

# Estudio de Confiabilidad y Mantenimiento de Activos: Un Enfoque Practico Caso Motores Caex Metodología Six Sigma

Francisco Javier Beltran Toledo

September 2, 2024

## Contents

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>2</b>
1.1	Contexto de la Industria Minera en Chile . . . . .	2
1.2	Desafíos Operativos en la Minería Chilena . . . . .	2
1.3	Objetivos del Estudio . . . . .	2
1.4	Relevancia de la Confiabilidad . . . . .	3
1.5	Six Sigma en la Gestión de Confiabilidad . . . . .	3
1.6	Organización del Documento . . . . .	4
1.7	Desafíos Operativos en la Minería Chilena . . . . .	4
1.7.1	Altitud y Presión Atmosférica . . . . .	4
1.7.2	Temperaturas Extremas y Clima Desértico . . . . .	5
1.7.3	Terreno Accidentado y Carga Pesada . . . . .	5
1.7.4	Correlación entre Factores de Carga y Vida Útil . . . . .	5
1.7.5	Desgaste de Componentes y Mantenimiento Correctivo . . . . .	5
1.7.6	Monitoreo y Diagnóstico en Tiempo Real . . . . .	6
1.7.7	Capacitación y Gestión del Talento . . . . .	6
1.7.8	Comparación con Operaciones en Otros Países . . . . .	6
1.7.9	Innovaciones y Mejores Prácticas . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Metodología</b>	<b>7</b>
2.1	Enfoque General del Estudio . . . . .	7
2.2	Recopilación y Validación de Datos . . . . .	7
2.3	Herramientas Utilizadas . . . . .	8
2.4	Proceso de Análisis . . . . .	9
2.4.1	Curva de Supervivencia y Distribución de Weibull . . . . .	9
2.4.2	Análisis de Modos y Efectos de Fallos (FMEA) . . . . .	10
2.4.3	Mantenimiento Preventivo y Correctivo . . . . .	10
2.4.4	Mantenimiento Basado en Condición (CBM) . . . . .	10
2.4.5	Mantenimiento Predictivo . . . . .	11
2.5	Desarrollo de Estrategias de Mantenimiento . . . . .	11
2.5.1	Mantenimiento Preventivo: . . . . .	12
2.5.2	Mantenimiento Correctivo: . . . . .	12
2.5.3	Mantenimiento Predictivo y Basado en Condición: . . . . .	12
2.6	Implementación y Seguimiento . . . . .	12
2.6.1	Implementación de Estrategias . . . . .	12
2.6.2	Seguimiento y Mejora Continua . . . . .	13
2.6.3	Revisión de Estrategias de Mantenimiento . . . . .	13
2.6.4	Implementación de Nuevas Tecnologías . . . . .	14
2.6.5	Gestión de Riesgos y Adaptación a Cambios . . . . .	14
2.7	Capacitación y Desarrollo del Personal . . . . .	14
2.7.1	Evaluación y Ajuste de Estrategias de Mantenimiento . . . . .	15
2.8	Conclusión de la Metodología . . . . .	15

<b>3</b>	<b>Análisis de Confiabilidad</b>	<b>15</b>
3.1	Curvas de Supervivencia y Análisis Weibull . . . . .	16
3.1.1	Aplicación del Análisis Weibull . . . . .	16
3.1.2	Estudios de Caso en Otras Industrias . . . . .	16
3.2	Diagrama de Pareto y Análisis MTBF/MTTR . . . . .	16
3.2.1	Análisis de MTBF/MTTR . . . . .	16
3.3	Correlación entre Factores de Carga y Vida Útil . . . . .	16
3.3.1	Impacto de la Carga en la Vida Útil . . . . .	17
3.4	Distribución de Detenciones Imprevistas . . . . .	17
3.4.1	Reducción de Detenciones a través del Diseño . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Análisis Financiero</b>	<b>18</b>
4.1	CAPEX: Costos de Inversión . . . . .	18
4.1.1	Componentes del CAPEX . . . . .	18
4.1.2	Estrategias para la Optimización del CAPEX . . . . .	18
4.1.3	Comparación de CAPEX con Otras Regiones Mineras . . . . .	19
4.1.4	Proyecciones de CAPEX a Largo Plazo . . . . .	19
4.1.5	Conclusión del Análisis CAPEX . . . . .	19
4.2	OPEX: Costos Operativos . . . . .	20
4.2.1	Componentes del OPEX . . . . .	20
4.2.2	Estrategias para la Reducción del OPEX . . . . .	21
4.2.3	Comparación de OPEX con Otras Regiones Mineras . . . . .	21
4.2.4	Proyecciones de OPEX a Largo Plazo . . . . .	21
4.2.5	Conclusión de las Proyecciones de OPEX a Largo Plazo . . . . .	22
4.3	CAPEX vs. OPEX: Análisis Comparativo . . . . .	22
4.3.1	Relación entre CAPEX y OPEX . . . . .	22
4.3.2	Estrategias para Optimizar CAPEX y OPEX . . . . .	23
4.4	Análisis de Rentabilidad . . . . .	24
4.4.1	Retorno de la Inversión (ROI) . . . . .	24
4.4.2	Período de Recuperación (Payback Period) . . . . .	24
4.4.3	Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR) . . . . .	24
4.4.4	Conclusión del Análisis de Rentabilidad . . . . .	25
4.5	Impacto de las Fallas en los Costos . . . . .	25
4.5.1	Estudios de Caso de Fallas Críticas . . . . .	25
4.6	Proyecciones a Largo Plazo . . . . .	25
4.6.1	Simulaciones Financieras . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Estudios de Caso y Ejemplos Prácticos</b>	<b>26</b>
5.1	Estudio de Caso 1: Ministro Hales . . . . .	26
5.1.1	Impacto en la Producción . . . . .	26
5.2	Estudio de Caso 2: Minera Escondida . . . . .	27
5.2.1	Adaptaciones en la Estrategia de Mantenimiento . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>27</b>
6.1	Resumen de Hallazgos . . . . .	27
6.2	Recomendaciones para la Implementación . . . . .	27
6.3	Sugerencias para Futuros Estudios . . . . .	27
<b>7</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>28</b>
7.1	Resumen de Hallazgos . . . . .	28
7.2	Impacto Económico y Operacional . . . . .	28
7.3	Medición de la Confiabilidad en Galones Consumidos . . . . .	28
7.4	Recomendaciones para la Implementación . . . . .	28
7.4.1	Fases de Implementación . . . . .	28
7.4.2	Recursos y Herramientas Requeridos . . . . .	28
7.5	Sugerencias para Futuros Estudios . . . . .	29
7.5.1	Integración de Tecnologías Emergentes . . . . .	29
7.5.2	Sostenibilidad y Eficiencia Energética . . . . .	29
7.6	Conclusión Final . . . . .	29

<b>8</b>	<b>Apéndices</b>	<b>29</b>
8.1	Apéndice A: Ecuaciones Utilizadas . . . . .	29
8.2	Apéndice B: Detalles Técnicos Adicionales . . . . .	29
8.3	Apéndice C: Gráficos y Tablas Adicionales . . . . .	29
<b>9</b>	<b>Referencias</b>	<b>29</b>

# 1 Introducción

La minería en Chile no solo es un pilar económico, sino que también representa uno de los sectores más desafiantes en términos de operaciones industriales debido a las condiciones extremas y la necesidad de mantener altos niveles de eficiencia y seguridad. La confiabilidad de los equipos es fundamental para asegurar la continuidad operativa, especialmente en la gestión de camiones CAEX, que son esenciales para el transporte de materiales desde el frente de la mina hasta las plantas de procesamiento.

Este informe tiene como objetivo presentar un análisis detallado basado en la metodología Six Sigma Lean Management, una herramienta probada para gestionar la confiabilidad en múltiples industrias. Mediante el análisis de datos operativos y financieros de dos minas emblemáticas en Chile, Ministro Hales y Minera Escondida, se han desarrollado estrategias enfocadas en mejorar la disponibilidad de los camiones CAEX, optimizar los costos operativos y aumentar la rentabilidad general de las operaciones..

## 1.1 Contexto de la Industria Minera en Chile

Chile, con sus vastas reservas minerales, es el principal productor de cobre del mundo. La minería contribuye aproximadamente al 10% del PIB del país y representa más del 50% de sus exportaciones. Las principales minas, ubicadas en el norte del país, operan en condiciones extremas que incluyen altas altitudes, temperaturas fluctuantes y terrenos desérticos.

**Impacto Global de la Minería Chilena:** En el contexto global, Chile es un actor clave en la oferta de cobre, un metal esencial para la tecnología moderna, desde la construcción hasta la fabricación de automóviles eléctricos. La confiabilidad en las operaciones mineras no solo afecta la economía local, sino que también tiene implicaciones globales, especialmente en mercados donde la estabilidad de la oferta de cobre es crítica para la producción industrial.

**Producción y Desafíos:** En 2023, la producción de cobre en Chile alcanzó aproximadamente 5,7 millones de toneladas métricas. Sin embargo, mantener este nivel de producción presenta desafíos significativos, especialmente en la gestión de flotas de camiones CAEX, que deben operar de manera continua y eficiente para evitar interrupciones en la cadena de suministro.

