



UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS

FACULTAD DE INGENIERÍA Y NEGOCIOS

TÍTULO PROYECTO:

**“ANÁLISIS PREDICTIVO TRIBOLÓGICO EN EQUIPO DE CAMIONES CAEX
DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC.”**

HAVLICZEK MONTOYA MAURICIO

MACHEO LAGOS RODRIGO

ROJAS CORTÉS NATALIA

2025

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS
FACULTAD DE INGENIERÍA Y NEGOCIOS

“ANÁLISIS PREDICTIVO TRIBOLÓGICO EN EQUIPO DE CAMIONES CAEX
DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC.”

Profesor guía: Sr(a). Rafael Loyola.

MAYO

2025

AGRADECIMIENTOS

No está permitido incluir ningún tipo de declaración que pudiese ser considerada ofensiva.
Sus agradecimientos no deben sobrepasar esta hoja.

DEDICATORIA

RESUMEN

El presente informe aborda el desarrollo de un sistema de análisis predictivo tribológico aplicado a la flota de camiones CAEX (carga y extracción), que operan en la División Radomiro Tomic (DRT). Esta flota representa un eslabón crítico dentro del proceso productivo minero, ya que se encarga del transporte continuo de material desde los frentes de carguío hacia las plantas de procesamiento.

En los últimos años, se ha observado un aumento significativo en los costos de mantenimiento, principalmente asociados a fallas tribológicas prematuras en componentes como motores, transmisiones y ejes. Estas fallas, derivadas del desgaste acelerado y de prácticas de lubricación inadecuadas, han afectado negativamente la disponibilidad operativa y la eficiencia de los equipos. En este contexto, el objetivo general de la investigación es desarrollar un sistema de análisis predictivo tribológico que permita anticipar fallas, optimizar los ciclos de mantenimiento, aumentar la disponibilidad y reducir los costos operacionales asociados al desgaste y lubricación.

Para ello, se plantea como estrategia la integración de tecnologías como machine learning e IoT (internet de las cosas), las cuales han demostrado ser eficaces para analizar grandes volúmenes de datos operacionales y generar predicciones confiables en tiempo real.

A través del análisis de la situación actual, el uso del diagrama de espina de pescado y un análisis FODA, se identificaron múltiples causas que influyen en el problema, incluyendo la limitada digitalización, la escasa capacitación técnica y la falta de integración entre sistemas de monitoreo y planificación.

A partir de esto, se propusieron acciones estratégicas orientadas a superar estas brechas, priorizando la capacitación, la inversión tecnológica y el diseño de un piloto escalable. Los estudios previos revisados validan la viabilidad técnica y económica de implementar este tipo de soluciones, con evidencias de aumento en la disponibilidad de camiones CAEX y reducción en costos de mantenimiento por fallas prematuras en sistemas tribológicos.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I	3
PROBLEMA	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.1.1. Identificación del problema	3
Datos tribológicos de la flota de camiones CAEX en la división Radomiro Tomic	5
1.1.2. Análisis	35
1.1.3. Formulación del problema.....	39
1.2. Objetivos de la investigación.....	40
1.2.1. Objetivo general	40
1.2.2. Objetivo específico	40
1.3. Justificación del proyecto	40
1.4. Alcance del proyecto	41
1.4.1. Análisis Predictivo Tribológico:.....	41
1.4.2. Recolección y Análisis de Datos:	42
CAPÍTULO II	45
MARCO CONCEPTUAL	45
2.1. Reseña Histórica	46
2.2. Bases Teóricas	47
2.2.1. Gestión de mantenimiento y confiabilidad operacional	47
2.2.2. Optimización de activos físicos y ciclo de vida	48
2.2.3. Aplicación de machine learning en ingeniería	48
2.3. Bases legales	49
2.3.1. Ley N. ° 16.744 sobre Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales	49
2.3.2. Reglamento de Seguridad Minera (Decreto Supremo N.° 132 del Ministerio de Minería)	49
2.3.3. Ley N.° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente.....	49
2.3.4. Ley N.° 19.628 sobre Protección de la Vida Privada	50
2.3.5. Normas ISO aplicables	50
2.3.6. Políticas y procedimientos internos de Codelco (u otra empresa propietaria)	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Detalle de criticidad por minerales Hierro, Cobre, Aluminio y Sodio.....	6
Figura 2	Detalle de criticidad por minerales Silicio, Plomo, Calcio y Magnesio.....	7
Figura 3	Detalle de criticidad por minerales Zinc, Estaño, Vanadio y Titanio.....	8
Figura 4	Detalle de criticidad por minerales Cromo, Niquel, Molibdeno y Boro.....	9
Figura 5	Grafico Punto Inflamación por Aceite Lubricante y Marca.....	10
Figura 6	Grafico por Componente % de Agua por Marca.....	10
Figura 7	Grafica de muestras por tipo de aceite en flota Caterpillar.....	11
Figura 8	Grafica de muestras por tipo de aceite en flota Komatsu.....	11
Figura 9	Grafico Partículas por Criticidad.....	12
Figura 10	Grafica de Viscosidades por Criticidad.....	13
Figura 11	Relación de TAN vs TBN.....	13
Figura 12	Disponibilidad promedio por Modelo de Maquinaria.....	14
Figura 13	Confiabilidad por Marca.....	14
Figura 14	Gráfico distribución de Viscosidad por tipo de Aceite.....	15
Figura 15	Distribución de criticidad.....	15
Figura 16	Evolución de disponibilidad diaria.....	16
Figura 17	Comparación de desgaste (Fe, Cu, Si).....	16
Figura 18	Promedio de confiabilidad por componente.....	17
Figura 19	Distribución de niveles de hierro (Fe).....	17
Figura 20	Relación entre Fe y Si.....	18
Figura 21	Numero de Registro de Componente con mayor disponibilidad.....	18
Figura 22	Promedio de disponibilidad por tipo de aceite.....	19
Figura 23	Promedio de confiabilidad por tipo de aceite.....	19
Figura 24	Disponibilidad v/s Confiabilidad.....	20
Figura 25	Confiabilidad promedio por flota y marca top 10.....	20
Figura 26	Disponibilidad promedio por flota y marca top 10.....	21
Figura 27	Promedio de partículas por tamaño.....	21
Figura 28	Cantidad de muestras por componentes.....	22
Figura 29	Metrica Evolución de Fallas Totales.....	22
Figura 30	Metrica camiones disponibles a lo Largo tiempo.....	23
Figura 31	Metrica MTTR (horas) a lo largo del tiempo.....	24
Figura 32	Metrica Tasa de Fallas a lo Largo del tiempo.....	25
Figura 33	Metrica TBF total (horas) en el tiempo.....	26
Figura 34	Metrica MTBF (horas) en el tiempo.....	27
Figura 35	Metrica Confiabilidad % en el tiempo.....	28
Figura 36	Metrica Distribución de MTTR.....	29
Figura 37	Metrica Distribución de MTBF.....	30
Figura 38	Metrica Distribución de Tasa de Fallas.....	31
Figura 39	Metrica Relación entre MTBF y Confiabilidad.....	32
Figura 40	Metrica Relación entre Tasa de Fallas y confiabilidad.....	33
Figura 41	Metrica Relación entre MTTR y MTBF.....	34
Figura 42	Metrica Boxplot de Confiabilidad %.....	35
Figura 43	Análisis FODA.....	36
Figura 44	Causas de fallas tribológicas prematuras.....	37
Figura 45	Ubicación geográfica División Radomiro Tomic.....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 0.1 <i>Resumen de normativas para el proyecto</i>	51
--	-----------

INTRODUCCIÓN

La minería chilena, es una de las actividades económicas más relevantes del país, en ella los camiones CAEX (carga y extracción) desempeñan un rol fundamental en el proceso de producción. Estos vehículos de gran tonelaje, diseñados específicamente para operar en faenas mineras a cielo abierto, son esenciales para el transporte eficiente de grandes volúmenes de material, como mineral extraído y material estéril.

La importancia de los camiones CAEX radica principalmente en su capacidad de carga, que puede superar las 300 toneladas en modelos como los Caterpillar 797F o los Komatsu 980E. Esto permite disminuir la cantidad de ciclos de transporte necesarios, optimizando los tiempos y reduciendo costos operacionales.

Además, los camiones CAEX están diseñados para operar en condiciones extremas, como altas temperaturas, polvo en suspensión y terrenos irregulares, lo que los hace indispensables en el entorno geográfico del norte de Chile. La confiabilidad de estos equipos permite asegurar la continuidad operacional, siendo un factor crítico en un sector donde cada hora de detención puede implicar pérdidas millonarias.

En este contexto, una gestión eficiente de los activos críticos se transforma en un factor determinante para la competitividad y sostenibilidad de las compañías del rubro minero.

En la División Radomiro Tomic, la flota de camiones CAEX cumple una función estratégica dentro del ciclo productivo minero, al encargarse del transporte continuo y eficiente de grandes volúmenes de material fragmentado desde los frentes de carguío hasta las plantas de chancado y procesamiento. Esta actividad constituye un eslabón esencial para la continuidad operacional, ya que cualquier interrupción o ineficiencia en este flujo puede generar cuellos de botella que impactan directamente en la productividad y en los indicadores de cumplimiento de metas diarias.

Debido a la exigente naturaleza del entorno minero caracterizado por condiciones climáticas adversas, topografía compleja y jornadas de operación continua las 24 horas del día, estos equipos son sometidos a altos niveles de esfuerzo mecánico, lo que exige una gestión rigurosa de su mantenimiento para asegurar su disponibilidad, confiabilidad y rendimiento sostenido en el tiempo.

Sin embargo, se ha identificado un aumento significativo en los costos de mantenimiento, los cuales están estrechamente vinculados a fallas prematuras en sistemas tribológicos críticos como motores, transmisiones y ejes. Estas fallas, derivadas de desgaste excesivo y prácticas inadecuadas de lubricación, generan impactos directos en la disponibilidad operativa y en la continuidad de los procesos productivos (González, 2022).

De acuerdo con reportes internos, aproximadamente el 35% del presupuesto de mantenimiento de la flota de camiones CAEX está relacionado con incidencias tribológicas, lo que evidencia la necesidad urgente de implementar estrategias de monitoreo y análisis más robustas.

En respuesta a esta problemática, el presente estudio aborda la prefactibilidad de implementar un modelo de análisis predictivo tribológico, apoyado en tecnologías de machine learning y sistemas IoT (internet de las cosas), orientado a anticipar fallas, optimizar ciclos de mantenimiento y reducir costos operacionales.

Investigaciones recientes destacan que este tipo de soluciones puede aumentar el gasto de mantenimiento de un 5 a un 15% y extender la vida útil de los componentes antes de un cambio de repuesto lo que genera una disminución del costo de cambio de componente si se detecta adecuadamente el factor crítico o de atención en el análisis tribológico.

La relevancia estratégica del presente proyecto radica en su potencial para transformar el enfoque reactivo actual por una gestión predictiva, elevando los estándares de confiabilidad, disponibilidad y rendimiento de los equipos CAEX. A su vez, la adopción de estas tecnologías representa un paso concreto hacia la digitalización de los procesos operacionales, alineándose con las metas corporativas de eficiencia, sustentabilidad y liderazgo en innovación tecnológica dentro del sector minero.

Este estudio pretende desarrollar un sistema de análisis predictivo tribológico para anticipar fallas en la flota de camiones CAEX, de la División Radomiro Tomic, optimizando los ciclos de mantenimiento, aumentando las disponibilidades y reduciendo los costos operacionales asociados a desgaste y lubricación.

CAPÍTULO I

PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

1.1.1. Identificación del problema

El problema general se refiere a la ausencia de una herramienta de análisis tribológico predictivo que optimice el mantenimiento de los camiones CAEX.

La tribología, es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación, permite implementar estrategias de mantenimiento predictivo basadas en el análisis de condición. A través del monitoreo de indicadores como viscosidad, presencia de partículas metálicas y temperatura del lubricante, es posible anticipar el desgaste de piezas clave (Stachowiak & Batchelor, 2014).

Actualmente la flota de camiones CAEX de la División Radomiro Tomic desempeña un papel fundamental en las operaciones mineras de la empresa, cumpliendo un rol esencial en el transporte de material, siendo sometidos a condiciones extremas de operación como cargas pesadas, terrenos irregulares y jornadas prolongadas, lo que produce un desgaste significativo en sus componentes tribológicamente críticos (González & Herrera, 2020).

En los últimos años, se ha observado un incremento en los costos operacionales asociados a fallas prematuras en sistemas tribológicos críticos, como motores, transmisiones y ejes. Estas fallas, relacionadas con desgaste excesivo o inadecuadas prácticas de lubricación, no solo generan tiempos de inactividad prolongados, sino que también afectan la productividad durante de la operación. Según informes internos, aproximadamente el 35% de los costos de mantenimiento están relacionados con problemas tribológicos, lo que evidencia la necesidad de adoptar un enfoque más proactivo.

El análisis predictivo tribológico ha ganado relevancia en la industria minera como una herramienta clave para mejorar la eficiencia operativa y reducir costos asociados a desgaste y lubricación. Investigaciones recientes, como las realizadas por Johnson et al. (2021), destacan que la implementación de sistemas predictivos tribológicos puede reducir los costos de mantenimiento en

un 25% y aumentar la vida útil de los componentes en un 20%.

