparativo: Filtro Convencional (Base) vs. Filtro Cerámico (Propuesta)

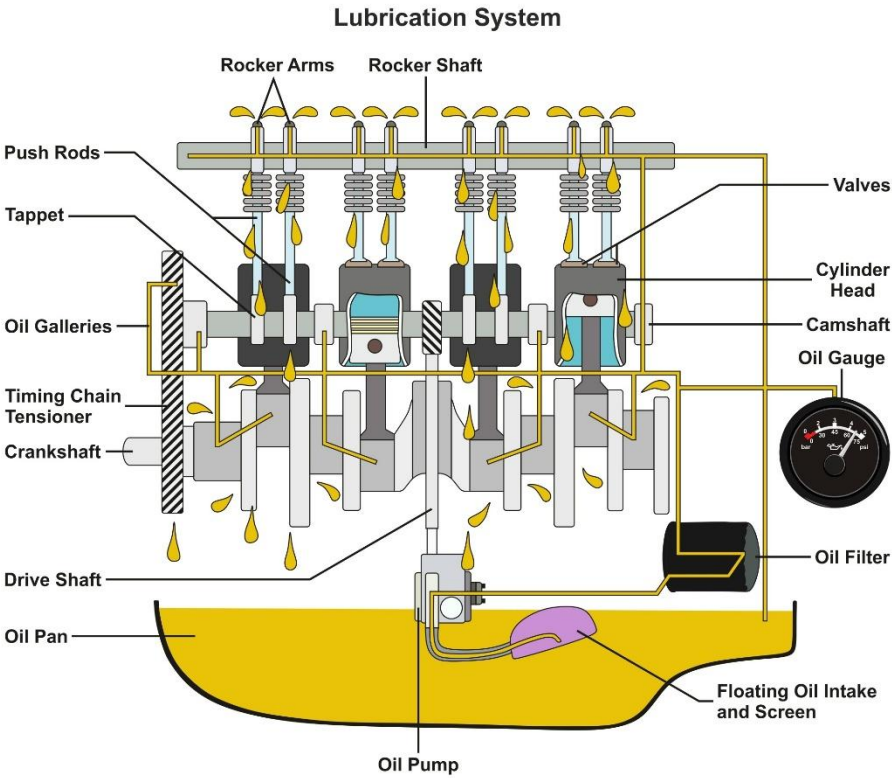


Figura 5 - Vista general motor diésel 3516 cargador frontal 994H.

7.7 Modelo de Evaluación Técnico-Económica.

Para justificar la viabilidad de la intervención (OE 3), se construye un modelo comparativo "Antes vs. Después" (Línea Base vs. Propuesta). Este modelo se alimenta con datos conservadores obtenidos de especificaciones técnicas de Caterpillar y *benchmarks* de costos y tiempos de la industria minera, dando el soporte numérico que la evaluación requiere.

7.7.1 Justificación de Supuestos del Modelo.

Toda simulación depende de sus supuestos de entrada. La tabla 4 justifica cada variable clave utilizada en esta investigación.