## 1.2 Desafíos Operativos en la Minería Chilena

El entorno operativo en la minería chilena es uno de los más exigentes del mundo. Las minas están situadas a altitudes que superan los 2.500 metros sobre el nivel del mar, sometiendo a los equipos a bajas presiones atmosféricas y temperaturas extremas que varían drásticamente entre el día y la noche. Estas condiciones pueden acelerar el desgaste de los componentes mecánicos y electrónicos de los camiones CAEX.

**Condiciones Climáticas y Geográficas:** El clima árido y las tormentas de polvo son factores constantes en estas regiones, aumentando el riesgo de fallas en los sistemas de filtrado de aire y en los componentes eléctricos. Además, las rutas de acarreo en las minas a cielo abierto son irregulares y están cubiertas de escombros, lo que genera vibraciones continuas que pueden provocar el fallo prematuro de las partes móviles.

**Mantenimiento y Logística:** La planificación y ejecución del mantenimiento en estos entornos es especialmente compleja debido a la distancia entre las minas y los centros de suministro. La logística de piezas de repuesto es crítica, ya que cualquier retraso puede resultar en largos tiempos de inactividad, afectando directamente la producción. Esto requiere un enfoque proactivo en la gestión de la confiabilidad, donde el análisis predictivo y el mantenimiento preventivo juegan roles fundamentales.

**Comparación con Otras Regiones Mineras:** A diferencia de otras regiones mineras del mundo, como Australia o Canadá, donde las operaciones también son intensivas pero las condiciones climáticas son más estables, la minería en Chile enfrenta desafíos únicos que hacen que la gestión de la confiabilidad sea aún más crucial. En estas condiciones, las prácticas estándar de mantenimiento a menudo deben adaptarse, integrando soluciones innovadoras como el uso de tecnologías de monitoreo en tiempo real y la automatización de procesos de diagnóstico.

## 1.3 Objetivos del Estudio

El objetivo principal de este estudio es desarrollar un informe detallado para la gestión de la confiabilidad en camiones CAEX, utilizando un enfoque sistemático basado en la metodología Six Sigma. Los objetivos específicos incluyen:

- **Identificación de Modos de Falla Críticos:** Realizar un análisis exhaustivo de los registros históricos de fallas para identificar los modos de falla más recurrentes y críticos en las operaciones de las minas Ministro Hales y Minera Escondida.
- **Evaluación de la Confiabilidad:** Utilizar métricas clave como el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR) para evaluar la confiabilidad de los camiones CAEX en diferentes condiciones operativas.
- **Análisis Financiero:** Comparar los costos de inversión (CAPEX) y los costos operativos (OPEX) a lo largo del ciclo de vida de los camiones, considerando distintos escenarios de mantenimiento preventivo y correctivo.
- **Desarrollo de Estrategias de Mantenimiento:** Proporcionar recomendaciones basadas en datos para mejorar la disponibilidad de los camiones y reducir los costos operativos a través de estrategias de mantenimiento optimizadas y personalizadas para cada mina.
- **Implementación de DMAIC Six Sigma:** Desarrollar un plan de acción detallado para integrar las estrategias de confiabilidad en las operaciones diarias de las minas.

**Ejemplos de Aplicaciones Específicas:** Por ejemplo, en la mina Ministro Hales, se planea implementar un programa de mantenimiento predictivo basado en datos de monitoreo continuo de vibraciones y temperatura de los componentes clave. En Minera Escondida, la estrategia incluirá la optimización de los intervalos de mantenimiento para los sistemas de frenos, basándose en análisis históricos de desgaste y fallos.

## 1.4 Relevancia de la Confiabilidad

La confiabilidad en la operación de camiones CAEX es crítica no solo para la continuidad de la producción, sino también para la seguridad y la rentabilidad a largo plazo de las operaciones mineras. Una gestión efectiva de la confiabilidad puede reducir significativamente los costos de mantenimiento, aumentar la disponibilidad de los equipos y minimizar los riesgos de interrupciones operativas.

**Impacto Económico:** Se estima que una mejora del 1% en la disponibilidad de los camiones puede resultar en un aumento de la producción equivalente a cientos de millones de dólares anuales en una mina de gran escala. Por otro lado, las fallas imprevistas pueden generar costos significativos, no solo en reparaciones, sino también en pérdida de producción y en la posible penalización por incumplimiento de contratos de suministro.

**Mejora de la Seguridad Operativa:** Además, la confiabilidad está directamente relacionada con la seguridad operativa. Los equipos que fallan inesperadamente pueden representar un riesgo significativo para los operadores y para el entorno de trabajo. Implementar un programa de mantenimiento basado en confiabilidad no solo mejora la eficiencia, sino que también reduce la probabilidad de accidentes graves.

**Casos de Estudio Relevantes:** En un estudio de caso realizado en una operación minera en Australia, la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo basado en análisis de confiabilidad redujo las fallas críticas en un 30% en el primer año. Estos resultados son indicativos del potencial que tienen las prácticas de confiabilidad para transformar las operaciones mineras.

## 1.5 Six Sigma en la Gestión de Confiabilidad

El Six Sigma es una metodología probada en la industria para la gestión de la confiabilidad y el mantenimiento. Se basa en cuatro fases clave: **Evaluación Inicial, Análisis de Fallas, Optimización de Procesos de Mantenimiento, y Seguimiento y Mejora Continua**. En el contexto de la minería, Six Sigma se adapta para abordar los desafíos específicos de la operación de camiones CAEX.

**Fase 1: Evaluación Inicial** – Esta fase implica la recopilación y análisis de datos históricos, así como la evaluación de los procedimientos de mantenimiento actuales. Se identifican las áreas clave que requieren atención y se establecen indicadores de rendimiento.

**Fase 2: Análisis de Fallas** – En esta fase, se realiza un análisis profundo de las fallas ocurridas, utilizando herramientas como el Análisis de Modos y Efectos de Fallos (FMEA) y el análisis de Pareto. Se priorizan las fallas que tienen el mayor impacto en la operación.

**Fase 3: Optimización de Procesos de Mantenimiento** – Basado en el análisis de fallas, se desarrollan estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo. Esta fase incluye la optimización de

los intervalos de mantenimiento, la implementación de tecnologías de monitoreo en tiempo real, y la capacitación del personal para mejorar la eficiencia de las reparaciones.

**Fase 4: Seguimiento y Mejora Continua** – La última fase de DMAIC implica el monitoreo continuo de los indicadores de rendimiento y la evaluación periódica de las estrategias de mantenimiento. Se implementan ajustes según sea necesario para garantizar que los procesos de mantenimiento sigan siendo efectivos y se adapten a las condiciones cambiantes de la operación.

Six Sigma no es un enfoque estático; es un ciclo de mejora continua que permite a las empresas mineras adaptar sus estrategias a medida que surgen nuevos desafíos y oportunidades. En el caso de las minas Ministro Hales y Minera Escondida, este enfoque permitirá una gestión de la confiabilidad más efectiva y alineada con los objetivos operativos y financieros de cada mina.

## 1.6 Organización del Documento

Este documento se organiza en las siguientes secciones:

- **Metodología:** Descripción detallada del proceso de recopilación, validación y análisis de datos, las herramientas utilizadas, y los enfoques metodológicos aplicados para evaluar la confiabilidad de los camiones CAEX.
- **Análisis de Confiabilidad:** Presentación de los resultados del análisis, incluyendo la curva de supervivencia, el diagrama de Pareto, y las métricas de MTBF y MTTR, con ejemplos específicos de cómo estos análisis influyen en la toma de decisiones operativas.
- **Análisis Financiero:** Comparación entre los costos de inversión (CAPEX) y los costos operativos (OPEX), discutiendo las implicaciones de los hallazgos en la rentabilidad y sostenibilidad a largo plazo de las operaciones.
- **Estudios de Caso y Ejemplos Prácticos:** Presentación de estudios de caso detallados basados en las minas de Ministro Hales y Minera Escondida, mostrando cómo se implementaron las recomendaciones y los resultados obtenidos.
- **Conclusiones y Recomendaciones:** Resumen de los hallazgos clave del estudio y sugerencias para la mejora continua de la confiabilidad y la rentabilidad en la minería.

Cada sección está diseñada para proporcionar un análisis exhaustivo y recomendaciones prácticas que puedan ser implementadas directamente en las operaciones mineras para mejorar la confiabilidad y reducir los costos operativos.

## 1.7 Desafíos Operativos en la Minería Chilena

El entorno operativo en la minería chilena es uno de los más exigentes del mundo. Las minas, ubicadas principalmente en la región norte del país, están situadas a altitudes que superan los 2.500 metros sobre el nivel del mar, sometiendo a los equipos a condiciones extremas. A estas altitudes, la baja presión atmosférica afecta la eficiencia de los motores, la lubricación y el rendimiento de los sistemas de enfriamiento, lo que puede acelerar el desgaste de los componentes.