Estos avances se sustentan en el uso de tecnologías como machine learning e IoT, que permiten procesar grandes volúmenes de datos tribológicos en tiempo real y generar predicciones precisas.

La necesidad de mejorar la gestión tribológica de la flota de camiones CAEX se justifica por varios factores, entre ellos se pueden destacar:

Impacto económico asociado a fallas prematuras:

Las fallas en componentes tribológicos, como motores, transmisiones y sistemas de lubricación representan aproximadamente el 35% del total de los costos de mantenimiento de la flota, según informes internos de la organización. Estas fallas no solo requieren intervenciones correctivas costosas, sino que también generan detenciones no programadas que afectan negativamente la productividad y la disponibilidad operacional de los camiones (González, 2022).

Disponibilidad de tecnologías avanzadas aplicables:

El desarrollo de soluciones basadas en análisis predictivo machine learning e Internet de las Cosas (IoT) ha demostrado ser altamente eficaz en la detección temprana de patrones de desgaste y fallos tribológicos. Estas herramientas permiten transformar datos en información útil para la toma de decisiones en tiempo real, mejorando la planificación del mantenimiento (Johnson et al., 2021).

Contribución a la sostenibilidad operativa:

La implementación de un modelo predictivo tribológico no solo implica beneficios económicos, sino también ambientales, al reducir el consumo innecesario de repuestos, aceites y recursos energéticos, disminuyendo la huella de carbono asociada a las actividades de mantenimiento correctivo intensivo.

Alineación con los objetivos estratégicos corporativos:

La compañía ha definido como eje estratégico el fortalecimiento de la transformación digital, la automatización de procesos y la sustentabilidad operacional. En este marco, la mejora de la gestión tribológica mediante un sistema predictivo se alinea directamente con estas metas institucionales de largo plazo.

Datos tribológicos de la flota de camiones CAEX en la división Radomiro Tomic

Se realizan gráficos con datos simulados basado en un período de cuatro meses de recopilación y tratamiento de información proveniente de distintas plataformas tecnológicas utilizadas por CODELCO, específicamente en su División Radomiro Tomic.

Se generó una simulación de un mes, abarcando el período comprendido entre el 01 de abril de 2025 y el 05 de mayo de 2025, lo que arrojó un total de 8.134 registros únicos.

Estos datos representan una muestra sintética y estructurada que permite modelar situaciones reales sin comprometer información sensible ni vulnerar políticas de confidencialidad.

Entre las variables simuladas se incluyen datos relacionados con:

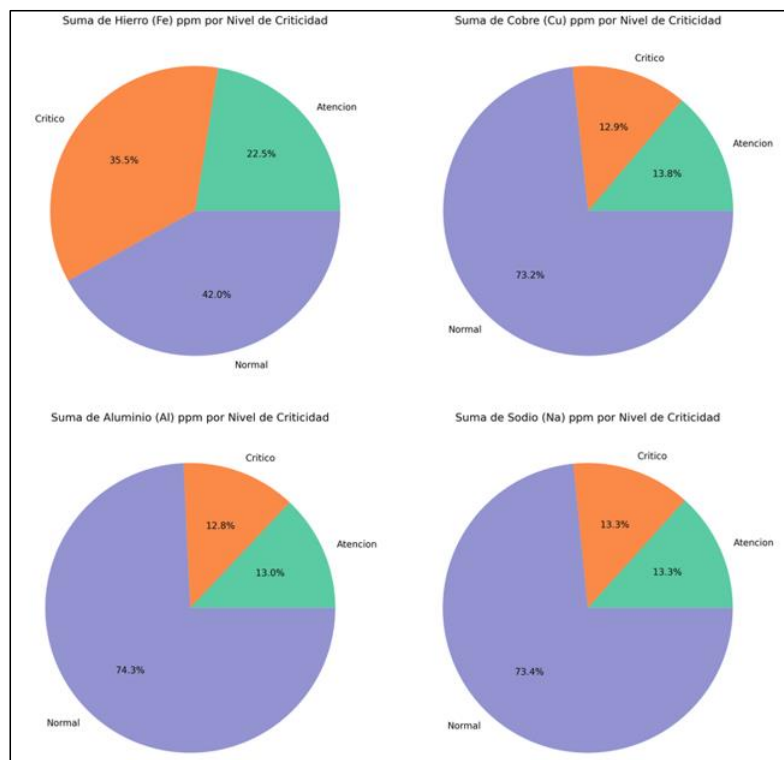
- Identificación de camiones y flotas operativas.
- Componentes críticos y sus ciclos de vida.
- Tipos de aceites y sus rangos óptimos de trabajo.
- Porcentaje de disponibilidad operacional por unidad.
- Series y códigos de mantenimiento.
- Indicadores de uso, temperatura y desgaste.

La finalidad de esta simulación es servir como base para la validación de modelos predictivos de mantenimiento, optimización del rendimiento y proyección de fallas en equipos de alto valor.

A continuación, se presentan gráficos realizados con datos tribológicos de la flota de camiones CAEX de la División Radomiro Tomic.

Figura 1

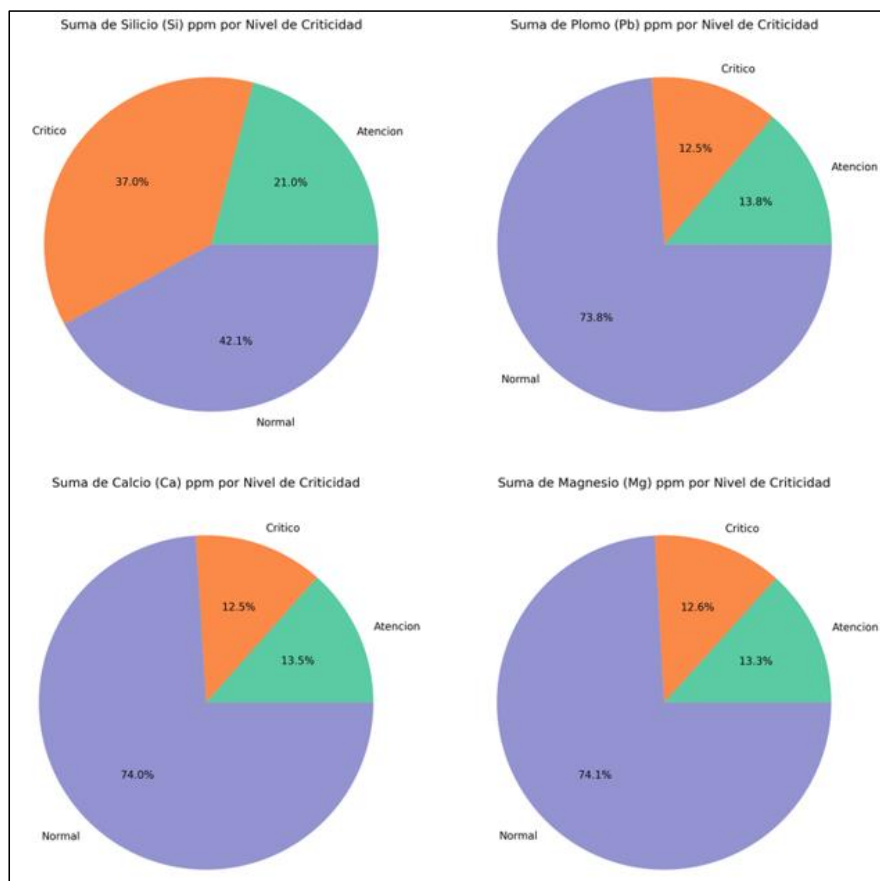
Detalle de criticidad por minerales Hierro, Cobre, Aluminio y Sodio.



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 2

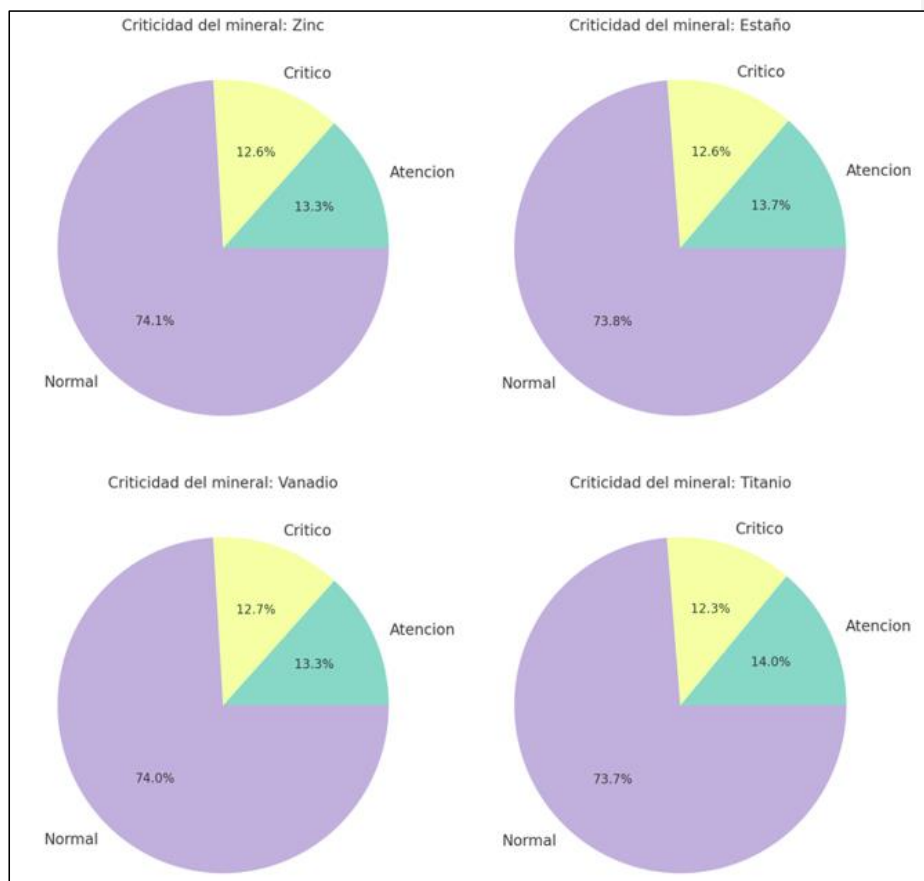
Detalle de criticidad por minerales Silicio, Plomo, Calcio y Magnesio



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 3

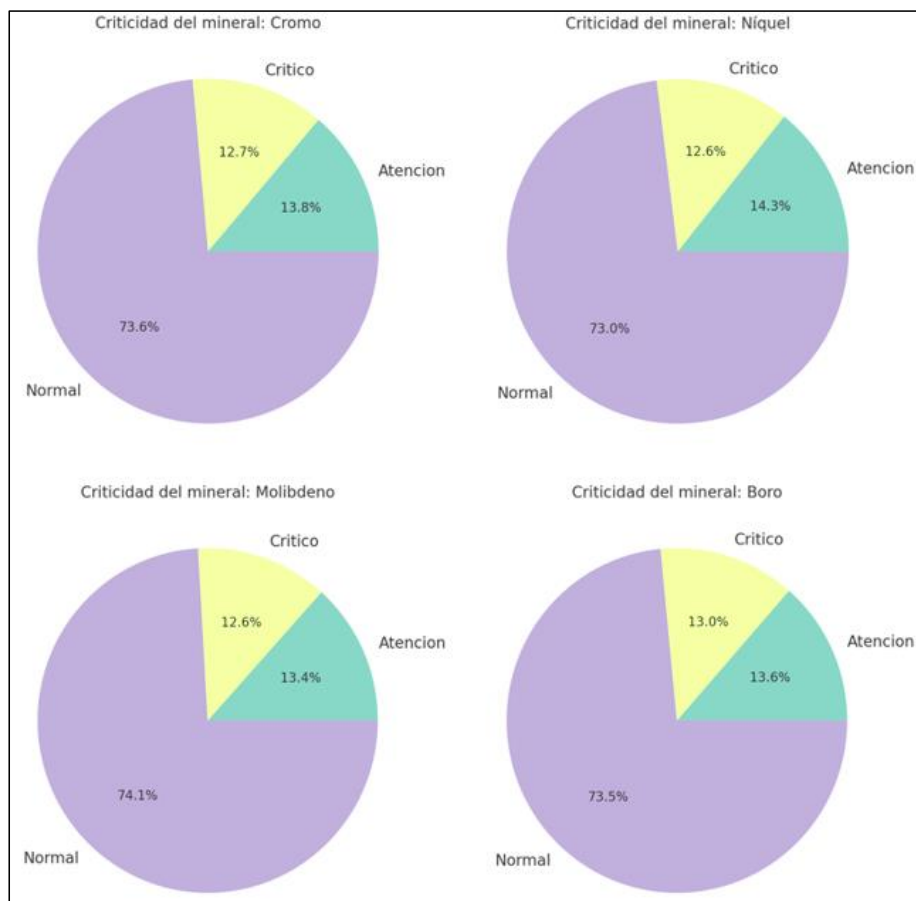
Detalle de criticidad por minerales Zinc, Estaño, Vanadio y Titanio