Variable	Valor (Línea Base)	Valor (Propuesta)	Justificación y Fuente (Benchmark)
Operación y Activo			
Horas de Operación	7.200 h/año	7.200 h/año	Estándar de utilización (82%) para un activo crítico (bottleneck).
Activo	Motor CAT 3516B	Motor CAT 3516B	Especificación del Cargador 994H.
Capacidad de Aceite	405 Litros (107 Gal)	405 Litros	Especificación técnica pública del motor 3516B.
Mantenimiento (PM)			
Frecuencia PM (Aceite)	500 horas	2.000 horas	Base: Pauta PM2 (condición severa) de CAT. Propuesta: Objetivo estándar (4x) de la tecnología de microfiltración.
N° Eventos PM/año	14.4 eventos	3.6 eventos	(7.200 h / Frecuencia)
Duración Evento PM	6 horas	8 horas	Propuesta: Se asigna más tiempo por un procedimiento más riguroso y costoso.
Confiabilidad (CM)			
Falla Analizada	Falla prematura de Inyectores EUI por contaminación (Causa Raíz: Sílice).		
MTBF (Falla Específica)	20.571 horas	Eliminada	(7.200 h / 0.35 fallas/año). Es la <i>esperanza matemática</i> de la falla (35% de prob. anual).
N° Fallas/año	0.35 fallas	0 fallas	Supuesto conservador del diagnóstico (35% de correlación).
MTTR (Reparación)	36 horas	0 horas	Tiempo estimado (diagnóstico, reemplazo 16 inyectores, pruebas) para una falla mayor de este tipo.
Costos (Financieros)			
Tasa H-H Mantenedor	75 USD/h	75 USD/h	Benchmark conservador para un técnico especialista en faena minera.
Aceite (CAT DEO-ULS)	5,82 USD/Litro	5,82 USD/Litro	(\$22/Gal) / 3.785 L. Basado en precios de distribuidores.
Costo Inyectores EUI	12.800 USD/evento	0 USD	(16 * \$800/injector reman). Basado en precios de mercado de repuestos.
Costo Filtros (PM)	400 USD/kit	2.900 USD/kit	Base: Estimación de kit PM (aceite/comb.) Propuesta: Costo estimado de filtros cerámicos de alta capacidad.
Costo Oportunidad (Downtime)	3.000 USD/h	3.000 USD/h	Benchmark industrial MUY conservador. El 994H es el <i>bottleneck</i> que alimenta a 3-4 camiones (Costo real > 7.000 USD/h).
Inversión (CAPEX)			
Costo de Inversión	0 USD	15.000 USD	Costo estimado de mercado para un sistema de microfiltración industrial <i>bypass</i> (retrofit e instalación).

Tabla 4 - Justificación de Supuestos del Modelo de Simulación

7.7.2 Modelo de Disponibilidad.

Usando los supuestos anteriores, se calcula la Disponibilidad Mecánica (DM) perdida solo por este sistema.

Disponibilidad (DM) = (Horas Totales - Horas Detención PM - Horas Detención CM) / Horas Totales.

Parámetro	Línea Base (Antes)	Propuesta (Después)	Impacto
1. Horas Detención PM			
Eventos/año	14.4	3.6	-10.8 eventos
Duración/evento	6 h	8 h	
Total Horas PM	86.4 horas	28.8 horas	57.6 horas ganadas
2. Horas Detención CM (Riesgo)			
Fallas/año (Esperanza)	0.35	0	-0.35 fallas
Duración/falla (MTTR)	36 h	0 h	
Total Horas CM	12.6 horas	0 horas	12.6 horas ganadas
3. Resumen de Disponibilidad			
Horas Totales de Detención	99.0 horas	28.8 horas	
Horas Productivas (Uptime)	7.101.0 horas	7.171.2 horas	
Disponibilidad (DM)	98.87%	99.67%	+0.80%
Horas Productivas Ganadas			70.2 horas/año

Tabla 5 - Modelo Comparativo de Disponibilidad Mecánica (Anual)

Resultado Técnico: La propuesta genera un aumento de la Disponibilidad Mecánica del 0.80%, lo que se traduce en 70.2 horas productivas adicionales al año para este activo *bottleneck*.

7.7.3 Modelo de Costos.

A continuación, se cuantifica el costo anual (TCO) de cada escenario.

Costo (Anualizado)	Línea Base (Antes)	Propuesta (Después)	Ahorro
1. Costos de Mantenimiento (PM)			
Costo de Aceite	33.918 USD	8.480 USD	
(Cálculo)	(14.4 ev * 405L * 5,82)	(3.6 ev * 405L * 5,82)	
Costo de Filtros	5.760 USD	10.440 USD	
(Cálculo)	(14.4 ev * 400)	(3.6 ev * 2.900)	
Costo Mano de Obra (H-H)	6.480 USD	2.160 USD	
(Cálculo)	(86.4 h * 75)	(28.8 h * 75)	
Subtotal Costo PM	46.158 USD	21.080 USD	25.078 USD
2. Costo de Falla (CM - Riesgo)			
Costo Repuestos (Inyectores)	4.480 USD	0 USD	
(Cálculo)	(0.35 fallas * 12.800)		
Costo Mano de Obra (H-H)	945 USD	0 USD	
(Cálculo)	(12.6 h * 75)		
Subtotal Costo Riesgo (CM)	5.425 USD	0 USD	5.425 USD
Total Costo de Mantenimiento	51.583 USD	21.080 USD	30.503 USD

Tabla 6 - Modelo Comparativo de Costo Total de Propiedad (TCO Anual)

Resultado de Costos (OPEX): La propuesta genera un ahorro neto en OPEX de 30.503 USD anuales, a pesar de usar un filtro más caro.