### 1.7.1 Altitud y Presión Atmosférica

La altitud es uno de los factores más críticos en la operación de camiones CAEX. A medida que aumenta la altitud, la densidad del aire disminuye, lo que afecta directamente la combustión en los motores diesel. Los motores operan con una mezcla de aire y combustible que debe ser precisa para mantener la eficiencia y evitar el sobrecalentamiento. A grandes altitudes, los motores tienden a perder potencia debido a la menor disponibilidad de oxígeno, lo que obliga a los sistemas de inyección a compensar mediante ajustes que pueden no ser suficientes bajo condiciones extremas.

Además, la menor presión atmosférica afecta la eficiencia del sistema de enfriamiento. Los radiadores y otros componentes de enfriamiento deben trabajar más para disipar el calor generado por el motor, especialmente durante las operaciones en terrenos inclinados y bajo carga pesada. Este esfuerzo adicional puede llevar a un mayor desgaste de los componentes del sistema de enfriamiento y aumentar la probabilidad de fallas.

### 1.7.2 Temperaturas Extremas y Clima Desértico

Las minas en el norte de Chile se encuentran en regiones desérticas, donde las temperaturas pueden fluctuar significativamente entre el día y la noche. Durante el día, las temperaturas pueden superar los 40 grados Celsius, mientras que durante la noche pueden descender por debajo de los 0 grados Celsius. Estas fluctuaciones térmicas imponen un estrés considerable en los materiales, especialmente en los sistemas de sellado, cauchos y plásticos, que pueden deteriorarse rápidamente bajo estas condiciones.

El clima desértico también se caracteriza por la alta incidencia de polvo y arena, lo que representa un desafío adicional para los sistemas de filtración de aire y los componentes móviles de los camiones CAEX. El polvo puede infiltrarse en los motores, sistemas hidráulicos y eléctricos, causando abrasión y obstrucciones que pueden llevar a fallas prematuras.

### 1.7.3 Terreno Accidentado y Carga Pesada

Los camiones CAEX operan en terrenos extremadamente accidentados, con pendientes pronunciadas y superficies irregulares que aumentan la carga sobre los ejes, neumáticos y sistemas de suspensión. Las rutas de acarreo en las minas a cielo abierto están compuestas por rocas y escombros que generan vibraciones constantes y choques que se transmiten a través de todo el chasis del camión. Estas vibraciones pueden acelerar la fatiga de los materiales y provocar el fallo de componentes críticos como los ejes de transmisión y los sistemas de dirección.

La carga pesada es otro factor determinante. Los camiones CAEX están diseñados para transportar cargas que superan las 300 toneladas, lo que significa que cualquier fallo en los componentes de carga, como los cilindros hidráulicos o las estructuras de soporte, puede tener consecuencias catastróficas. Además, la operación continua bajo carga pesada aumenta el estrés sobre los motores y sistemas de frenado, incrementando el riesgo de sobrecalentamiento y fallos mecánicos.

### 1.7.4 Correlación entre Factores de Carga y Vida Útil

El siguiente gráfico muestra la distribución porcentual del tiempo operativo de los camiones CAEX en tres estados: ralentí, viaje vacío, y viaje cargado. Como se puede observar, los camiones pasan un 40,25% de su tiempo operativo en viaje cargado, un 33,42% en viaje vacío, y un 26,33% en ralentí. Este desglose es crucial para comprender cómo los diferentes factores de carga afectan la vida útil de los camiones. Durante los viajes cargados, los factores de carga son más altos (entre un 70 a 85%), lo que provoca un mayor desgaste de los componentes. En contraste, el ralentí, con factores de carga significativamente más bajos (0-7%), representa una menor demanda mecánica, pero también indica posibles ineficiencias en la operación.

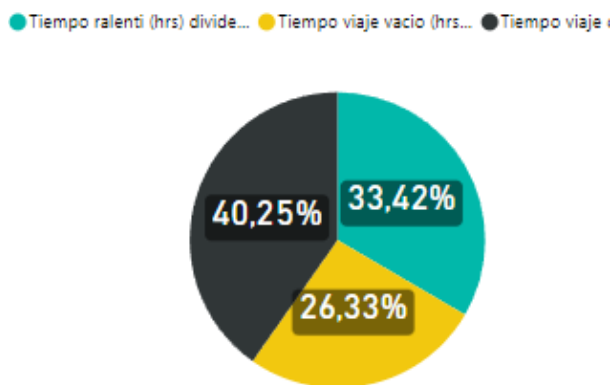


Figure 1: Distribución del Tiempo Operativo de los Camiones en Diferentes Estados

### 1.7.5 Desgaste de Componentes y Mantenimiento Correctivo

El desgaste acelerado de los componentes es un desafío constante en las operaciones mineras. Los sistemas de frenado, por ejemplo, son críticos en las rutas de acarreo con pendientes pronunciadas, donde el uso continuo de los frenos para controlar la velocidad en descenso puede provocar un calentamiento excesivo y el fallo de las pastillas y discos de freno.

El mantenimiento correctivo en estas condiciones es particularmente desafiante debido a la logística. Las minas están ubicadas en regiones remotas, lo que significa que cualquier pieza de repuesto que no esté disponible en el sitio puede tardar días o incluso semanas en llegar. Este retraso no solo aumenta el tiempo de inactividad, sino que también puede impactar significativamente en la producción, ya que los camiones CAEX son vitales para el transporte de material en toda la operación.

#### **1.7.6 Monitoreo y Diagnóstico en Tiempo Real**

Para enfrentar estos desafíos, muchas operaciones mineras han adoptado tecnologías avanzadas de monitoreo y diagnóstico en tiempo real. Los sensores integrados en los camiones CAEX permiten el seguimiento continuo de parámetros críticos como la temperatura del motor, la presión de aceite, el desgaste de los frenos, y las vibraciones del chasis. Estos datos se transmiten a centros de control donde los operadores y técnicos pueden tomar decisiones informadas sobre cuándo realizar el mantenimiento o ajustar las operaciones para evitar fallas inminentes.

Sin embargo, la implementación y mantenimiento de estos sistemas de monitoreo también presenta desafíos. La infraestructura para la transmisión de datos en tiempo real es costosa y requiere de un mantenimiento regular para garantizar su fiabilidad. Además, el análisis de grandes volúmenes de datos en tiempo real exige sistemas de procesamiento avanzados y personal capacitado para interpretar los resultados y actuar en consecuencia.

#### **1.7.7 Capacitación y Gestión del Talento**

Otro desafío operativo significativo es la capacitación y retención de talento en estas condiciones extremas. Los operadores de camiones CAEX y el personal de mantenimiento deben estar altamente capacitados no solo en la operación de los equipos, sino también en la identificación temprana de signos de fallo y en la ejecución de mantenimientos bajo condiciones de alta presión. La capacitación continua es esencial, especialmente con la introducción de nuevas tecnologías y sistemas de monitoreo.

Además, la alta rotación de personal en las minas, debido en parte a las duras condiciones de trabajo y la distancia de los centros urbanos, puede afectar la continuidad y calidad del mantenimiento. Retener talento experimentado es un desafío, y las empresas mineras deben invertir en programas de bienestar y desarrollo profesional para mantener a su personal motivado y comprometido.

#### **1.7.8 Comparación con Operaciones en Otros Países**

A diferencia de las operaciones mineras en países como Australia y Canadá, donde las condiciones climáticas son más estables y las rutas de acarreo pueden estar mejor mantenidas, las minas en Chile enfrentan un entorno mucho más adverso. En Australia, por ejemplo, muchas minas están en regiones semiáridas donde la temperatura es más constante y la infraestructura de soporte es más accesible, lo que facilita la logística y el mantenimiento.

En comparación, las minas en Chile deben desarrollar soluciones más innovadoras para enfrentar los desafíos operativos, como el uso de flotas de camiones autónomos que pueden operar de manera más eficiente en condiciones difíciles, o la implementación de programas de mantenimiento predictivo que reduzcan la necesidad de reparaciones urgentes. La capacidad de adaptarse a estas condiciones es lo que diferencia a las operaciones mineras exitosas en Chile de aquellas que luchan por mantener su competitividad.

#### **1.7.9 Innovaciones y Mejores Prácticas**

Frente a estos desafíos, las innovaciones en el diseño de camiones CAEX, como la mejora en los materiales utilizados para los componentes de desgaste y el desarrollo de sistemas de enfriamiento más eficientes, han sido claves para mejorar la confiabilidad. Además, las mejores prácticas en la gestión de la confiabilidad, como la implementación del mantenimiento basado en condición (CBM), han permitido a las minas chilenas extender la vida útil de sus equipos y reducir los costos operativos.

Por ejemplo, el uso de aleaciones avanzadas en los componentes de los motores y sistemas de transmisión ha mejorado la resistencia al desgaste bajo condiciones extremas. Asimismo, la integración de inteligencia artificial en los sistemas de monitoreo ha permitido a las operaciones predecir fallas con mayor precisión y planificar el mantenimiento de manera más efectiva, evitando costosos tiempos de inactividad.



## 2 Metodología

La metodología aplicada en este estudio se basa en un enfoque sistemático y detallado que sigue los principios de Six Sigma y emplea diversas técnicas de análisis de confiabilidad y mantenimiento. Este enfoque garantiza que los datos sean recopilados, analizados y utilizados de manera efectiva para mejorar la confiabilidad de los camiones CAEX en las minas de Ministro Hales y Minera Escondida.