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 4

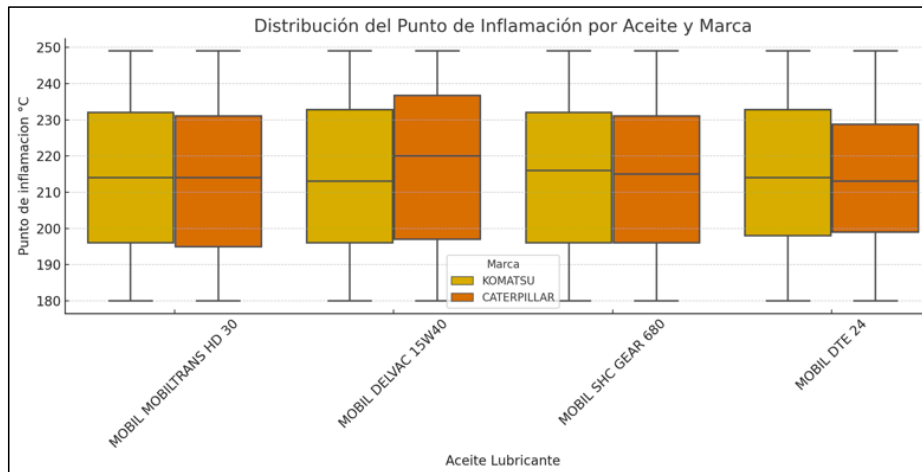
Detalle de criticidad por minerales Cromo, Níquel, Molibdeno y Boro



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 5

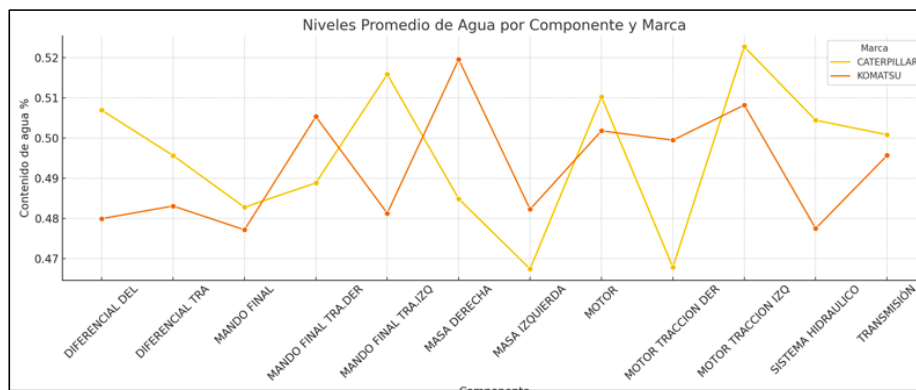
Grafico Punto Inflamación por Aceite Lubricante y Marca



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 6

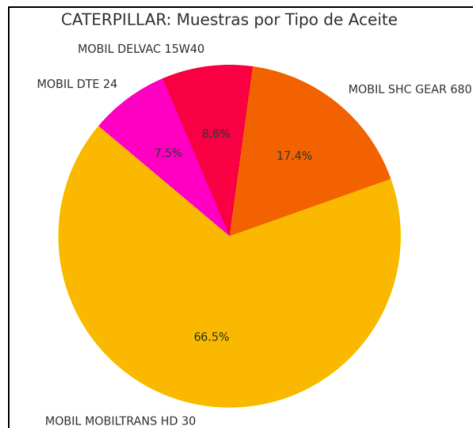
Grafico por Componente % de Agua por Marca



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 7

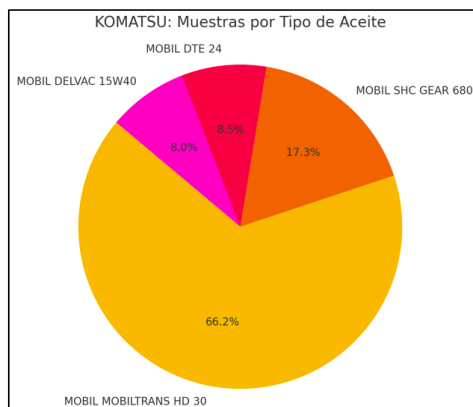
Grafica de muestras por tipo de aceite en flota Caterpillar



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 8

Grafica de muestras por tipo de aceite en flota Komatsu



Fuente: elaboración propia, 2025

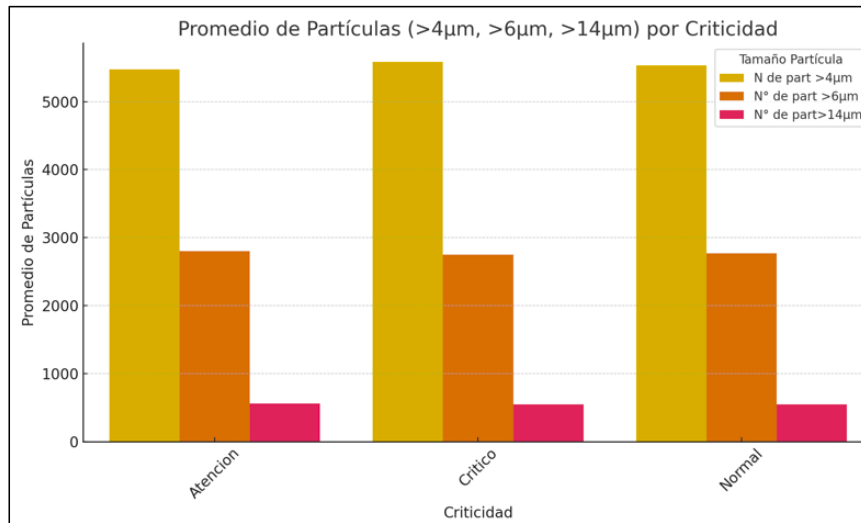
Figura 9*Grafico Partículas por Criticidad**Fuente:* elaboración propia, 2025

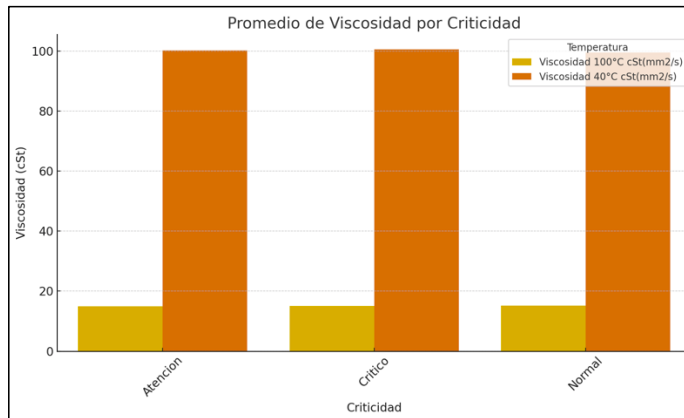
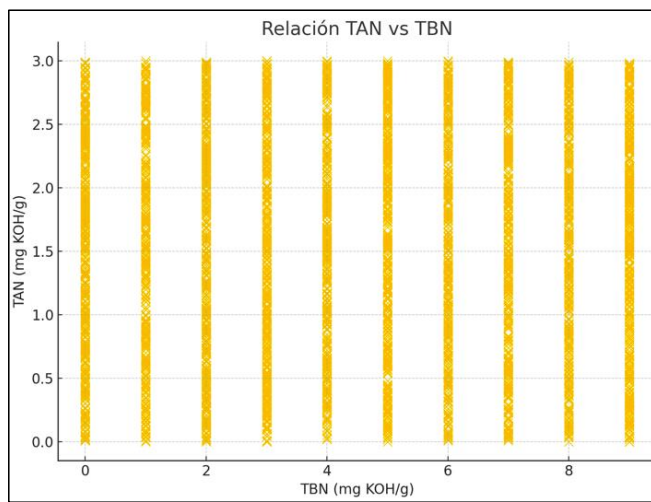
Figura 1010*Grafica de Viscosidades por Criticidad***Fuente:** elaboración propia, 2025**Figura 111***Relación de TAN vs TBN***Fuente:** elaboración propia, 2025

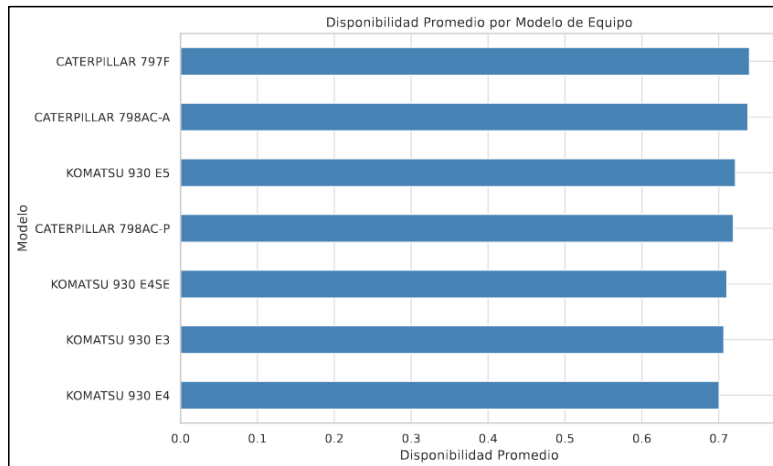
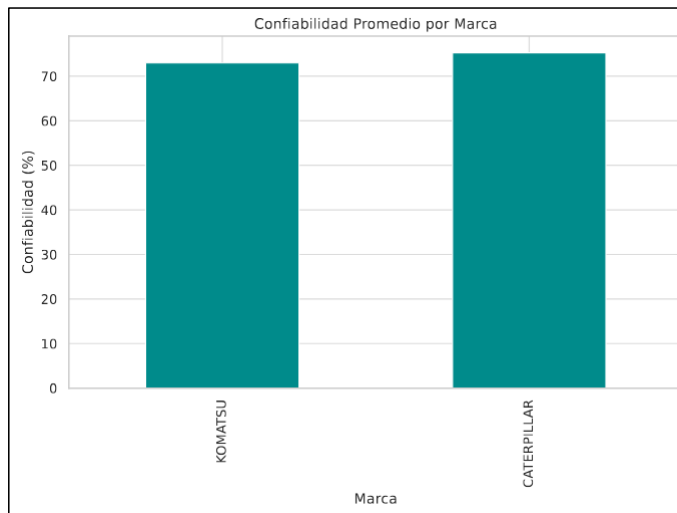
Figura 12 12*Disponibilidad promedio por Modelo de Maquinaria**Fuente:* elaboración propia, 2025**Figura 13 13***Confiabilidad por Marca**Fuente:* elaboración propia, 2025

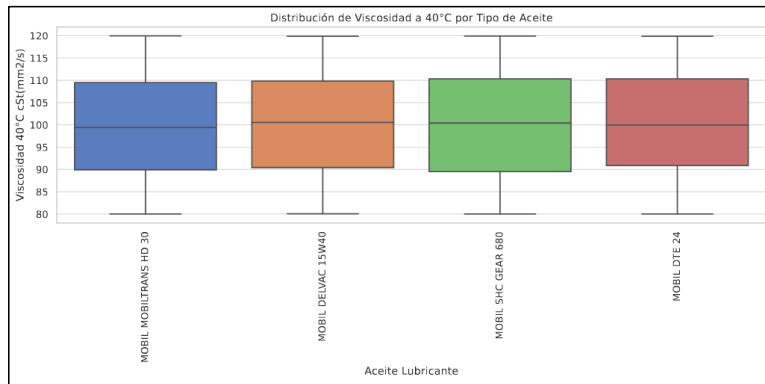
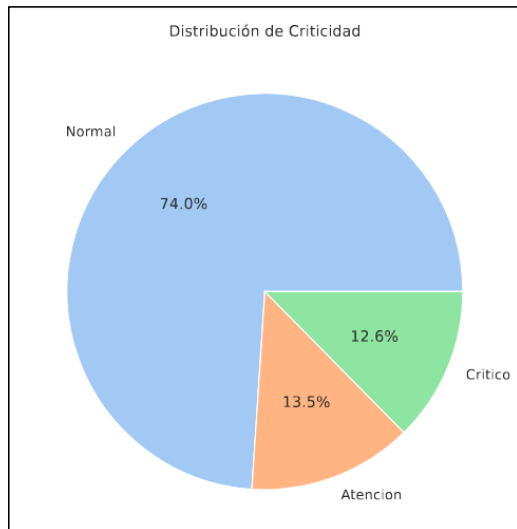
Figura 14 14*Gráfico distribución de Viscosidad por tipo de Aceite***Fuente:** elaboración propia, 2025**Figura 15 15***Distribución de criticidad***Fuente:** elaboración propia, 2025