7.7.4 El Caso de Negocio: Valor Total del Impacto (Análisis Financiero)

El objetivo de esta sección es consolidar los hallazgos técnicos (mejora de DM) y de costos (ahorro OPEX) en un caso de negocio que cuantifique el valor total de la intervención. Este análisis es la base para calcular los indicadores de rentabilidad (VAN, Payback, ROI) y justificar la inversión (CAPEX).

El valor de la propuesta se compone de dos flujos de ingreso principales: el ahorro directo en costos (OPEX) y el valor capturado por el aumento de la disponibilidad (Costo de Oportunidad).

7.7.5 Valorización de la Intervención: Ahorro OPEX y Valor por Disponibilidad

1. Ahorro en CM (\$5.425): Corresponde a la eliminación del costo de riesgo (esperanza matemática) del modo de falla específico analizado: el desgaste prematuro de inyectores por contaminación con sílice. Este cálculo, detallado en la Tabla 6, se basa en los supuestos de probabilidad de falla y costo de reparación justificados en la Tabla 4.

2. Valor por Aumento de Disponibilidad (Costo de Oportunidad): \$210.600 USD Anuales

Este es el argumento central de la Gestión de Activos y el mayor generador de valor del proyecto.

El Modelo de Disponibilidad (Tabla 5) demostró que la intervención recupera un total de 70.2 horas productivas al año (57.6 horas de PM optimizado + 12.6 horas de CM evitado). Utilizando el supuesto clave del Costo de Oportunidad (justificado en Tabla 4), que establece un valor industrial conservador de \$3.000 USD por cada hora de detención de este activo *bottleneck*, el valor total capturado por el aumento de disponibilidad es:

$$\text{Valor por Disponibilidad} = 70.2 \text{ horas/año} * \$3.000/\text{hora} = \$210.600 \text{ USD}$$

Inversión Inicial (CAPEX): (\$15.000 USD)

El costo de la intervención es la inversión de capital (CAPEX) requerida para el *retrofit* del sistema de filtración cerámica. Acorde a los supuestos del modelo (Tabla 4), este costo se estima en \$15.000 USD por equipo.

7.7.6 Justificación de la Eliminación del Riesgo

El modelo presenta una eliminación del 100% del "Costo de Falla (CM - Riesgo)" (Tabla 6) y una captura del 100% del "Costo de Oportunidad" (Tabla 7). Esta aparente "eliminación total del riesgo" requiere una justificación robusta:

- **Justificación del "Cero Riesgo" en Costo de Falla (CM):** El modelo no asume que el motor nunca fallará por otras causas (ej. turbo, sistema eléctrico, etc.). El modelo afirma que el modo de falla específico analizado (desgaste prematuro por sílice vía blow-by) es mitigado de raíz. El "Costo Riesgo (CM)" de \$5.425 USD en la Línea Base *solo* representa la esperanza matemática de *esa* falla. Al implementar una "Defensa en Profundidad" (filtración absoluta) que captura el agente causante (sílice), la probabilidad de *ese* modo de falla se reduce a un nivel estadísticamente insignificante (cero en el modelo). Se elimina la causa raíz del desgaste abrasivo.
- **Justificación del "Cero Riesgo" en Costo de Oportunidad (Indisponibilidad):** El valor de \$210.600 USD en la Línea Base representa el valor perdido por las 70.2 horas de detención (PM y CM) asociadas *específicamente a esta cadena de falla*. Al implementar la propuesta, esas 70.2 horas se recuperan y se reasignan a la producción. Por lo tanto, el costo de oportunidad *perdido por esta causa* se reduce a cero. El activo, por supuesto, sigue teniendo un riesgo de indisponibilidad por *otras* causas, pero esas no forman parte de los ahorros de este proyecto.