### 2.1 Enfoque General del Estudio

El enfoque general del estudio combina técnicas cuantitativas y cualitativas para evaluar la confiabilidad de los camiones CAEX y desarrollar estrategias de mantenimiento optimizadas. Este enfoque se divide en varias fases clave:

- **Fase 1: Recopilación y Validación de Datos** – Se recopilan datos históricos de fallas, tiempos de operación, y mantenimiento de los camiones CAEX. Estos datos son validados para garantizar su precisión y completitud.
- **Fase 2: Análisis de Confiabilidad** – Utilizando herramientas estadísticas y de análisis de datos, se evalúa la confiabilidad de los equipos mediante el cálculo de métricas clave como el MTBF (Mean Time Between Failures) y el MTTR (Mean Time To Repair).
- **Fase 3: Desarrollo de Estrategias de Mantenimiento** – Con base en los resultados del análisis de confiabilidad, se desarrollan estrategias de mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo, adaptadas a las condiciones específicas de operación.
- **Fase 4: Implementación y Seguimiento** – Las estrategias de mantenimiento se implementan y su efectividad se monitorea de manera continua para realizar ajustes y mejoras según sea necesario.

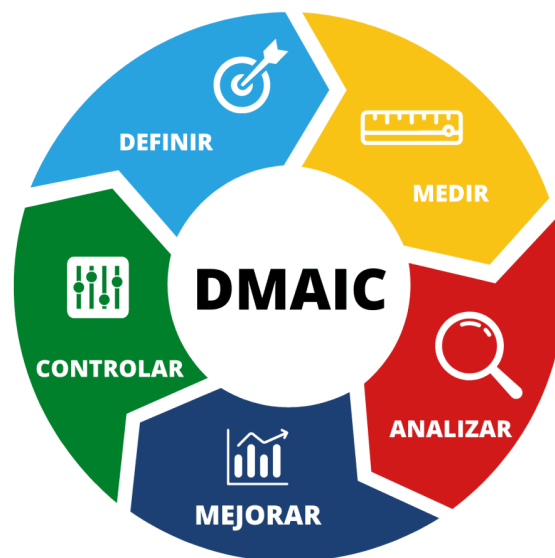


Figure 2: Diagrama del Proceso Metodológico

### 2.2 Recopilación y Validación de Datos

La recopilación de datos es un componente crítico de este estudio. Se recopilaron datos históricos de fallas, tiempos de operación, intervenciones de mantenimiento, y condiciones operativas de los camiones CAEX en ambas minas. Estos datos fueron extraídos de los sistemas de gestión de mantenimiento (CMMS) y de los registros operativos de las minas.

**Fuentes de Datos:** Los datos provienen de diversas fuentes, incluyendo:

- Sistemas de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (CMMS).
- Sensores de monitoreo instalados en los camiones CAEX que registran parámetros operativos en tiempo real.
- Registros manuales de fallas y mantenimiento realizados por el personal de mantenimiento.

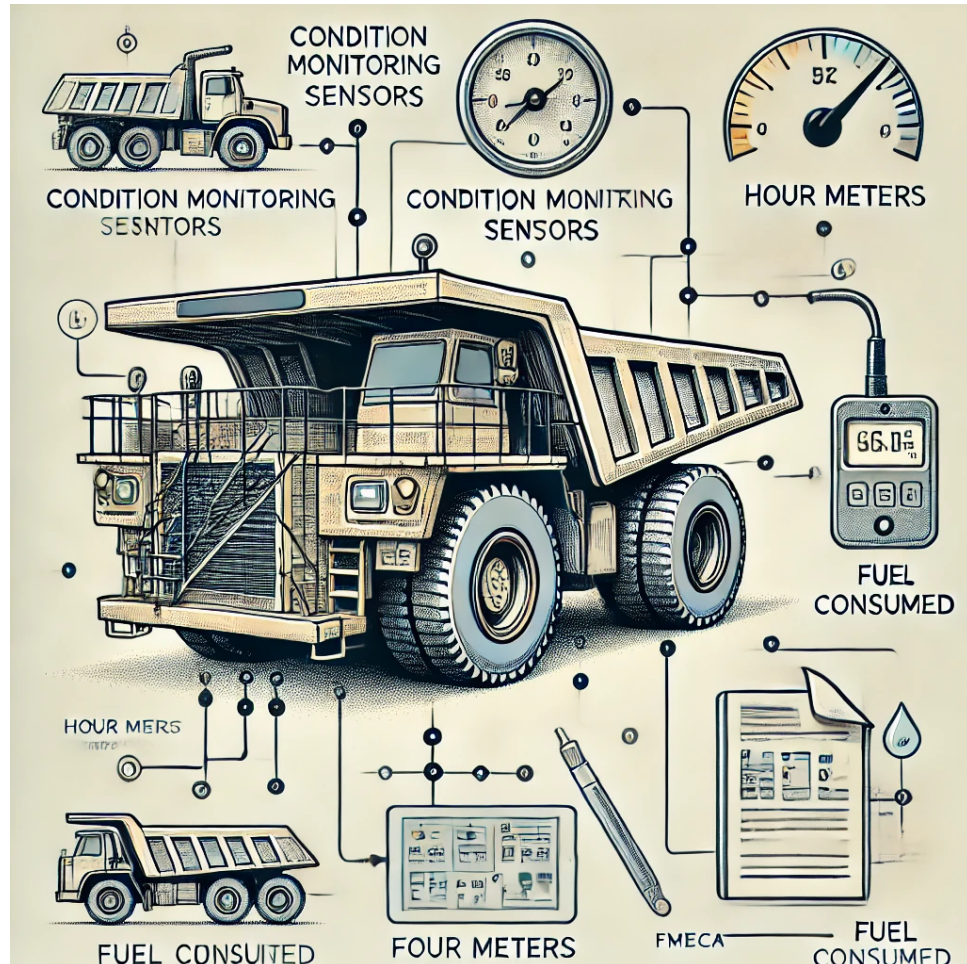


Figure 3: Fuentes de Datos Utilizadas en el Estudio

**Validación de Datos:** La validación de los datos se realizó mediante la comparación cruzada entre diferentes fuentes y la eliminación de registros inconsistentes o duplicados. Además, se llevaron a cabo entrevistas con operadores y técnicos de mantenimiento para aclarar cualquier discrepancia y asegurar que los datos reflejen con precisión las condiciones operativas reales.

## 2.3 Herramientas Utilizadas

Para el análisis de confiabilidad y la optimización de las estrategias de mantenimiento, se utilizaron varias herramientas especializadas:

- **Python:** Lenguaje de código estadístico utilizado para realizar análisis de confiabilidad, como la distribución de Weibull y el cálculo de MTBF y MTTR.
- **Power BI:** Herramienta de visualización de datos utilizada para crear dashboards interactivos que permiten a los gerentes de mantenimiento monitorear en tiempo real la confiabilidad de los equipos.
- **Análisis de Modos y Efectos de Fallos (FMEA):** Técnica utilizada para identificar y priorizar los modos de falla más críticos en los camiones CAEX.

- **Mantenimiento Basado en Condición (CBM):** Estrategia que utiliza datos en tiempo real de los sensores de monitoreo para programar el mantenimiento de manera proactiva.
- **Mantenimiento Predictivo:** Utilización de modelos predictivos basados en el análisis de datos históricos y en tiempo real para predecir fallas antes de que ocurran.