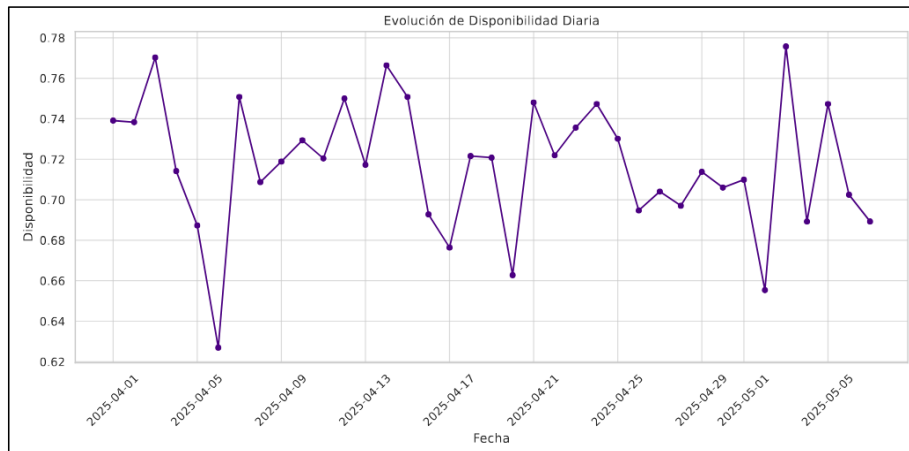
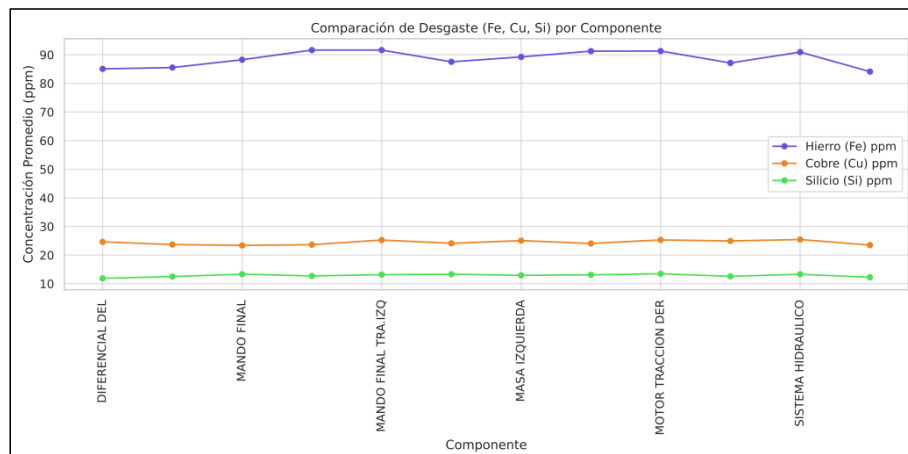
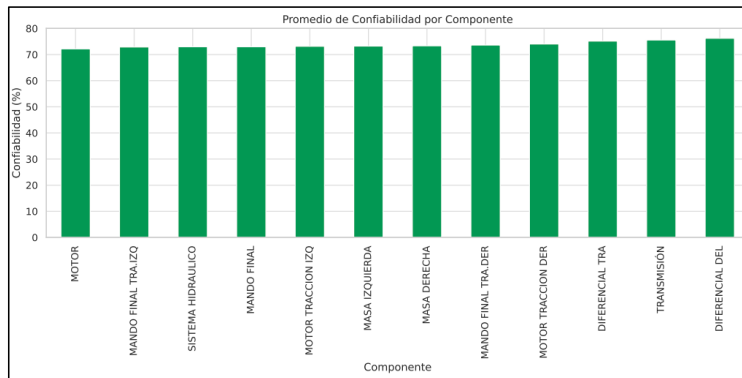
Figura 16 16*Evolución de disponibilidad diaria**Fuente:* elaboración propia, 2025**Figura 17 17***Comparación de desgaste (Fe, Cu, Si)**Fuente:* elaboración propia, 2025

Figura 18 18

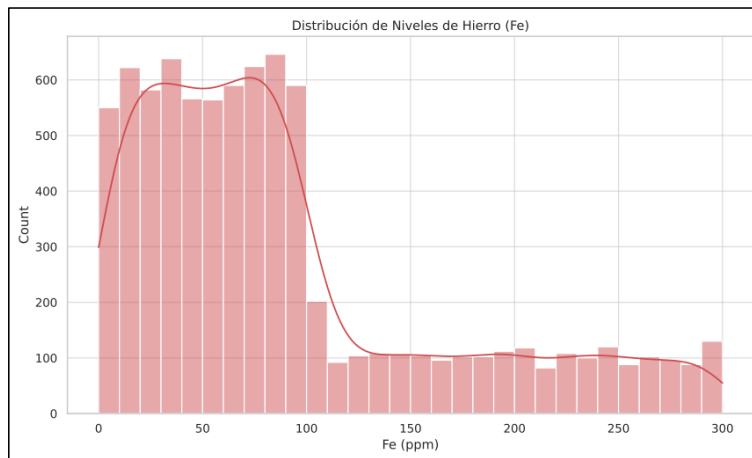
Promedio de confiabilidad por componente



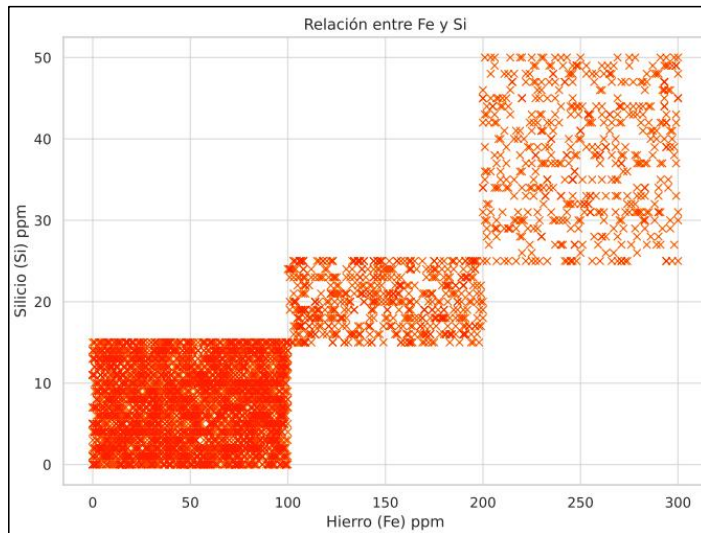
Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 19 19

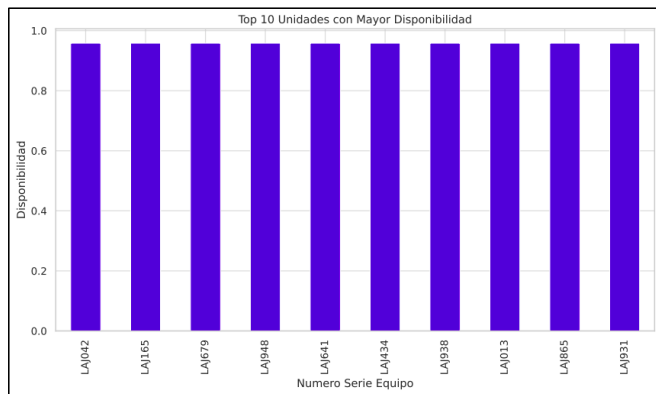
Distribución de niveles de hierro (Fe)



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 20 20*Relación entre Fe y Si*

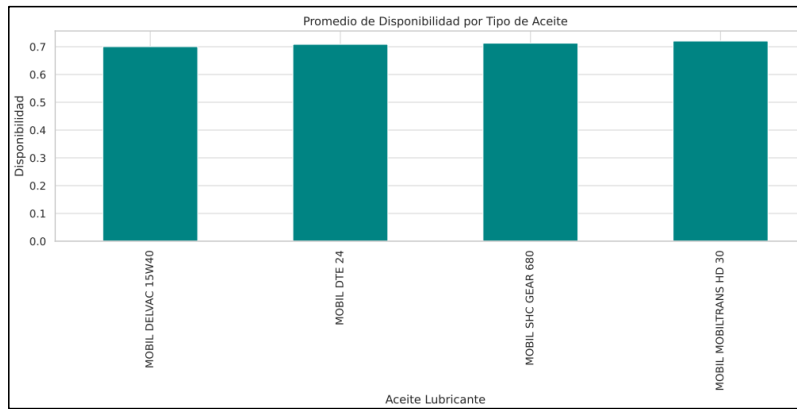
Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 21 21*Numero de Registro de Componente con mayor disponibilidad*

Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 22 22

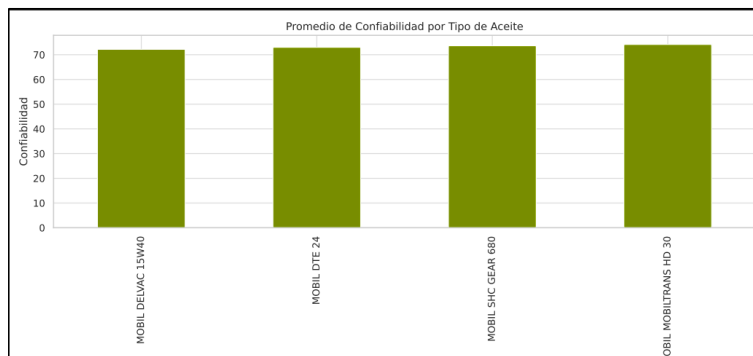
Promedio de disponibilidad por tipo de aceite



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 23 23

Promedio de confiabilidad por tipo de aceite



Fuente: elaboración propia, 2025

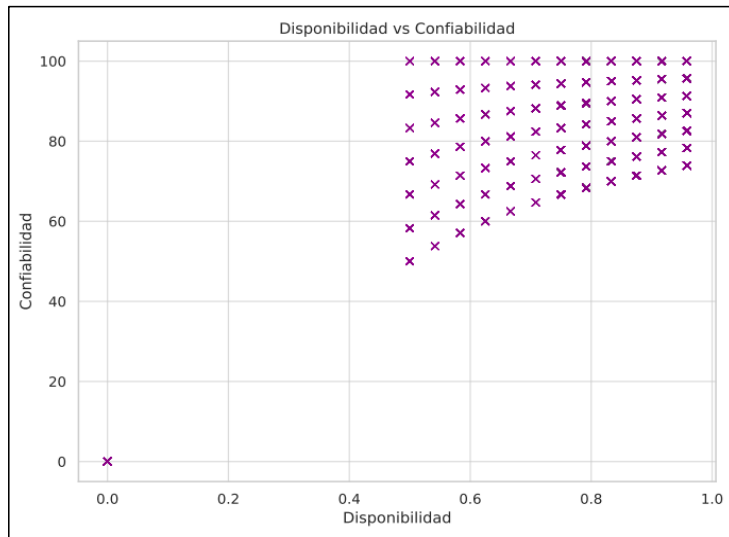
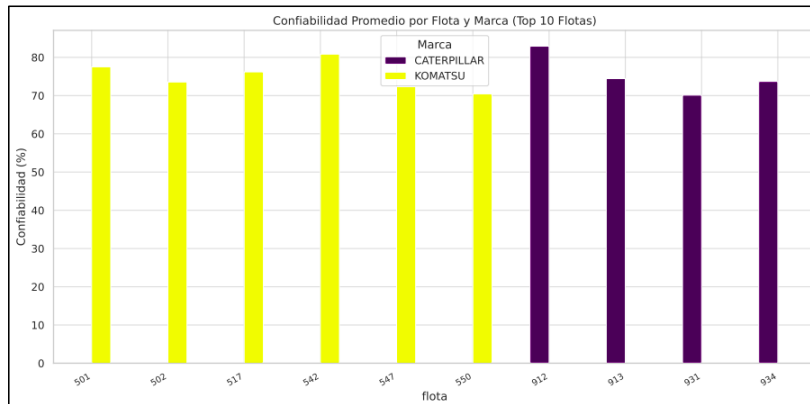
Figura 24 24*Disponibilidad v/s Confiabilidad**Fuente:* elaboración propia, 2025**Figura 25 25***Confiabilidad promedio por flota y marca top 10**Fuente:* elaboración propia, 2025

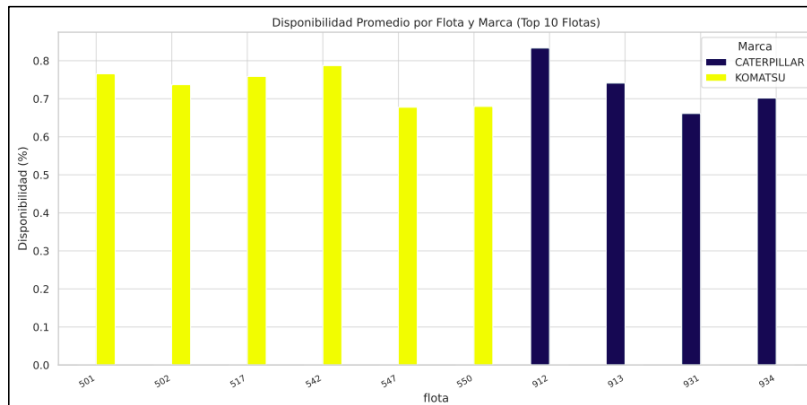
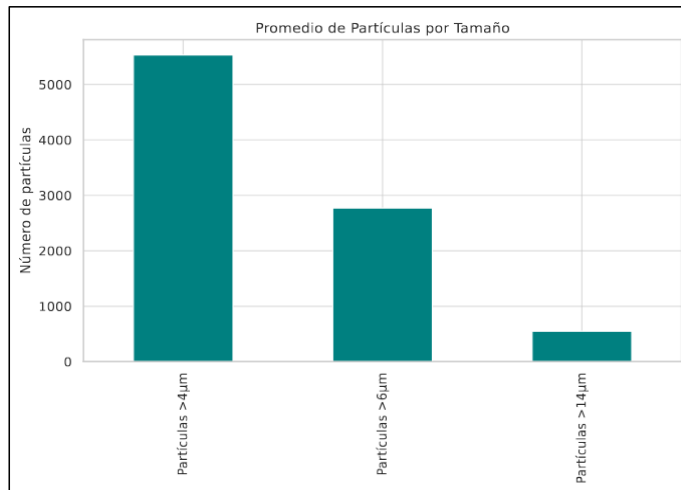
Figura 26 26*Disponibilidad promedio por flota y marca top 10***Fuente:** elaboración propia, 2025**Figura 27 27***Promedio de partículas por tamaño***Fuente:** elaboración propia, 2025