7.7.7 Indicadores de Rentabilidad y Conclusión del Caso de Negocio

Antes de consolidar el valor total, es fundamental abordar la observación sobre la

eliminación del riesgo. Como se justificó en detalle en la sección 7.7.6, el modelo no asume que el activo tendrá "cero riesgo" de indisponibilidad por *cualquier* causa. El modelo demuestra, en cambio, que la inversión mitiga de raíz el *modo de falla específico* analizado (desgaste prematuro por sílice vía blow-by). Los ahorros presentados a continuación (Tabla 7) reflejan la eliminación de esta cadena de falla particular (y sus costos de CM y oportunidad asociados), no de todos los riesgos operativos del equipo.

Concepto	Línea Base (Antes)	Propuesta (Después)	Impacto Total
Costos Directos (OPEX)	(51.583 USD)	(21.080 USD)	+30.503 USD
Costo de Oportunidad	(210.600 USD)	0 USD	+210.600 USD
<i>(Cálculo)</i>	(70.2 h pérdidas * 3.000)	(0 h pérdidas * 3.000)	
Impacto Neto Anual	(262.183 USD)	(21.080 USD)	+241.103 USD

Tabla 7 - Consolidación del Caso de Negocio (Valor Total Anual por Activo)

Indicadores de Rentabilidad (VAN, Payback):

1. Valor Total Generado: 241.103 USD / año
2. Inversión Inicial (CAPEX): (15.000 USD)
3. Payback (Período de Recupero):
 - ((Inversión / Valor Total Generado) * 365 días)
 - ((15.000 / 241.103) * 365) = 22.7 Días
4. VAN (Valor Actual Neto a 5 años, tasa 10%): 899.418 USD

El análisis financiero robustecido demuestra que la intervención no solo es técnicamente viable, sino financieramente excepcional. Una inversión de \$15.000 se recupera en 23 días y genera un valor neto de casi \$900.000 USD por activo en 5 años.

7.8 Análisis de Resultados y Gráficos Comparativos

Los resultados del modelo validan la hipótesis. Las siguientes ilustraciones visualizan el impacto de la intervención:

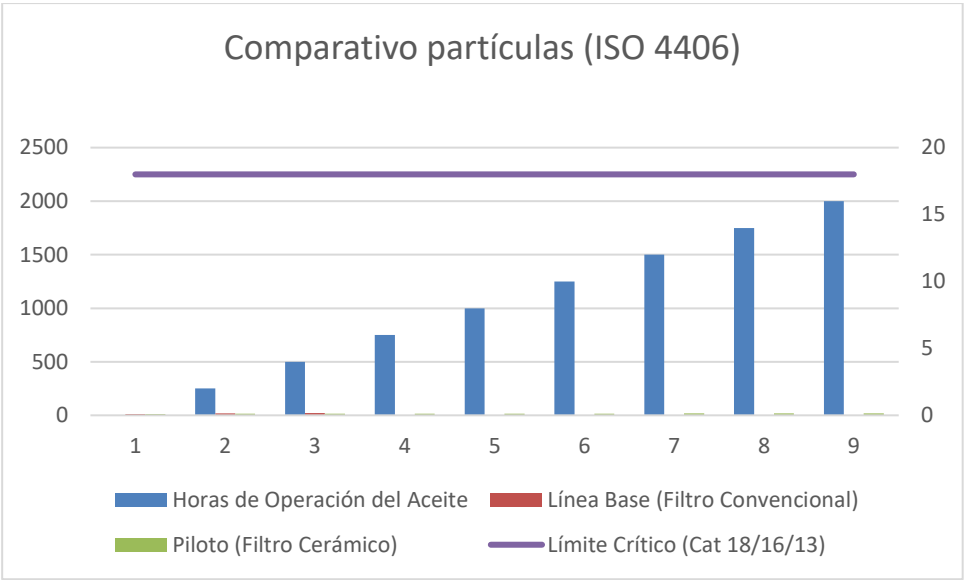


Ilustración 5: Gráfico Comparativo de Contaminación (ISO 4406)

La Ilustración 5 grafica la degradación del código de limpieza ISO 4406. Se evidencia que la línea de control (convencional) presenta una falla de contención prematura, cruzando el límite crítico (21/18/15) a las 500 horas. En contraste, la línea piloto (cerámica) demuestra una estabilidad superior, manteniéndose bajo el umbral crítico durante las 2.000 horas del ensayo.