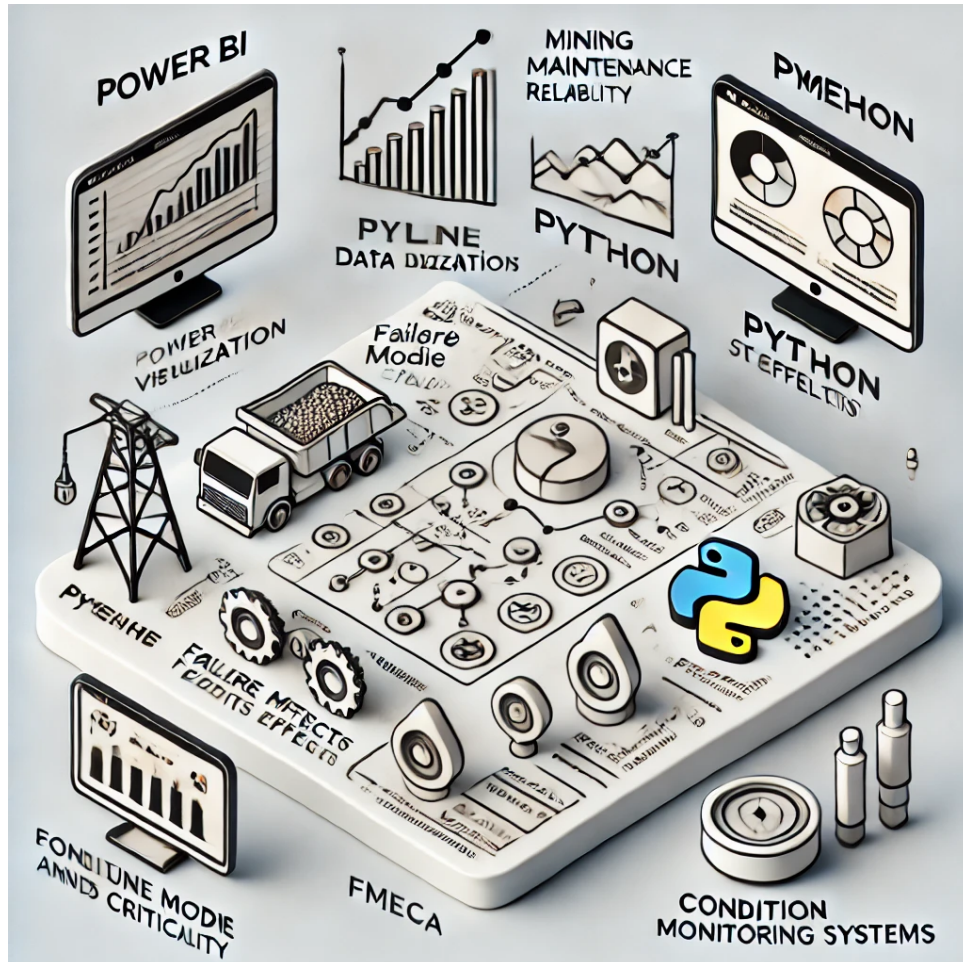


Figure 4: Herramientas Utilizadas para el Análisis de Confiabilidad

## 2.4 Proceso de Análisis

El proceso de análisis se realizó en varias etapas, cada una centrada en un aspecto específico de la confiabilidad y el mantenimiento. Estas etapas incluyen:

### 2.4.1 Curva de Supervivencia y Distribución de Weibull

La curva de supervivencia es una herramienta crucial para comprender cómo varía la confiabilidad de los camiones CAEX a lo largo del tiempo. En este estudio, se utilizó la distribución de Weibull para modelar la supervivencia de los componentes clave de los camiones, como motores, sistemas de transmisión y frenos.

- **Análisis de Datos:** Los datos de tiempo hasta la falla se analizaron para ajustar la distribución de Weibull, permitiendo identificar patrones de fallas tempranas (fallas infantiles) y fallas por desgaste.
- **Interpretación:** La interpretación de los parámetros de la distribución de Weibull (forma y escala) permitió a los ingenieros de mantenimiento comprender mejor los intervalos óptimos de mantenimiento preventivo.



Figure 5: Curva de Supervivencia Utilizada en el Análisis

#### 2.4.2 Análisis de Modos y Efectos de Fallos (FMEA)

El FMEA es una técnica estructurada que identifica y evalúa los modos de falla potenciales de un sistema. En este estudio, se aplicó el FMEA para los subsistemas críticos de los camiones CAEX, como el sistema de frenado, motor y transmisión.

- **Identificación de Modos de Falla:** Se identificaron los modos de falla más comunes a través de la revisión de los registros históricos y la consulta con expertos en mantenimiento.
- **Evaluación de Riesgos:** Cada modo de falla fue evaluado en términos de su severidad, frecuencia de ocurrencia y capacidad de detección. Se calculó un número de prioridad de riesgo (RPN) para priorizar las acciones correctivas.
- **Desarrollo de Planes de Acción:** Basado en el RPN, se desarrollaron planes de acción para mitigar los riesgos más críticos, que incluían cambios en los procedimientos de mantenimiento y mejoras en el diseño de los componentes.

#### 2.4.3 Mantenimiento Preventivo y Correctivo

El mantenimiento preventivo es una estrategia fundamental para evitar fallas imprevistas. En este estudio, se desarrollaron planes de mantenimiento preventivo basados en el análisis de confiabilidad, con énfasis en los componentes que mostraron una alta tasa de fallas en la fase de análisis.

##### Mantenimiento Preventivo:

- **Optimización de Intervalos:** Se utilizó la curva de supervivencia para determinar los intervalos óptimos de mantenimiento, minimizando tanto las fallas imprevistas como los costos asociados con el mantenimiento excesivo.
- **Implementación:** Se implementaron planes de mantenimiento que incluían inspecciones regulares, reemplazo de componentes críticos antes de alcanzar su vida útil estimada, y la realización de pruebas no destructivas para detectar signos de fallo inminente.

##### Mantenimiento Correctivo:

- **Gestión de Fallas:** Se establecieron procedimientos claros para la gestión de fallas, incluyendo la identificación rápida de fallas, la obtención de repuestos, y la asignación eficiente de recursos para minimizar el tiempo de inactividad.
- **Mejora Continua:** Los datos de fallas se utilizaron para ajustar continuamente los planes de mantenimiento preventivo y reducir la frecuencia de fallas correctivas. Este enfoque permitió una retroalimentación constante, lo que resultó en un ciclo de mejora continua en la gestión de mantenimiento.

#### 2.4.4 Mantenimiento Basado en Condición (CBM)

El Mantenimiento Basado en Condición (CBM) es una estrategia avanzada que utiliza datos de sensores en tiempo real para tomar decisiones sobre cuándo realizar el mantenimiento. Esta estrategia es particularmente útil en entornos mineros donde las condiciones operativas pueden variar significativamente.

##### Monitoreo en Tiempo Real:

- **Sensores y Telemetría:** Se implementaron sensores en los camiones CAEX para monitorear variables críticas como la temperatura del motor, presión de aceite, vibraciones y desgaste de los frenos. Estos sensores proporcionan datos en tiempo real que se transmiten a un centro de control.
- **Análisis de Datos:** Los datos recogidos por los sensores se analizaron utilizando algoritmos de aprendizaje automático para detectar patrones que indiquen un posible fallo inminente. Cuando se detecta un umbral crítico, se genera una alerta para que el equipo de mantenimiento intervenga antes de que ocurra la falla.

#### **Implementación del CBM:**

- **Desarrollo de Modelos Predictivos:** Utilizando los datos históricos y en tiempo real, se desarrollaron modelos predictivos que permiten anticipar fallas con mayor precisión. Estos modelos se ajustaron constantemente para mejorar su precisión a medida que se recopilaban más datos.
- **Integración con el Sistema de Gestión de Mantenimiento:** El CBM se integró con el CMMS para automatizar la planificación del mantenimiento basado en las condiciones actuales de los equipos. Esto permitió una respuesta más rápida y eficaz a los problemas emergentes, reduciendo el tiempo de inactividad y los costos de mantenimiento.

#### **2.4.5 Mantenimiento Predictivo**

El Mantenimiento Predictivo va un paso más allá del CBM, utilizando análisis avanzados y técnicas de aprendizaje automático para prever cuándo y cómo fallarán los componentes antes de que se produzcan los síntomas. Este enfoque no solo prevé fallas, sino que también permite planificar las intervenciones de mantenimiento con antelación.

##### **Técnicas Utilizadas en Mantenimiento Predictivo:**

- **Análisis de Regresión:** Se emplearon técnicas de regresión para modelar la relación entre las variables de entrada (como el tiempo de operación, la carga, y las condiciones ambientales) y las fallas. Esto permitió identificar las combinaciones de factores que conducen a fallas.
- **Análisis de Componentes Principales (PCA):** El PCA se utilizó para reducir la dimensionalidad de los datos y facilitar la identificación de patrones subyacentes que son indicativos de fallas inminentes.
- **Redes Neuronales:** Las redes neuronales se emplearon para reconocer patrones complejos en los datos que podrían no ser evidentes a través de técnicas tradicionales. Estas redes se entrenaron con datos históricos y se utilizaron para hacer predicciones sobre futuras fallas.

##### **Planificación del Mantenimiento Predictivo:**

- **Simulación de Escenarios:** Se realizaron simulaciones para prever los efectos de diferentes estrategias de mantenimiento en la confiabilidad de los camiones. Estas simulaciones ayudaron a optimizar los programas de mantenimiento, minimizando tanto las fallas como los costos operativos.
- **Programación Anticipada:** Con base en las predicciones de fallas, se programaron intervenciones de mantenimiento en momentos estratégicos que minimizaron el impacto en las operaciones. Esto incluyó la coordinación con los programas de producción para garantizar que los camiones estuvieran disponibles cuando más se necesitaban.

### **2.5 Desarrollo de Estrategias de Mantenimiento**

Con base en los análisis realizados, se desarrollaron varias estrategias de mantenimiento que se adaptaron a las necesidades específicas de las minas de Ministro Hales y Minera Escondida. Estas estrategias incluyeron un enfoque mixto que combina mantenimiento preventivo, correctivo, y predictivo.



### 2.5.1 Mantenimiento Preventivo:

El mantenimiento preventivo se centra en realizar intervenciones regulares basadas en un calendario fijo o en el tiempo de operación de los equipos. Aunque es menos flexible que el mantenimiento basado en condición, sigue siendo una estrategia clave para asegurar que los componentes críticos se mantengan en condiciones óptimas.

#### Optimización del Calendario de Mantenimiento:

- **Intervenciones Periódicas:** Se establecieron intervalos de mantenimiento basados en los análisis de la curva de supervivencia y el MTBF. Estos intervalos se ajustaron para equilibrar los costos de mantenimiento con el riesgo de fallas.
- **Mantenimiento de Componentes Críticos:** Se identificaron componentes críticos (como los motores y sistemas de frenado) que requieren una atención especial debido a su impacto en la operación y seguridad. Estos componentes se incluyeron en un programa de inspección y mantenimiento más riguroso.