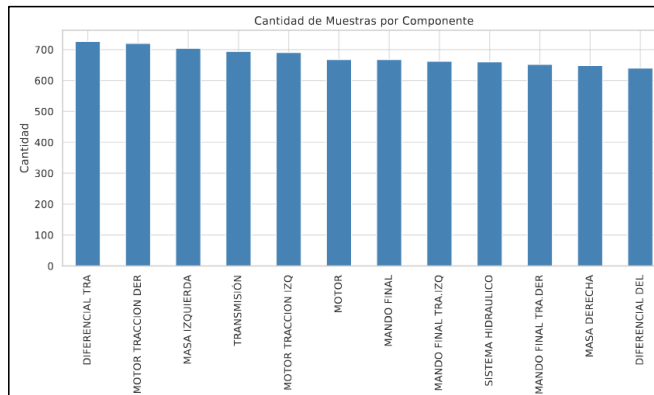
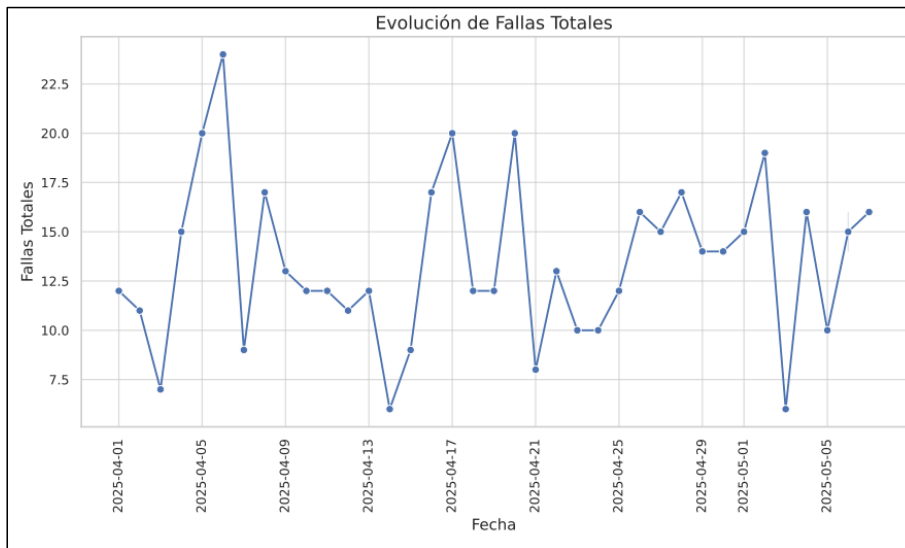
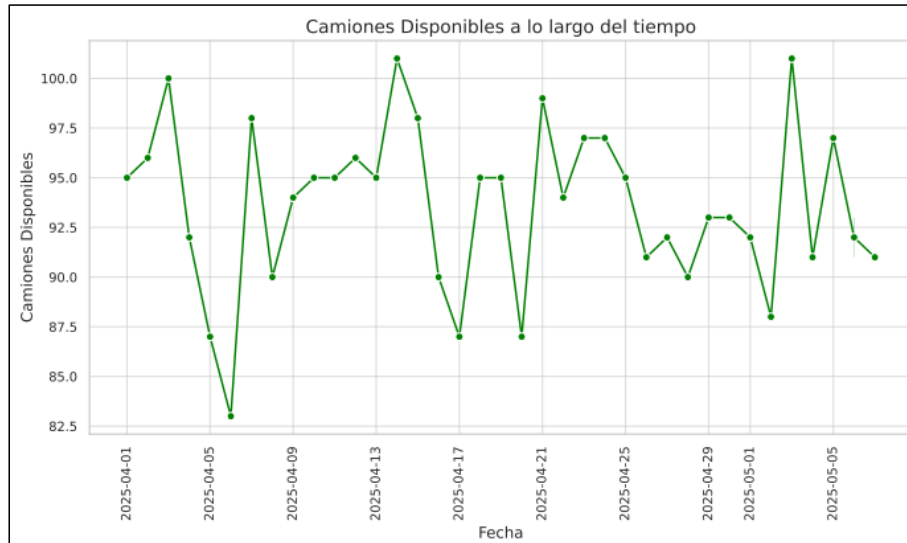
Figura 28 28*Cantidad de muestras por componentes**Fuente:* elaboración propia, 2025**Figura 29 29***Métrica Evolución de Fallas Totales**Fuente:* elaboración propia, 2025

Figura 30 30

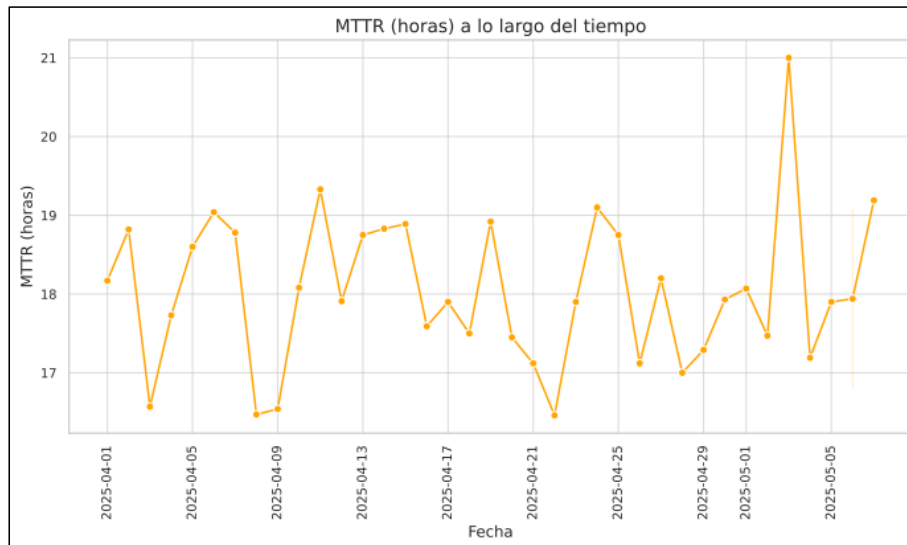
Métrica camiones disponibles a lo Largo tiempo



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 31 31

Métrica MTTR (horas) a lo largo del tiempo



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 32 32

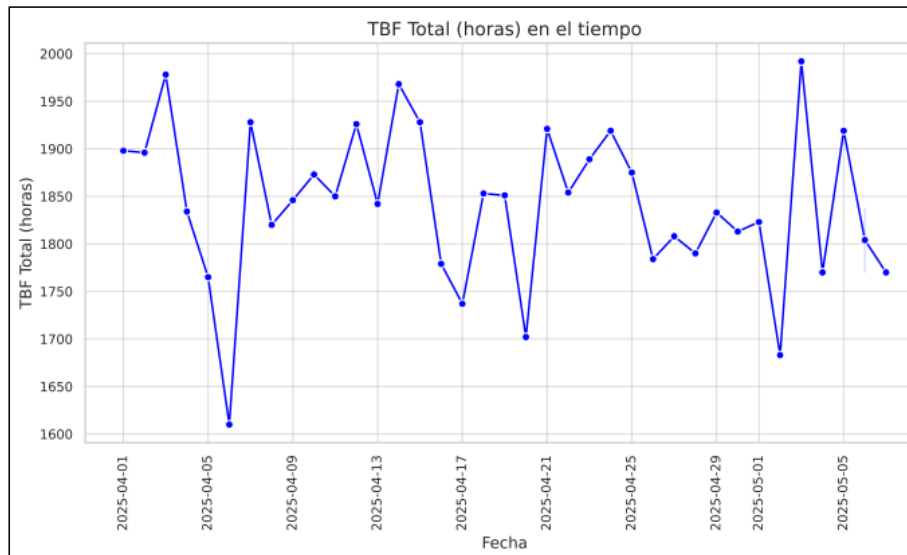
Métrica Tasa de Fallas a lo Largo del tiempo