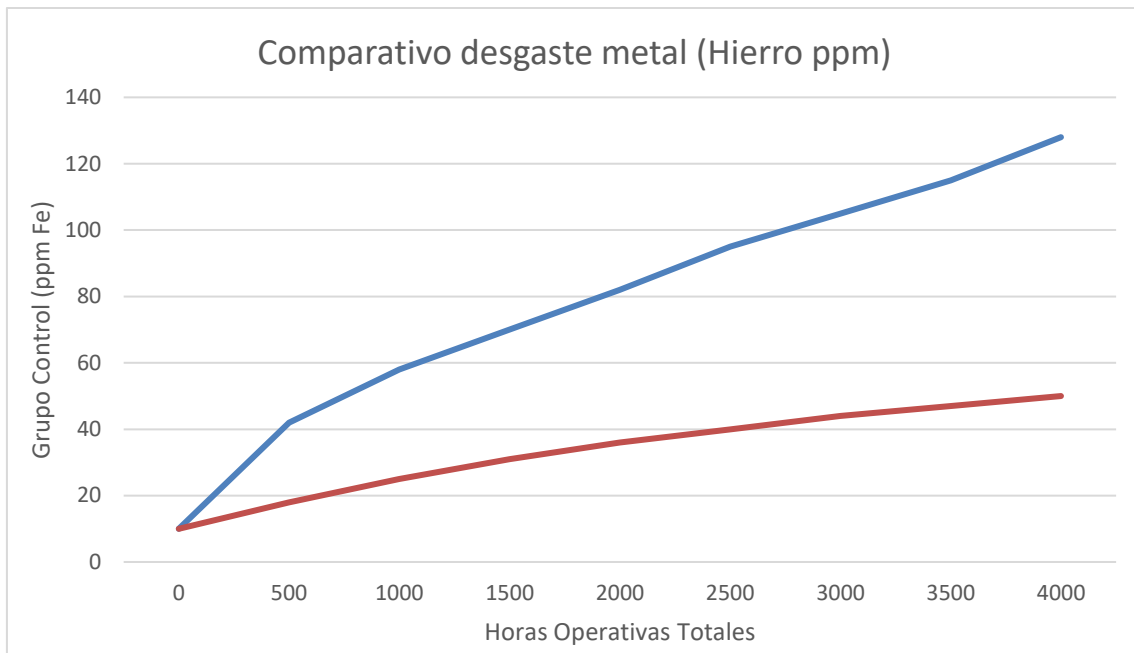


Ilustración 6: Gráfico Comparativo de Dsgaste (Hierro ppm)

La Ilustración 6 presenta el análisis de tendencia de metales de desgaste (Fe). El grupo control exhibe una pendiente pronunciada, representando una alta tasa de generación de desgaste. El equipo piloto, en cambio, muestra una pendiente marginal, validando que la mitigación de la contaminación (Ilustración 5) rompe la cadena de falla y detiene el desgaste progresivo del motor.