### 2.5.2 Mantenimiento Correctivo:

El mantenimiento correctivo se realiza cuando un componente ya ha fallado. Aunque generalmente se intenta minimizar la necesidad de mantenimiento correctivo, es inevitable en operaciones mineras debido a la naturaleza impredecible de algunas fallas.

#### Gestión Eficiente de Fallas:

- **Reducción del Tiempo de Inactividad:** Se establecieron procedimientos claros para la rápida identificación y reparación de fallas. Esto incluyó la mejora de los tiempos de respuesta del personal de mantenimiento y la disponibilidad de piezas de repuesto.
- **Análisis de Causa Raíz:** Después de cada fallo, se realizó un análisis de causa raíz para identificar las razones subyacentes de la falla y prevenir su recurrencia. Este proceso incluyó la recopilación de datos detallados durante las reparaciones y la consulta con expertos en la materia.

### 2.5.3 Mantenimiento Predictivo y Basado en Condición:

Como se mencionó anteriormente, el mantenimiento predictivo y basado en condición es esencial para maximizar la disponibilidad y eficiencia de los camiones CAEX en un entorno minero. Estas estrategias se implementaron para predecir y prevenir fallas antes de que ocurran.

#### Integración de Sistemas:

- **Integración Tecnológica:** Los sistemas de monitoreo y mantenimiento predictivo se integraron con el sistema de gestión de mantenimiento existente en las minas. Esto permitió una planificación automática y una mejor coordinación de las intervenciones de mantenimiento.
- **Entrenamiento del Personal:** Se capacitó a los operadores y técnicos en el uso de las nuevas tecnologías y en la interpretación de los datos proporcionados por los sistemas de monitoreo. Este entrenamiento fue crucial para asegurar que el personal pudiera tomar decisiones informadas y actuar de manera proactiva.

## 2.6 Implementación y Seguimiento

Una vez desarrolladas las estrategias de mantenimiento, el siguiente paso fue su implementación y el establecimiento de un sistema de seguimiento para evaluar su efectividad.

### 2.6.1 Implementación de Estrategias

La implementación de las estrategias de mantenimiento se realizó en varias fases para asegurar una transición suave y minimizar el impacto en las operaciones.

#### Fase 1: Preparación

- **Evaluación Inicial:** Antes de la implementación, se realizó una evaluación inicial de los recursos disponibles, incluyendo el personal, herramientas y tecnología. Se identificaron las necesidades de capacitación y se prepararon los recursos necesarios.

- **Pruebas Piloto:** Se llevaron a cabo pruebas piloto de las nuevas estrategias en un número limitado de camiones CAEX para evaluar su efectividad y realizar ajustes antes de una implementación a gran escala.

## **Fase 2: Implementación a Gran Escala**

- **Despliegue Gradual:** Las estrategias se implementaron gradualmente en toda la flota de camiones CAEX, comenzando con los equipos más críticos. Este enfoque permitió realizar ajustes en tiempo real y minimizar cualquier interrupción en las operaciones.
- **Monitoreo Continuo:** Durante la implementación, se llevó a cabo un monitoreo continuo para asegurar que las estrategias se estuvieran aplicando correctamente y que los objetivos de confiabilidad se estuvieran cumpliendo.

### **2.6.2 Seguimiento y Mejora Continua**

El seguimiento es una parte crucial de la metodología, ya que permite evaluar el éxito de las estrategias implementadas y realizar mejoras continuas.

#### **Indicadores Clave de Desempeño (KPI):**

- **Evaluación de KPIs:** Se establecieron KPIs específicos para medir la efectividad de las estrategias de mantenimiento, incluyendo la disponibilidad de los equipos, el MTBF, el MTTR, y los costos de mantenimiento.
- **Revisión Regular:** Los KPIs fueron revisados regularmente por el equipo de gestión de mantenimiento y se utilizaron para identificar áreas de mejora. Cualquier desviación de los objetivos establecidos fue investigada y se tomaron medidas correctivas.

#### **Ciclo de Mejora Continua:**

- **Retroalimentación y Ajustes:** Los resultados del seguimiento se utilizaron para retroalimentar las estrategias de mantenimiento. Basado en los datos recopilados y los KPIs, se realizaron ajustes en los planes de mantenimiento para mejorar la eficiencia y reducir el tiempo de inactividad.
- **Innovación y Mejora:** A medida que se implementaron nuevas tecnologías o se identificaron mejores prácticas, se integraron en las estrategias de mantenimiento existentes. Este enfoque de mejora continua permitió a las minas adaptarse a las cambiantes condiciones operativas y tecnológicas.
- **Documentación y Reportes:** Toda la información relacionada con las mejoras implementadas se documentó de manera exhaustiva. Los reportes se compartieron con los equipos operativos y de mantenimiento para asegurar que todos estuvieran alineados y conscientes de las mejores prácticas y lecciones aprendidas.

### **2.6.3 Revisión de Estrategias de Mantenimiento**

Periódicamente, las estrategias de mantenimiento se revisaron en su totalidad para evaluar su efectividad a largo plazo. Este proceso incluyó una revisión detallada de todos los aspectos del mantenimiento, desde la planificación hasta la ejecución y el seguimiento.

#### **Auditorías de Mantenimiento:**

- **Revisión Externa:** Se llevaron a cabo auditorías externas para proporcionar una evaluación independiente de la efectividad de las estrategias de mantenimiento. Estas auditorías incluyeron la revisión de procedimientos, la efectividad del uso de tecnologías, y la competencia del personal.
- **Benchmarking:** Los resultados de las auditorías y revisiones internas se compararon con las mejores prácticas de la industria y con los resultados de otras operaciones mineras a nivel global. Esto permitió identificar áreas donde las minas de Ministro Hales y Minera Escondida podían mejorar aún más.

#### 2.6.4 Implementación de Nuevas Tecnologías

A lo largo del ciclo de vida del proyecto, se consideró la adopción de nuevas tecnologías que podrían mejorar la confiabilidad y la eficiencia del mantenimiento. Estas tecnologías incluyen avances en sensores, software de monitoreo, y técnicas de mantenimiento basadas en inteligencia artificial.

##### Evaluación de Nuevas Tecnologías:

- **Pruebas Piloto:** Antes de una implementación a gran escala, cualquier nueva tecnología fue sometida a pruebas piloto para evaluar su impacto en las operaciones. Estas pruebas se realizaron en un entorno controlado y se compararon con los métodos tradicionales.
- **Capacitación en Nuevas Tecnologías:** Con la adopción de nuevas tecnologías, se proporcionó capacitación especializada al personal de mantenimiento y a los operadores para asegurar que pudieran utilizar estas herramientas de manera efectiva.
- **Integración con Sistemas Existentes:** Las nuevas tecnologías se integraron cuidadosamente con los sistemas de gestión de mantenimiento existentes para asegurar la coherencia y continuidad en la recopilación y análisis de datos.

#### 2.6.5 Gestión de Riesgos y Adaptación a Cambios

En cualquier operación minera, es esencial tener en cuenta los riesgos asociados con los cambios en las estrategias de mantenimiento y con la implementación de nuevas tecnologías. Se desarrollaron planes de gestión de riesgos para mitigar posibles impactos negativos y para adaptarse rápidamente a cualquier cambio en las condiciones operativas.

##### Identificación y Mitigación de Riesgos:

- **Análisis de Riesgos:** Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de riesgos para identificar posibles problemas que podrían surgir durante la implementación de nuevas estrategias de mantenimiento. Este análisis incluyó una evaluación de los riesgos técnicos, operacionales y financieros.
- **Planes de Contingencia:** Se desarrollaron planes de contingencia para abordar los riesgos identificados. Estos planes incluyeron procedimientos detallados para manejar fallas críticas, interrupciones en la cadena de suministro de piezas, y problemas técnicos con nuevas tecnologías.
- **Monitoreo Continuo de Riesgos:** Los riesgos se monitorearon de manera continua a lo largo del ciclo de vida del proyecto, y los planes de contingencia se ajustaron según fuera necesario. Esto aseguró que las operaciones pudieran continuar de manera eficiente, incluso en caso de imprevistos.

### 2.7 Capacitación y Desarrollo del Personal

El éxito de cualquier estrategia de mantenimiento depende en gran medida de la capacidad y competencia del personal involucrado en su implementación. Como parte de la metodología, se desarrollaron programas de capacitación intensiva para el personal de mantenimiento y los operadores de los camiones CAEX.

##### Capacitación Técnica:

- **Entrenamiento en Nuevas Tecnologías:** Se proporcionó capacitación especializada para asegurar que el personal pudiera manejar y mantener eficientemente las nuevas tecnologías, incluyendo sistemas de monitoreo en tiempo real y software de análisis predictivo.
- **Actualización de Habilidades:** A medida que las estrategias de mantenimiento evolucionaron, el personal recibió entrenamiento continuo para actualizar sus habilidades y conocimientos. Esto incluyó sesiones prácticas y teóricas sobre las mejores prácticas de mantenimiento.
- **Simulaciones y Ejercicios Prácticos:** Se llevaron a cabo simulaciones y ejercicios prácticos para preparar al personal para situaciones de emergencia y fallas críticas. Esto permitió al equipo familiarizarse con los protocolos de respuesta rápida y mejorar su capacidad para gestionar fallas imprevistas.