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 33 33

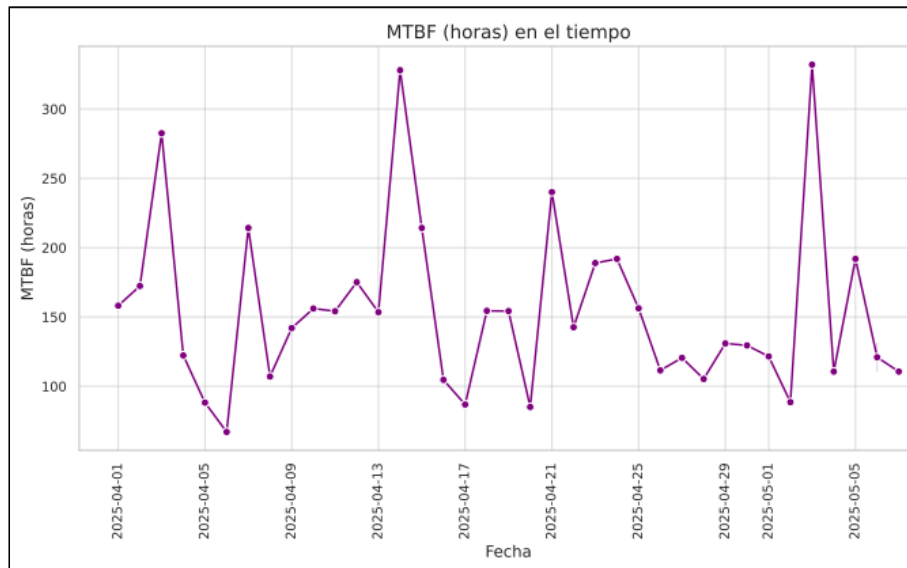
Metrica TBF total (horas) en el tiempo



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 34 34

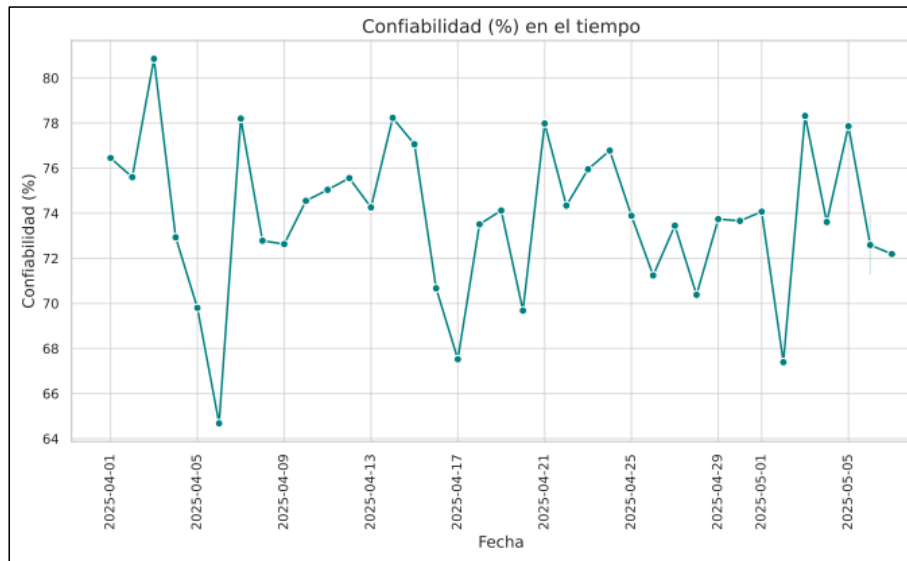
Metrica MTBF (horas) en el tiempo



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 35 35

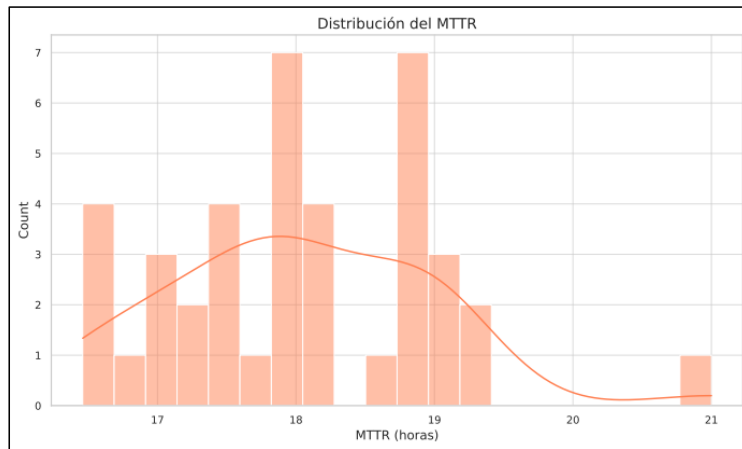
Métrica Confiabilidad % en el tiempo



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 36 36

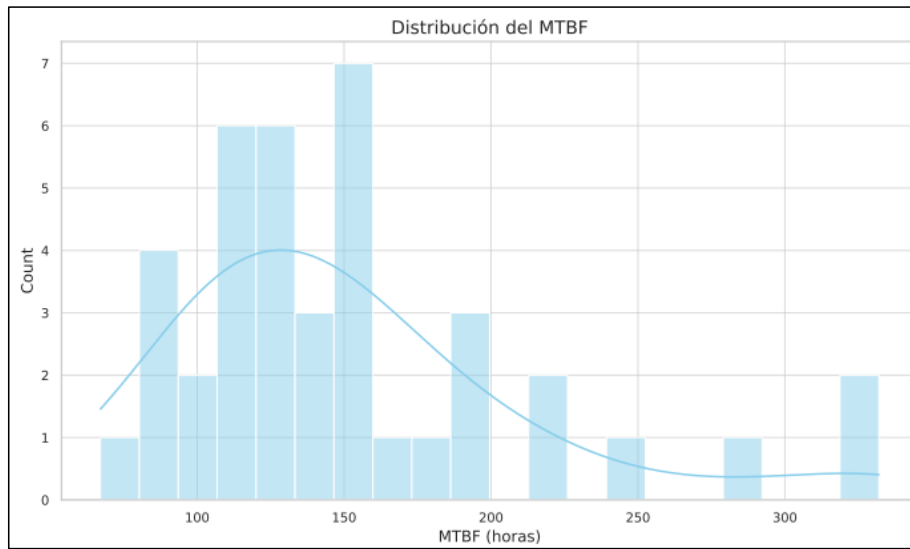
Métrica Distribución de MTTR



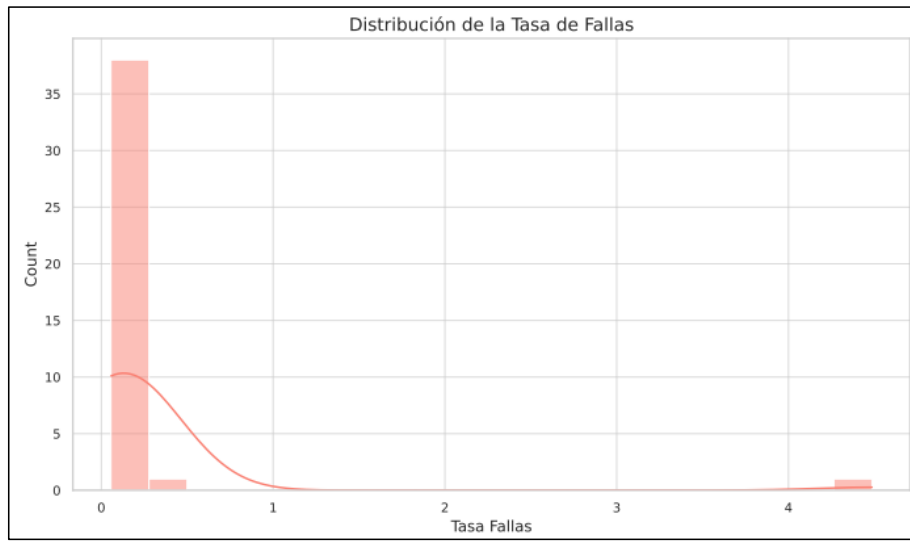
Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 37 37

Metrica Distribución de MTBF



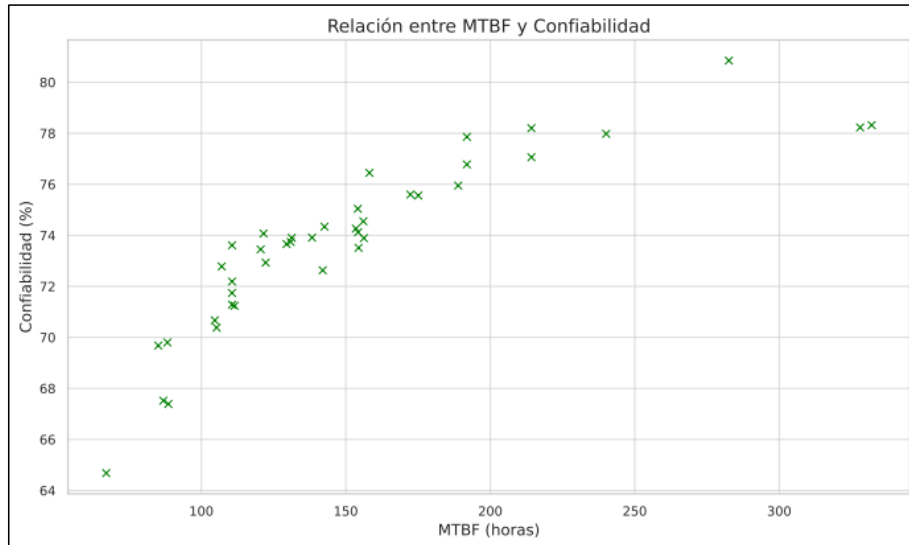
Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 38 38*Metrica Distribución de Tasa de Fallas*

Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 39 39

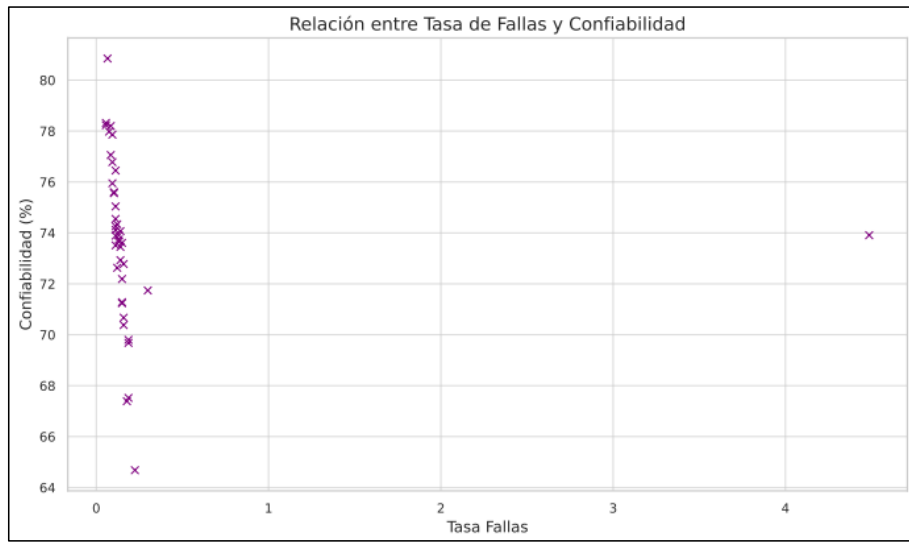
Métrica Relación entre MTBF y Confiabilidad



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 40 40

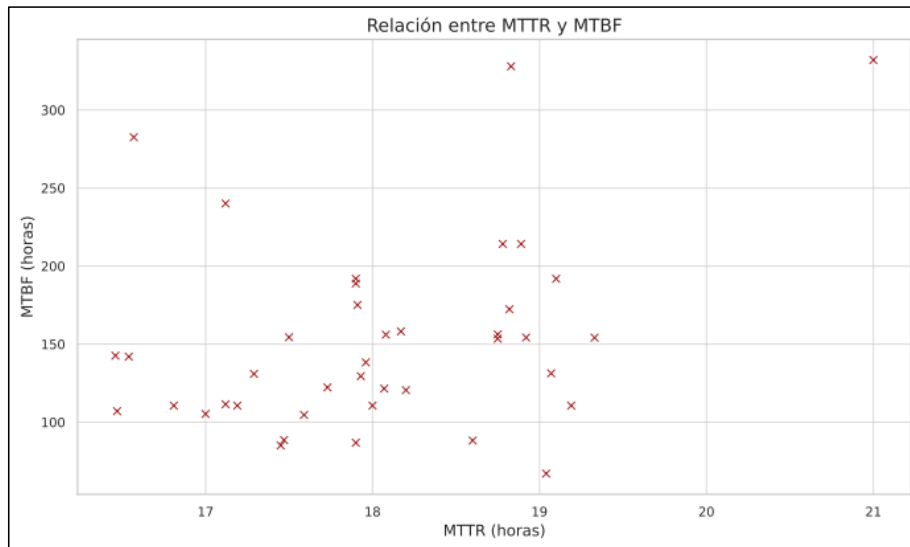
Métrica Relación entre Tasa de Fallas y confiabilidad



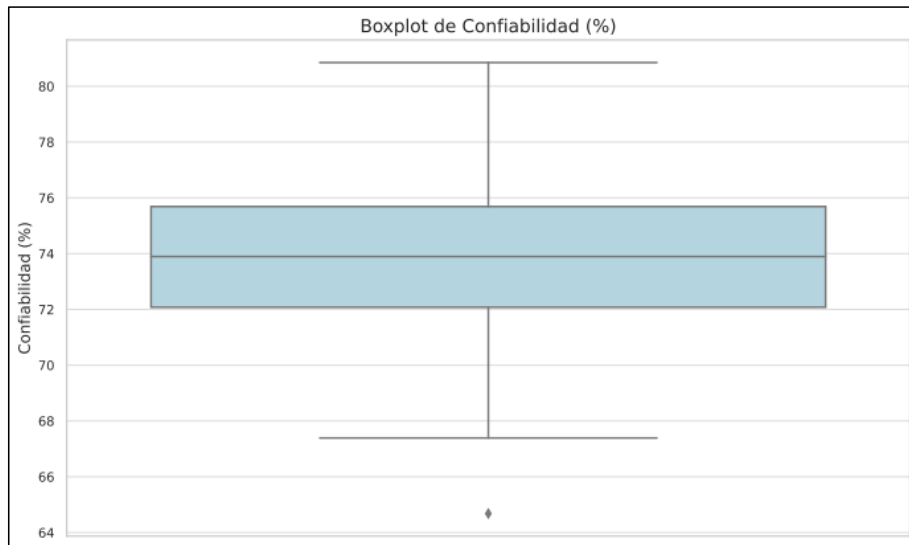
Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 41 41

Métrica Relación entre MTTR y MTBF



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 42 42*Métrica Boxplot de Confiabilidad %***Fuente:** elaboración propia, 2025

1.1.2. Análisis

El presente estudio se sustenta en fortalezas internas, tales como la importancia estratégica de la flota de camiones CAEX en la continuidad operativa de la División Radomiro Tomic y la disponibilidad de una base de datos histórica robusta sobre fallas, mantenimientos y condiciones operacionales. Los datos proporcionan una base sólida para diseñar e implementar un sistema de análisis predictivo tribológico que contribuya de forma significativa a la optimización del mantenimiento de los activos críticos de la empresa.

A nivel externo, el entorno ofrece oportunidades relevantes como la creciente digitalización del sector minero, el acceso a tecnologías emergentes como IoT y machine learning, y la presión constante por reducir costos operacionales y mejorar indicadores de productividad.

Sin embargo, para lograr una implementación efectiva del sistema y garantizar su sostenibilidad en

el tiempo, es necesario abordar ciertas debilidades técnicas y organizacionales, entre ellas destacan la baja integración actual de sensores inteligentes en los equipos, la dependencia de modelos tradicionales de mantenimiento preventivo y correctivo, y la limitada capacitación del personal en tecnologías predictivas.

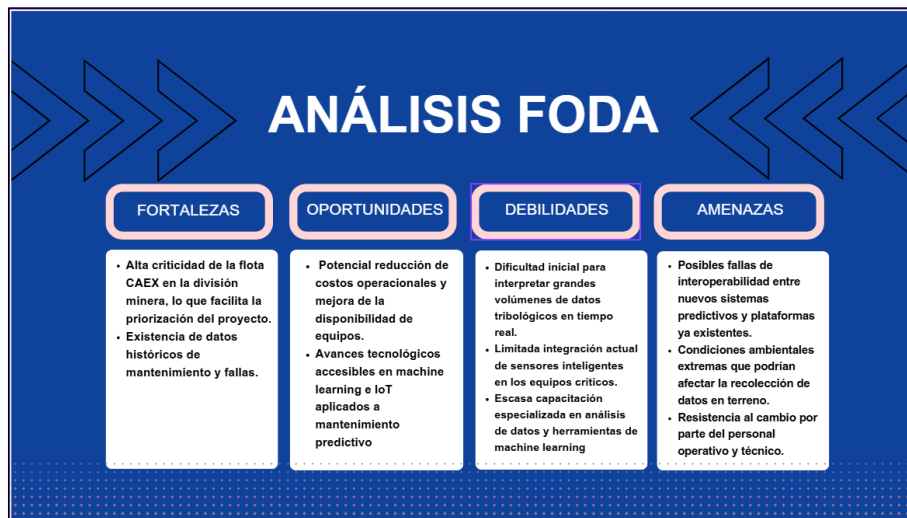
Asimismo, se deben mitigar amenazas como la resistencia al cambio cultural, la interoperabilidad entre sistemas nuevos y existentes, y las condiciones ambientales adversas que pueden afectar la calidad de los datos recolectados.

Para mejorar la confiabilidad y disponibilidad de la flota de camiones CAEX, se propone el diseño de una herramienta de análisis predictivo tribológico que permita anticipar fallas mediante sensores de monitoreo tribológico en componentes críticos, que estos se integren con plataformas de análisis de datos, y luego con la interpretación de resultados permita la toma de decisiones basada en la condición real.