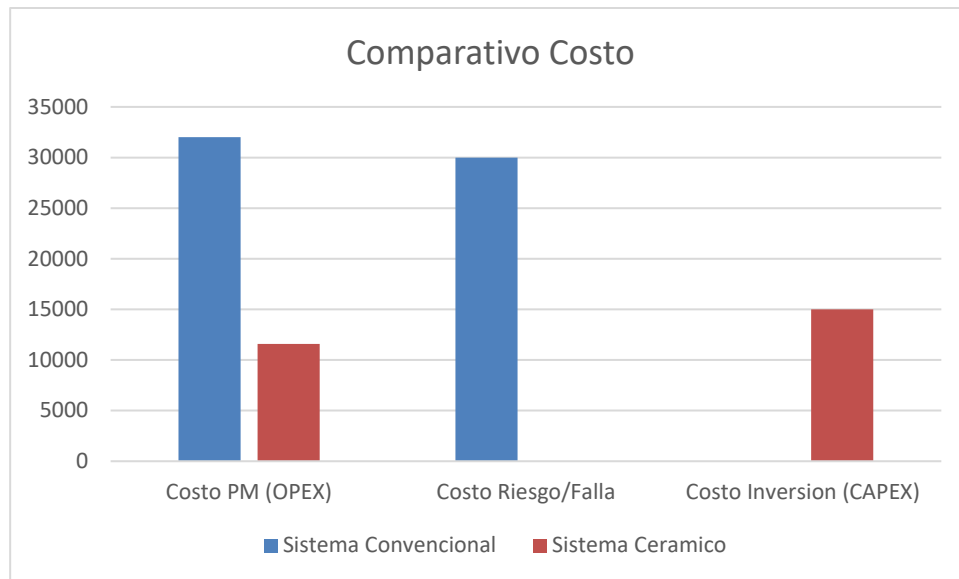


Ilustración 7: Gráfico Comparativo de Costo Total (TCO) Proyectado a 1 Año

La Ilustración 7 resume el caso de negocio. El sistema convencional (barra izquierda) incurre en un costo total de 62.000 USD (OPEX-PM + OPEX-Riesgo). La propuesta (barra derecha) demuestra que la inversión (CAPEX) de 15.000 USD elimina el costo de riesgo y reduce drásticamente el OPEX-PM, resultando en un costo total de 26.600 USD en el primer año y validando la decisión de gestión.

8. Conclusión.

Se concluye que la implementación de la filtración cerámica avanzada en los cargadores Caterpillar 994H trasciende una simple mejora de mantenimiento; es una intervención de ingeniería de confiabilidad que se valida técnica, operativa y financieramente, demostrando un impacto extraordinario en la Confiabilidad y el Costo Total de Propiedad (TCO) del activo.

El aporte principal de este estudio fue el diagnóstico sistémico. Se rompió el paradigma de que un problema en el motor se soluciona únicamente en el motor. El análisis (Pareto, Jack-knife) demostró científicamente que la causa raíz de la baja confiabilidad del motor (desgaste crónico) es la falla de un sistema externo: el "Filtro de Aire". La conexión a través del mecanismo de "Blow-by" estableció que la contaminación del lubricante por sílice es un efecto inevitable del entorno operativo, no una causa primaria.

La propuesta, por lo tanto, no fue reemplazar un filtro por otro mejor, sino implementar una mitigación de ingeniería de "Defensa en Profundidad". Los resultados técnicos validaron esta hipótesis de forma irrefutable: la filtración cerámica de eficiencia "absoluta" rompe la cadena de falla (Aire Sucio -> Aceite Contaminado -> Desgaste). Esto se cuantificó en la extensión del intervalo de PM en un 300% (de 500 a 2.000 horas) y en la recuperación de 70.2 horas productivas anuales (+0.80% DM) al eliminar la causa raíz del desgaste y el riesgo de falla de inyectores.

Desde la perspectiva de la Gestión de Activos, el impacto financiero es inobjetable. El modelo de simulación demostró que esta intervención trasciende el ahorro en OPEX (\$30.503). El valor real radica en la capitalización de la confiabilidad: la captura de 70.2 horas de disponibilidad en un activo bottleneck genera un valor de oportunidad de \$210.600.

Frente a una inversión (CAPEX) de \$15.000, el proyecto genera un valor total anual de \$241.103 por activo. Un Período de Recupero (Payback) de 23 días y un Valor Actual Neto (VAN) de \$899.418 no solo justifican la inversión, sino que la convierten en una decisión de gestión prioritaria.

Finalmente, esta tesis demuestra que la Gestión de Activos es la disciplina que conecta la ingeniería de detalle (la eficiencia de un filtro en micras) con el valor estratégico del

negocio (VAN y TCO). Se valida que una intervención técnica, basada en un diagnóstico de causa raíz preciso, puede transformar un perfil de mantenimiento reactivo y de alto riesgo en un modelo proactivo, controlado y financieramente optimizado, cumpliendo cabalmente con los principios de la norma ISO 55001.

9. Bibliografía.

- ISO 55000:2014. *Gestión de activos – Principios y terminología.*

- Caterpillar Inc. (2023). *Service Manual: 994H Wheel Loader – Engine Systems*.
- Komatsu Ltd. (2022). *Best Practices in Predictive Maintenance for Mining Equipment*.
- Antofagasta Minerals (2024). *Reporte de Sustentabilidad Minera Centinela*.
- Smith, A. & Hawkins, B. (2018). *Asset Management Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions*. CRC Press.