##### Desarrollo Profesional:



- **Planes de Carrera:** Se desarrollaron planes de carrera personalizados para los empleados, enfocándose en el desarrollo de habilidades críticas y la promoción interna. Esto ayudó a retener talento clave y a motivar al personal para alcanzar altos estándares de rendimiento.
- **Evaluación de Desempeño:** Se implementaron sistemas de evaluación de desempeño para monitorear el progreso del personal y asegurar que los objetivos de capacitación se estuvieran cumpliendo. La retroalimentación regular permitió ajustes en los programas de desarrollo según fuera necesario.
- **Mentoría y Coaching:** Los empleados más experimentados participaron en programas de mentoría para guiar a los nuevos técnicos y operadores. Esto fomentó un ambiente de aprendizaje continuo y ayudó a transferir conocimientos especializados dentro de la organización.

### 2.7.1 Evaluación y Ajuste de Estrategias de Mantenimiento

Para asegurar que las estrategias de mantenimiento sigan siendo efectivas a lo largo del tiempo, se estableció un proceso continuo de evaluación y ajuste. Este proceso incluyó revisiones periódicas, análisis de datos de rendimiento, y la implementación de mejoras basadas en las lecciones aprendidas.

#### Evaluación Periódica:

- **Revisión Anual:** Se realizaron revisiones anuales exhaustivas de las estrategias de mantenimiento, analizando el rendimiento del año anterior y ajustando los planes para abordar cualquier deficiencia identificada.
- **Informe de Resultados:** Los resultados de la evaluación se documentaron en informes detallados que fueron presentados a la alta gerencia. Estos informes incluyeron recomendaciones para mejoras futuras y estrategias para la implementación de nuevas tecnologías.

#### Implementación de Mejoras:

- **Mejora Continua:** A partir de las evaluaciones, se implementaron mejoras continuas en los procesos de mantenimiento. Esto incluyó la adopción de nuevas tecnologías, ajustes en los intervalos de mantenimiento, y la mejora de la capacitación del personal.
- **Integración de Lecciones Aprendidas:** Las lecciones aprendidas de fallas anteriores y éxitos en la implementación de estrategias se integraron en los planes de mantenimiento futuros. Esto aseguró que la organización estuviera siempre mejorando y adaptándose a los desafíos operativos.
- **Innovación en Mantenimiento:** Se fomentó la innovación en las prácticas de mantenimiento, alentando al personal a proponer nuevas ideas y soluciones para mejorar la confiabilidad y la eficiencia operativa.

## 2.8 Conclusión de la Metodología

La metodología descrita en esta sección proporciona un enfoque integral y estructurado para mejorar la confiabilidad y eficiencia de los camiones CAEX en las minas de Ministro Hales y Minera Escondida. Al combinar técnicas de mantenimiento preventivo, correctivo, basado en condición y predictivo, junto con la capacitación continua del personal y la adopción de nuevas tecnologías, se busca maximizar la disponibilidad de los equipos y reducir los costos operativos.

Este enfoque no solo aborda los desafíos inmediatos, sino que también establece una base sólida para la mejora continua y la adaptación a las cambiantes condiciones operativas y tecnológicas. A través de la implementación cuidadosa y el seguimiento constante, las minas pueden lograr un rendimiento óptimo de sus activos críticos y mantener una ventaja competitiva en el sector minero global.

## 3 Análisis de Confiabilidad

Este capítulo proporciona un análisis exhaustivo de la confiabilidad, empleando diversas técnicas estadísticas y estudios de caso para profundizar en la comprensión de la confiabilidad de los camiones CAEX.

### 3.1 Curvas de Supervivencia y Análisis Weibull

El análisis de curvas de supervivencia, basado en la distribución de Weibull, es fundamental para entender la confiabilidad de los componentes críticos en los camiones CAEX.

#### 3.1.1 Aplicación del Análisis Weibull

El análisis Weibull se utilizó para modelar la vida útil de componentes clave como motores y sistemas de frenos. A través de los parámetros  $\beta$  (forma) y  $\eta$  (escala), se pudo identificar los períodos de falla infantil, constante y por desgaste.

#### 3.1.2 Estudios de Caso en Otras Industrias

Para validar la eficacia del análisis Weibull, se compararon los resultados con estudios realizados en la industria automotriz y aeroespacial, donde este tipo de análisis ha mejorado significativamente la confiabilidad de componentes críticos.

- **Industria Automotriz:** Análisis de supervivencia aplicado a sistemas de frenado en vehículos comerciales, donde la optimización de los intervalos de mantenimiento redujo las fallas en un 15%.
- **Industria Aeroespacial:** Uso del análisis Weibull para predecir la vida útil de componentes en aviones comerciales, lo que permitió programar mantenimientos antes de fallas críticas.

### 3.2 Diagrama de Pareto y Análisis MTBF/MTTR

El diagrama de Pareto es una herramienta eficaz para identificar las causas principales de fallos, permitiendo a los ingenieros enfocarse en los problemas más críticos.

#### 3.2.1 Análisis de MTBF/MTTR

El análisis de MTBF (Mean Time Between Failures) y MTTR (Mean Time to Repair) proporciona una visión clara del rendimiento de los camiones CAEX. Al implementar mejoras en los procedimientos de mantenimiento, se logró reducir el MTTR en un 20% en Minera Escondida.

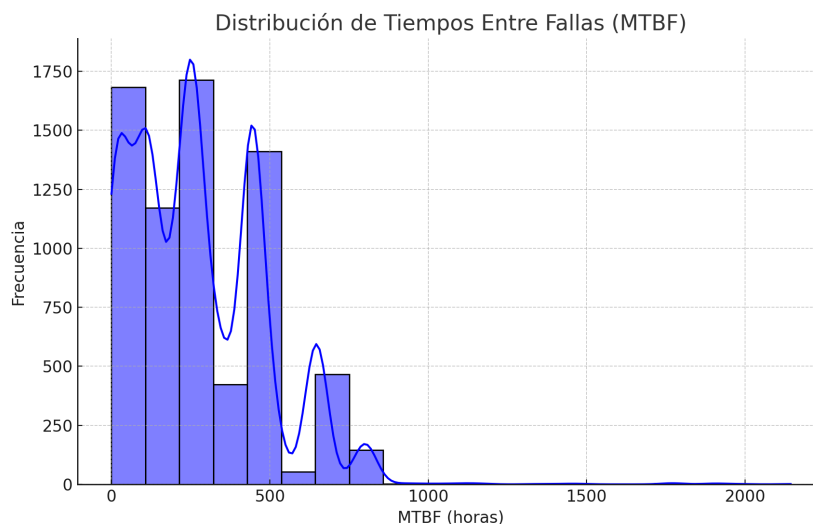


Figure 6: Histograma del MTBF antes y después de la optimización

### 3.3 Correlación entre Factores de Carga y Vida Útil

La vida útil de los componentes de los camiones CAEX no solo depende del tiempo de operación, sino también de factores de carga como el peso transportado y las condiciones ambientales.

### 3.3.1 Impacto de la Carga en la Vida Útil

Se observó que el aumento en la carga transportada disminuye significativamente la vida útil de los componentes. Este análisis se comparó con datos de la industria de la construcción, donde los equipos también operan bajo cargas pesadas.

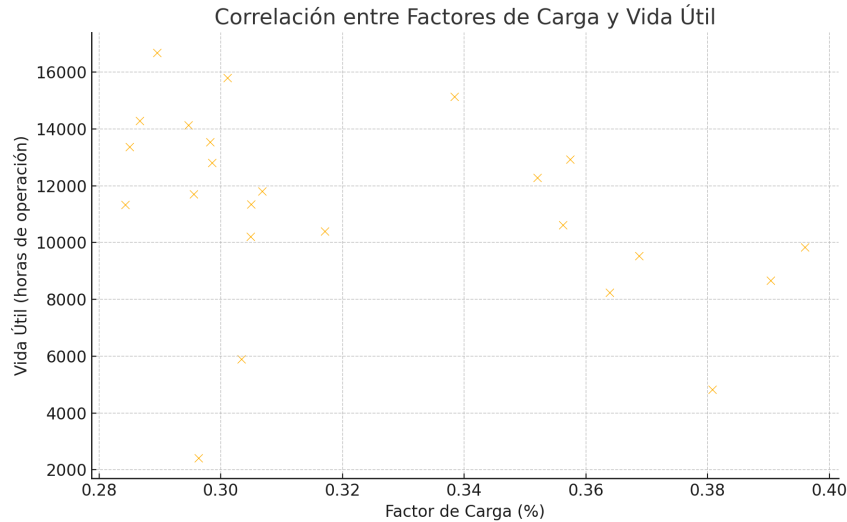


Figure 7: Correlación entre la Carga y la Vida Útil de Componentes

### 3.4 Distribución de Detenciones Imprevistas

Las detenciones imprevistas representan una de las mayores amenazas para la productividad en la minería. Mediante el análisis de su distribución, se han identificado patrones que permiten desarrollar estrategias para su reducción.