Figura 43 43

Análisis **FODA**

Comentado [RL1]: realizar como tabla editable



Fuente: elaboración propia, 2025

Figura 4444*Causas de fallas tribológicas prematuras**Fuente:* elaboración propia, 2025

Se realiza este análisis de causa-raíz mediante un diagrama de espina de pescado (Ishikawa) basado en la necesidad de mejorar la gestión tribológica en la División Radomiro Tomic, este evidencia que las fallas tribológicas prematuras no son atribuibles a un único factor, sino al conjunto de debilidades en las áreas de monitoreo, capacitación, condiciones operacionales y estrategia de mantenimiento. Esto justifica la necesidad de implementar un sistema de análisis predictivo tribológico, como medida integral que permita anticipar fallas, optimizar recursos y mejorar la disponibilidad de la flota, mediante indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, a través de la integración de múltiples técnicas predictivas, incluyendo la monitorización avanzada el análisis tribológico, el cual puede entregar beneficios claves, como los siguientes:

Reducción del desgaste: Ayuda a minimizar el desgaste de los componentes, especialmente en áreas de alta fricción, como cojinetes, engranajes y frenos, prolongando así su vida útil y reduciendo la necesidad de reemplazos.

Mejora de la eficiencia: Al reducir la fricción, se mejora la eficiencia, lo que se traduce en un menor consumo de combustible y una mayor productividad.

Prolongación de la vida útil: Al minimizar el desgaste y controlar la temperatura, se prolonga la vida útil de los componentes críticos, lo que reduce los tiempos de inactividad y los costos de mantenimiento.

Optimización de la lubricación: La tribología permite la selección y uso adecuado de lubricantes, garantizando una lubricación óptima y evitando problemas de desgaste o corrosión.

Disminución de costos: Al reducir el desgaste, mejorar la eficiencia y prolongar la vida útil, el mantenimiento tribológico contribuye a la disminución de los costos de operación y mantenimiento.

Aumento de la seguridad: Al garantizar un correcto funcionamiento de los componentes en los camiones, se mejora la seguridad y los operadores.

Menor impacto ambiental: Al mejorar la eficiencia y reducir el desgaste, se contribuye a la disminución de emisiones contaminantes.

En resumen, el mantenimiento tribológico es una herramienta clave para optimizar el rendimiento y eficiencia, reduciendo costos, mejorando la seguridad y prolongando la vida útil de los camiones.

1.1.3. Formulación del problema

En la División Radomiro Tomic, la operación de la flota de camiones CAEX, constituye un elemento crítico en la cadena productiva minera. Sin embargo, en los últimos años se ha observado un incremento sostenido en los costos de mantenimiento asociados a fallas prematuras en sistemas tribológicos esenciales, como motores, transmisiones y ejes. Estas fallas, derivadas principalmente del desgaste excesivo y de prácticas de lubricación inadecuadas, han generado impactos negativos en la disponibilidad operativa de los equipos, prolongando los tiempos de inactividad y reduciendo la eficiencia general del proceso de transporte de material.

A pesar de contar con planes de mantenimiento establecidos, el enfoque actual basado en intervenciones correctivas o programadas sin un análisis predictivo detallado ha demostrado ser insuficiente para prevenir fallas. La ausencia de herramientas tecnológicas avanzadas de monitoreo, como sistemas de análisis predictivo apoyados en inteligencia artificial e IoT, limita la capacidad de anticipación frente a eventos de desgaste crítico, lo cual impide una gestión óptima de los recursos técnicos y económicos destinados al mantenimiento.

Frente a este escenario, surge la necesidad de identificar, analizar y abordar las fallas tribológicas por desgaste, lubricación, para esto realizaremos un estudio sobre la situación actual de la división en el aspecto de cumplimiento sobre el estándar en la disponibilidad y confiabilidad de que debe tener esta flota de camiones en la operación.

La División Radomiro Tomic presenta un aumento significativo en los costos de mantenimiento debido a fallas tribológicas prematuras, ocasionadas por el desgaste acelerado y deficiencias en la gestión de lubricación, situación que afecta la disponibilidad operativa de los camiones y evidencia la necesidad de incorporar un sistema de análisis predictivo que permita anticipar estas fallas y optimizar los ciclos de mantenimiento.

¿Cómo puede un sistema de análisis predictivo tribológico, basado en tecnologías como machine learning e IoT, contribuir a anticipar fallas, optimizando el mantenimiento y reduciendo los costos operacionales asociados al desgaste y la lubricación?

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de análisis predictivo tribológico para anticipar fallas en la flota de camiones CAEX de la División Radomiro Tomic, para mejorar los ciclos de mantenimiento y reducir los costos operacionales asociados a desgaste y lubricación.

1.2.2. Objetivo específico

1. Recopilar y analizar datos tribológicos históricos para identificar patrones de desgaste y fallas relacionadas con lubricación.
2. Simular datos en tiempo real en base a la recopilación de datos de RT Codelco.
3. Diseñar un dashboard que permita tomar decisiones preventivas antes de que ocurran fallas tribológicas mayores en línea como solución en la nube con su implementación adecuada.
4. Implementar un modelo de machine learning orientado a la predicción de posibles fallos tribológicos, utilizando como variables de entrada parámetros como la viscosidad, la presencia de partículas metálicas y otros minerales detectados en el aceite. El modelo será entrenado con datos históricos y validado para optimizar su precisión. Posteriormente, se implementará la predicción del estado de los componentes, permitiendo proyectar su nivel de criticidad y facilitar la toma de decisiones de mantenimiento.
5. Evaluar el impacto económico y operativo del sistema de análisis predictivo tribológico en términos de reducción de costos y aumento de disponibilidad de los camiones.

1.3. Justificación del proyecto

La operación continua y eficiente de la flota de camiones CAEX en la División Radomiro Tomic, es un componente esencial en el sistema de transporte de material dentro del proceso productivo minero. No obstante, en los últimos años se ha registrado un aumento considerable en los costos de mantenimiento asociados a fallas prematuras en sistemas tribológicos críticos, como motores, transmisiones y ejes. Esta situación ha generado impactos negativos en la disponibilidad de los equipos y en la eficiencia operativa en general.

Actualmente, la gestión del mantenimiento se basa principalmente en metodologías correctivas o preventivas programadas, sin una capacidad predictiva avanzada que permita anticipar fallas antes de que se materialicen. Esta limitación impide una toma de decisiones proactiva, aumentando el

riesgo de detenciones no planificadas, sobrecostos por intervenciones de emergencia y un uso ineficiente de recursos técnicos y logísticos.

La implementación de un sistema de análisis predictivo tribológico, apoyado en tecnologías como machine learning y sensores IoT, representa una oportunidad concreta para optimizar los ciclos de mantenimiento, reducir el desgaste prematuro y prolongar la vida útil de los componentes. Este tipo de herramientas ha demostrado ser eficaz en otros contextos industriales, permitiendo generar alertas tempranas a partir de grandes volúmenes de datos, mejorando la planificación de intervenciones técnicas y reduciendo significativamente los costos operacionales (Johnson, Smith y Wang, 2021).

Además, este proyecto se alinea con los lineamientos estratégicos de transformación digital y eficiencia operacional promovidos por la organización, contribuyendo a la sostenibilidad del negocio, la reducción de riesgos y el fortalecimiento de la innovación tecnológica en procesos clave.

Por tanto, el desarrollo e implementación de un sistema de análisis predictivo tribológico no solo responde a una necesidad técnica evidente, sino que también representa una ventaja competitiva relevante en un sector altamente exigente como la minería.

1.4. Alcance del proyecto

El alcance de este proyecto es la incorporación de una herramienta tecnológica digital, que sirva como soporte al proceso actual de monitoreo del área de mantenimiento de la flota de camiones CAEX en la División Radomiro Tomic. Para lo cual se implementará un dashboard que funcione como herramienta de predicción de fallas catastróficas y que pueda ser utilizado por personal del área de monitoreo u otro.

1.4.1. Análisis Predictivo Tribológico:

Desarrollo de un modelo predictivo para fallas relacionadas de los componentes de los camiones (motores, transmisiones, ejes, etc.).

Uso de técnicas de machine learning para el análisis de datos históricos y datos en tiempo real. Generación de alertas tempranas y recomendaciones para acciones preventivas basadas en el análisis predictivo.

1.4.2. Recolección y Análisis de Datos:

La información contenida en el presente documento corresponde a un análisis detallado de datos simulados basado en un período de cuatro meses de recopilación y tratamiento de información proveniente de distintas plataformas tecnológicas utilizadas por CODELCO, específicamente en su División Radomiro Tomic. Este trabajo se enmarca dentro del desarrollo de un modelo predictivo y analítico destinado a mejorar la gestión de mantenimiento y disponibilidad de equipos mineros, particularmente en lo relativo al comportamiento técnico de flotas de camiones, componentes críticos y sistemas de lubricación.

Las fuentes de datos utilizadas en esta etapa del proyecto incluyen las siguientes plataformas especializadas:

- <https://ds.damagemonitor.com/crt/crt-flota>
- <https://ds.damagemonitor.com/crt/>
- <https://sofia.sgs.com>
- <https://app.crt.siamflex.com/login>

Dichas plataformas están habilitadas únicamente para el uso de funcionarios autorizados de CODELCO y permiten el acceso a datos operacionales y técnicos críticos relacionados con el funcionamiento diario de la maquinaria pesada. Sin embargo, la información extraída presenta una alta complejidad debido a la diversidad de registros, formatos y nomenclaturas técnicas, muchas de las cuales son similares o análogas a las utilizadas en sistemas empresariales como SAP (Sistema de Administración de Productos).

Esta heterogeneidad en la fuente de datos planteó un desafío importante para el tratamiento y la estandarización de la información. Por tal motivo, se aplicaron metodologías de ingeniería de datos que incluyeron:

- Análisis exhaustivo de los parámetros esenciales para la evaluación del rendimiento de componentes.
- Proceso de limpieza, normalización y transformación de los datos.
- Desarrollo de scripts y funciones personalizadas utilizando software de código abierto, lo que facilitó la flexibilidad y adaptabilidad del proyecto.
- Implementación de bibliotecas especializadas para el procesamiento y visualización de grandes volúmenes de datos técnicos.
-

En la primera fase del proyecto se generó una simulación de un mes, abarcando el período comprendido entre el 1 de abril de 2025 y el 5 de mayo de 2025, lo que arrojó un total de 8.134 registros únicos. Estos datos representan una muestra sintética y estructurada que permite modelar situaciones reales sin comprometer información sensible ni vulnerar políticas de confidencialidad. Entre las variables simuladas se incluyen datos relacionados con:

- Identificación de camiones y flotas operativas.
- Componentes críticos y sus ciclos de vida.
- Tipos de aceites y sus rangos óptimos de trabajo.
- Porcentaje de disponibilidad operacional por unidad.
- Series y códigos de mantenimiento.
- Indicadores de uso, temperatura y desgaste.

La finalidad de esta simulación es servir como base para la validación de modelos predictivos de mantenimiento, optimización del rendimiento y proyección de fallas en equipos de alto valor. Asimismo, esta primera etapa representa un modelo base que se irá refinando a medida que se avance con nuevas fases del proyecto.

Se proyecta que las siguientes etapas del modelo, actualmente en desarrollo, serán publicadas y documentadas en un sitio web dedicado exclusivamente al estudio. Dicho sitio contendrá toda la información técnica relacionada, así como actualizaciones, mejoras, visualizaciones interactivas y recursos de análisis que se generen a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Se espera que este portal esté disponible un año después de finalizado el desarrollo completo, con el fin de compartir el conocimiento adquirido, facilitar su evaluación por parte de la comunidad técnica y permitir futuras iteraciones.

Licencia y Uso del Proyecto

Este proyecto, incluyendo sus simulaciones, código, documentación y recursos técnicos, será publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Esto significa que cualquier persona podrá:

- Compartir (copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato).
- Adaptar (remezclar, transformar y construir a partir del material) siempre que no sea con fines comerciales.

Todo uso debe dar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Además, cualquier material derivado debe distribuirse bajo la misma licencia.

La decisión de utilizar una licencia abierta refleja el compromiso del equipo de desarrollo con la transparencia, la colaboración interinstitucional y el avance del conocimiento aplicado en minería digital, ciencia de datos y mantenimiento predictivo. De esta forma, buscamos que este trabajo no solo tenga valor interno para CODELCO, sino que también pueda ser inspiración y referencia para otros proyectos similares en la industria.

Consideraciones Finales, cabe destacar que todos los datos utilizados en este proyecto son simulados, pero están basados en estructuras reales de operación. Se ha mantenido el realismo técnico en cuanto a los valores, rangos, formatos y relaciones, permitiendo así generar análisis válidos y representativos. No obstante, no debe confundirse con datos operacionales reales de equipos en funcionamiento.

Este proyecto constituye un esfuerzo multidisciplinario que combina ingeniería, programación, análisis de datos y minería, y marca un paso significativo hacia la transformación digital de procesos críticos. Las siguientes fases contemplan:

- Implementación y Configuración del Servicio.
- Enlace con dominio dedicado
- Acceso a Backend de la plataforma y puesta en marcha de SSL y TLS
- Generación de Script de Datos con Salida a BD
- El desarrollo de modelos, vale decir, dashboards interactivos, y eventualmente integración con plataformas en tiempo real.
- Entrenamiento del Modelo que se va integrar en Machine Learning (ML) (El análisis predictivo “Que está en desarrollo a que elemento específico abordaremos”)
- El levantamiento del modelo de ML y de la plataforma en tiempo real, en Servidores de Amazon Web Services (AWS).

Para más información y futuras publicaciones, se recomienda consultar el portal oficial del proyecto una vez disponible.

CAPÍTULO II

MARCO CONCEPTUAL

La tribología es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación entre superficies en movimiento relativo. En entornos industriales, y especialmente en la minería, esta disciplina resulta esencial para preservar la integridad de los componentes mecánicos sometidos a condiciones operacionales extremas. Equipos como los camiones de alto tonelaje operan de forma continua en ambientes de alta abrasividad, con cargas pesadas, temperaturas variables y terrenos irregulares, lo que acelera el deterioro de los sistemas tribológicos si no se implementan estrategias de mantenimiento adecuadas (Stachowiak & Batchelor, 2013). Una gestión tribológica eficiente permite prolongar la vida útil de los activos críticos y prevenir fallas catastróficas que afectan la continuidad operativa.

Análisis predictivo en la industria minera:

El análisis predictivo se basa en la recopilación y análisis de datos históricos y en tiempo real, con el objetivo de anticipar eventos futuros mediante modelos estadísticos y algoritmos computacionales. En el ámbito minero, esta metodología ha adquirido relevancia particularmente en la gestión del mantenimiento de activos, ya que permite detectar con antelación condiciones de deterioro en componentes estratégicos, optimizando los tiempos de intervención y evitando detenciones no programadas. Su aplicación transforma los esquemas tradicionales de mantenimiento correctivo o preventivo en modelos proactivos que incrementan la disponibilidad operativa, reducen costos y mejoran la gestión del riesgo (CIMIC, 2021).

Machine learning y técnicas de modelado predictivo:

El machine learning, o aprendizaje automático, es una subdisciplina de la inteligencia artificial que permite a los sistemas aprender a partir de datos y realizar predicciones sin programación explícita. En el contexto del análisis predictivo tribológico, estas técnicas se aplican para identificar patrones de desgaste, detectar anomalías y prever condiciones críticas de lubricación en componentes clave. Los modelos pueden ser supervisados (entrenados con datos etiquetados) o no supervisados, y entre los algoritmos más comunes se encuentran las redes neuronales artificiales, los árboles de decisión y las máquinas de vectores de soporte. Estas herramientas permiten construir sistemas que evolucionan

y mejoran su precisión predictiva a medida que procesan más información, lo que habilita una planificación de mantenimiento más inteligente y focalizada (Zonta et al., 2020).

Evidencia empírica y estudios previos:

Numerosas investigaciones respaldan la efectividad de aplicar análisis predictivo en la gestión tribológica. Johnson, Smith y Wang (2021) demostraron que la combinación de sensores IoT con modelos de machine learning puede reducir los costos de mantenimiento hasta en un 25% y aumentar la vida útil de los componentes en un 20%. Asimismo, estudios aplicados a operaciones mineras de mediana y gran escala han mostrado que el monitoreo continuo de variables tribológicas permite detectar de forma oportuna señales de desgaste acelerado, evitar fallas mayores y mejorar los indicadores de disponibilidad técnica (González, 2022). Estas experiencias validan la viabilidad técnica, operativa y económica de implementar soluciones predictivas, donde las exigencias de confiabilidad y eficiencia son especialmente altas.

2.1. Reseña Histórica

División Radomiro Tomic (DRT) es una operación minera a rajo abierto perteneciente a la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco), ubicada en la Región de Antofagasta. Su principal actividad es la extracción y procesamiento de mineral oxidado de cobre para la producción de cátodos mediante procesos hidrometalúrgicos. Esta división se caracteriza por operar en un entorno geográfico y climático exigente, lo que implica desafíos significativos en la planificación, ejecución y mantenimiento de los recursos productivos.

Figura 45 45

Ubicación geográfica División Radomiro Tomic



Fuente: elaboración propia, 2025

Uno de los pilares fundamentales para garantizar la continuidad operacional en Radomiro Tomic es la gestión del transporte de material, tarea que recae en la flota de camiones CAEX (carga y extracción), estos se encargan del traslado de mineral y estéril desde los frentes de carguío hacia las plantas de chancado y botaderos, constituyendo un eslabón esencial en la cadena de valor minera.

El área de estudio se centra específicamente en la gestión tribológica de los componentes críticos de esta flota, tales como motores, transmisiones, diferenciales y ejes. Estos sistemas están sometidos a condiciones de trabajo extremas: altas temperaturas, ambientes polvorientos, sobrecarga mecánica y ciclos de operación intensiva las 24 horas del día. Dichos factores aceleran el desgaste de los componentes y en ausencia de una estrategia de mantenimiento predictivo, provocan fallas prematuras que repercuten negativamente en la disponibilidad de los equipos, los costos operacionales y la productividad general de la operación.

En este contexto, surge la necesidad de incorporar herramientas tecnológicas avanzadas que permitan anticipar este tipo de fallas. La aplicación de sistemas de análisis predictivo tribológico, apoyados en inteligencia artificial y sensores IoT, representa una alternativa viable para optimizar los ciclos de mantenimiento y mejorar la eficiencia operativa de la flota de camiones CAEX, alineándose con los objetivos estratégicos de eficiencia, confiabilidad y transformación digital definidos por Codelco.

2.2.Bases Teóricas

La ingeniería industrial proporciona un marco integral para la mejora continua de procesos, el uso eficiente de recursos y la toma de decisiones basada en datos. En el contexto del mantenimiento de equipos críticos en minería, este enfoque permite desarrollar estrategias que integren tecnología, análisis predictivo y gestión de activos para resolver problemas operacionales de manera sistemática.

2.2.1. Gestión de mantenimiento y confiabilidad operacional

La gestión del mantenimiento es un pilar fundamental en la ingeniería industrial, ya que influye directamente en la disponibilidad, confiabilidad y costos operativos de los activos físicos. Mobley (2002) sostiene que “el mantenimiento predictivo no solo reduce los costos, sino que mejora el control sobre los procesos críticos de la organización” (p. 15). En este sentido, la incorporación de herramientas predictivas se alinea con la necesidad de pasar de un enfoque reactivo a uno basado

en la anticipación de fallas, priorizando intervenciones según condiciones reales y no solo por calendario.

Desde el punto de vista de la **confiabilidad operacional**, el modelo de mantenimiento debe considerar la tasa de fallas, el tiempo medio entre fallos (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR), los cuales son indicadores claves utilizados en ingeniería para evaluar el comportamiento de sistemas complejos y planificar el uso óptimo de los recursos técnicos (ISO 14224, 2016).

2.2.2. Optimización de activos físicos y ciclo de vida

La norma **ISO 55000** establece principios de gestión de activos enfocados en maximizar el valor entregado por los equipos durante todo su ciclo de vida. Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, esto implica desarrollar estrategias que consideren el mantenimiento como una inversión planificada que prolonga la vida útil, minimiza los riesgos operacionales y reduce costos no controlados. De acuerdo con Amadi-Echendu et al. (2010), una gestión eficiente de activos requiere integrar datos técnicos, financieros y de desempeño para respaldar decisiones estratégicas.

Análisis predictivo como herramienta de mejora

El análisis predictivo es una metodología de análisis de datos que permite anticipar eventos futuros mediante el reconocimiento de patrones históricos. Su uso en la industria ha crecido debido al aumento de la capacidad computacional y la digitalización de los procesos. Según Davenport y Harris (2007), “el análisis predictivo permite convertir los datos operativos en conocimiento útil para la acción anticipada” (p. 45). En el caso de la minería, esta herramienta puede aplicarse en la gestión del mantenimiento para predecir fallas tribológicas, optimizar tiempos de intervención y reducir la incertidumbre operativa.

2.2.3. Aplicación de machine learning en ingeniería

El machine learning ha sido adoptado en la ingeniería industrial como una herramienta potente para modelar sistemas complejos y dinámicos. Estos algoritmos permiten extraer valor de grandes volúmenes de datos, identificar variables clave y realizar predicciones con un alto grado de precisión. En el ámbito del mantenimiento predictivo, técnicas como redes neuronales artificiales o árboles de decisión han demostrado su efectividad para predecir fallas en componentes de maquinaria pesada (Zonta et al., 2020).

Además, el uso de IoT (Internet de las Cosas) en conjunto con el aprendizaje automático permite monitorear en tiempo real parámetros como temperatura, vibración y viscosidad de lubricantes, lo cual mejora significativamente la capacidad de anticipación frente a fallas mecánicas, fortaleciendo la estrategia de confiabilidad y mantenimiento planificado (Fernández, 2019).

2.3.Bases legales

La ejecución del presente proyecto, orientado al desarrollo de un sistema de análisis predictivo tribológico, debe considerar diversas normativas y marcos regulatorios vigentes en el territorio nacional, así como estándares internos de la industria minera. Estas normativas condicionan tanto el diseño como la implementación de las soluciones tecnológicas propuestas, especialmente en lo relativo a seguridad operacional, gestión de mantenimiento, protección de datos y uso de tecnologías digitales.

Entre las principales bases legales que enmarcan el desarrollo de esta investigación, se destacan las siguientes:

2.3.1. Ley N.º 16.744 sobre Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales

Regula las condiciones de trabajo en ambientes industriales, estableciendo normas sobre prevención de riesgos y obligaciones del empleador en cuanto al mantenimiento y operación segura de equipos industriales.

2.3.2. Reglamento de Seguridad Minera (Decreto Supremo N.º 132 del Ministerio de Minería)

Establece las disposiciones técnicas y administrativas que deben cumplir las operaciones mineras, incluyendo el mantenimiento preventivo y correctivo de equipos móviles, condiciones de operación segura y protocolos frente a fallas mecánicas.

2.3.3. Ley N.º 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente

Esta norma exige que cualquier proyecto o actividad que pueda tener efectos sobre el medio ambiente se someta a una evaluación de impacto, considerando, en este caso, el impacto positivo

de reducir residuos por desgaste prematuro y optimizar el uso de lubricantes.

2.3.4. Ley N.º 19.628 sobre Protección de la Vida Privada

Aplica especialmente en el contexto del tratamiento de datos recopilados a través de tecnologías IoT y sensores conectados, asegurando que la gestión de datos personales o sensibles (si aplica) cumpla con la legislación vigente.

2.3.5. Normas ISO aplicables

- ISO 55000: Gestión de activos físicos, orientada a optimizar el ciclo de vida de los equipos.
- ISO 14224: Recopilación e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento para equipos industriales.
- ISO 18436-4: Calificación y evaluación de personal en monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas – Parte relativa al análisis de lubricantes.

2.3.6. Políticas y procedimientos internos de Codelco (u otra empresa propietaria)

Este proyecto está alineado con las normativas internas vigentes de la organización, relacionadas con seguridad operacional, transformación digital, integridad de activos, manejo de datos y sostenibilidad.

Tabla 0.1

Resumen de normativas para el proyecto

Normativa / estándar	Ámbito de aplicación	Relevancia para el proyecto
Ley N.° 16.744	Prevención de riesgos laborales y condiciones de trabajo seguras.	Respalda la necesidad de mantener los equipos en condiciones seguras.
D.S. N.° 132 (Reglamento de Seguridad Minera)	Condiciones técnicas y operativas de seguridad minera.	Condiciona protocolos técnicos de mantenimiento en minería.
Ley N.° 19.300	Evaluación ambiental y gestión sustentable.	Aplica al uso eficiente de recursos y reducción de residuos.
Ley N.° 19.628	Protección de datos y privacidad.	Regula el tratamiento de datos de sensores IoT si son sensibles.
ISO 55000	Gestión de activos físicos en el ciclo de vida.	Apoya el enfoque estratégico de optimización de activos.
ISO 14224	Confiabilidad y mantenimiento de equipos industriales.	Permite estructurar bases de datos para análisis predictivo.
ISO 18436-4	Certificación y competencias en análisis de lubricantes.	Establece estándares para formación de analistas tribológicos.
Políticas internas (Codelco o de la división)	Normativas internas sobre seguridad, digitalización y mantenimiento.	Define criterios específicos que deben cumplirse en la operación minera.

Fuente: elaboración propia, 2025

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Deloitte. (2022). *Tracking the trends 2022: Redefining mining*. Deloitte Insights. <https://www2.deloitte.com/>
- González, M. (2022). *Gestión del mantenimiento en flotas mineras: Enfoque operacional y tribológico*. Revista de Ingeniería y Minería, 18(2), 45–59.
- Johnson, R., Smith, T., & Wang, L. (2021). *Predictive maintenance in mining equipment using tribological analysis and machine learning*. Journal of Industrial Engineering and Automation, 32(4), 301–315.
- Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2013). *Engineering Tribology* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Torres, F., & Espinoza, D. (2020). *Aplicación de algoritmos predictivos en mantenimiento de maquinaria pesada en la industria minera chilena*. Revista Latinoamericana de Tecnología Industrial, 12(3), 88–97.
- Zonta, T., da Costa, C. A., Antunes, R. S., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., & Barbosa, J. L. V. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889
- <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>
- Amadi-Echendu, J., Willett, R., Brown, K., & Mathew, J. (2010). *Definitions, concepts and scope of engineering asset management*. Springer.
- Davenport, T. H., & Harris, J. G. (2007). *Competing on analytics: The new science of winning*. Harvard Business Press.
- Fernández, C. (2019). *Aplicación de IoT y análisis de datos en mantenimiento predictivo de maquinaria minera*. Revista Chilena de Ingeniería, 27(2), 115–123.
- ISO 14224. (2016). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*.