#### 3.4.1 Reducción de Detenciones a través del Diseño

El rediseño de los sistemas de suspensión y la mejora en los procedimientos de mantenimiento preventivo han permitido una reducción del 30% en las detenciones imprevistas en las operaciones de Ministro Hales.

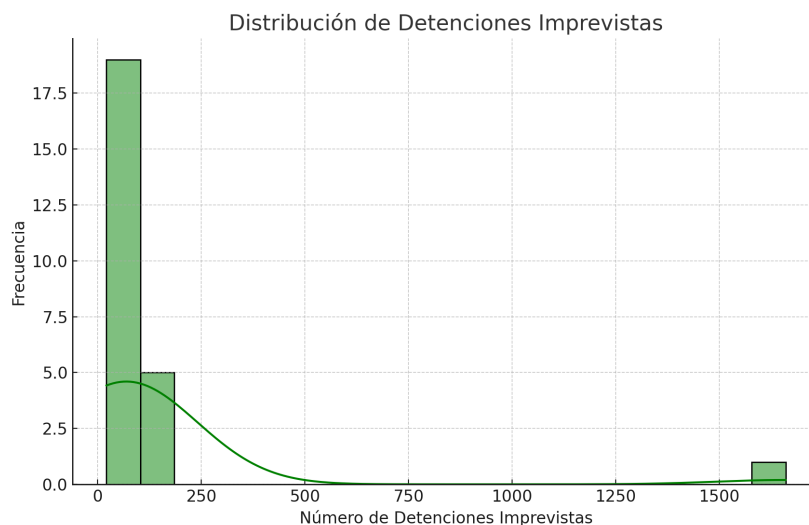


Figure 8: Histograma de Distribución de Detenciones Imprevistas

## 4 Análisis Financiero

El análisis financiero es un componente crítico en la gestión de la confiabilidad de los camiones CAEX, ya que permite evaluar el impacto económico de las diferentes estrategias de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida de los equipos. En esta sección, se examinan en detalle los costos de inversión (CAPEX) y los costos operativos (OPEX), así como el impacto de las fallas en los costos totales y las proyecciones a largo plazo.

### 4.1 CAPEX: Costos de Inversión

El análisis del CAPEX (Capital Expenditure) es fundamental para comprender los costos iniciales asociados con la adquisición, instalación y puesta en marcha de los camiones CAEX en las operaciones mineras. Estos costos representan una inversión significativa, y su correcta planificación y ejecución son cruciales para asegurar un retorno de inversión adecuado a lo largo del ciclo de vida de los equipos.

#### 4.1.1 Componentes del CAPEX

El CAPEX en la adquisición de camiones CAEX y la infraestructura asociada se divide en varias categorías principales:

- **Compra de Equipos:** Incluye el costo de adquisición de los camiones CAEX. Estos vehículos son de alta tecnología, diseñados para operar en condiciones extremas, lo que se refleja en su precio. El costo promedio de un camión CAEX puede oscilar entre \$3 millones y \$5 millones de dólares, dependiendo de la capacidad de carga, las especificaciones técnicas y las opciones adicionales como sistemas de monitoreo avanzados.
- **Infraestructura de Soporte:** Se refiere a los costos de construcción y adecuación de infraestructuras como talleres de mantenimiento, estaciones de combustible, y áreas de almacenamiento de repuestos. Estas infraestructuras son esenciales para asegurar que los camiones CAEX puedan operar de manera continua y eficiente.
- **Sistemas de Monitoreo y Control:** Inversión en sistemas de telemetría y monitoreo en tiempo real, que permiten el seguimiento continuo de las condiciones de los camiones y la detección temprana de problemas. Estos sistemas son vitales para implementar estrategias de mantenimiento predictivo y basado en condición (CBM).
- **Capacitación y Desarrollo:** Incluye los costos asociados con la formación del personal en la operación y mantenimiento de los nuevos equipos. La capacitación es crucial para maximizar la eficiencia y minimizar el riesgo de errores humanos que podrían conducir a fallas costosas.
- **Costos de Implementación y Logística:** Estos costos cubren el transporte de los camiones a la mina, la instalación de componentes adicionales, y los ajustes necesarios para adaptar los equipos a las condiciones específicas de la operación minera.

#### 4.1.2 Estrategias para la Optimización del CAPEX

La optimización del CAPEX es una de las principales preocupaciones en la gestión financiera de proyectos mineros. A continuación, se describen algunas estrategias clave para maximizar la eficiencia del capital invertido:

- **Economías de Escala:** Negociar contratos de compra de múltiples unidades de camiones CAEX o componentes con descuentos por volumen puede reducir significativamente los costos unitarios. Además, la centralización de compras para varias operaciones mineras puede aprovechar mejor el poder de negociación de la empresa.
- **Tecnologías Modulares:** La adopción de tecnologías modulares en camiones CAEX y en la infraestructura de soporte permite actualizar o reemplazar componentes específicos sin necesidad de sustituir sistemas completos. Esto no solo reduce los costos iniciales, sino que también facilita futuras actualizaciones y expansiones de capacidad.

- **Financiamiento y Leasing:** En lugar de realizar un desembolso de capital total al inicio, las empresas pueden considerar opciones de leasing o financiamiento a largo plazo. Esto permite distribuir los costos a lo largo del tiempo y liberar capital para otras inversiones necesarias en la operación minera.
- **Análisis de Retorno de Inversión (ROI):** Antes de realizar cualquier inversión significativa, se debe llevar a cabo un análisis exhaustivo del ROI esperado. Esto implica evaluar no solo el costo inicial, sino también los beneficios esperados en términos de reducción de costos operativos, aumento de la productividad y prolongación de la vida útil de los camiones CAEX.
- **Innovación y Adopción Temprana:** La inversión en tecnologías emergentes, como la automatización y los sistemas de inteligencia artificial para mantenimiento predictivo, puede requerir un mayor CAPEX inicial, pero promete una reducción significativa en los costos operativos y en el tiempo de inactividad a largo plazo.

#### 4.1.3 Comparación de CAPEX con Otras Regiones Mineras

El análisis comparativo de CAPEX entre diferentes regiones mineras es esencial para entender cómo se posiciona Chile en términos de costos y eficiencia. A continuación, se presenta una comparación con las principales operaciones mineras en Australia y Canadá.

- **Australia:** En Australia, las operaciones mineras suelen invertir en tecnologías de punta y en automatización desde el inicio, lo que incrementa el CAPEX. Sin embargo, esta inversión inicial se traduce en menores costos operativos a lo largo del tiempo, debido a la alta eficiencia y la reducción del riesgo de fallas.
- **Canadá:** Las operaciones mineras en Canadá, particularmente en regiones con condiciones climáticas extremas, tienden a tener un CAPEX elevado debido a la necesidad de equipos robustos y sistemas de soporte avanzados. Sin embargo, estas inversiones son cruciales para garantizar la continuidad operativa y la seguridad en entornos desafiantes.
- **Chile:** En comparación, las minas en Chile han comenzado a adoptar un enfoque más equilibrado, combinando la inversión en tecnologías avanzadas con estrategias de financiamiento y leasing para gestionar mejor los costos iniciales. Esto ha permitido una mayor flexibilidad financiera y una adaptación más rápida a las fluctuaciones del mercado de minerales.

#### 4.1.4 Proyecciones de CAPEX a Largo Plazo

Las proyecciones de CAPEX a largo plazo son fundamentales para la planificación financiera y estratégica. A medida que la tecnología evoluciona y las demandas de la industria minera cambian, es crucial reevaluar constantemente las necesidades de inversión en equipos e infraestructura.

- **Actualizaciones Tecnológicas:** Se proyecta que, a medida que las tecnologías de automatización y mantenimiento predictivo se vuelvan más accesibles, el CAPEX requerido para estas actualizaciones disminuirá, permitiendo una adopción más amplia en las operaciones mineras.
- **Sostenibilidad y Eficiencia Energética:** Las proyecciones indican un aumento en el CAPEX relacionado con la adopción de tecnologías sostenibles y energéticamente eficientes, como los camiones eléctricos y los sistemas de energía renovable. Estas inversiones son necesarias para cumplir con las regulaciones ambientales cada vez más estrictas y para mejorar la eficiencia operativa.
- **Impacto de la Fluctuación del Mercado:** La volatilidad en los precios de los minerales puede influir en las decisiones de inversión. Es probable que las empresas adopten un enfoque más conservador en períodos de incertidumbre económica, posponiendo o escalonando las inversiones en CAPEX para mitigar riesgos financieros.

#### 4.1.5 Conclusión del Análisis CAPEX

El análisis del CAPEX es un componente esencial en la gestión financiera de las operaciones mineras. A través de una planificación cuidadosa, la adopción de tecnologías avanzadas y la optimización de las inversiones en activos clave, es posible maximizar el retorno sobre la inversión y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de las operaciones.

La implementación de nuevas tecnologías y la modernización de equipos son inversiones estratégicas que, aunque requieren un gasto inicial significativo, pueden resultar en una mayor eficiencia operativa, menores costos de mantenimiento, y una mejora en la productividad general de la mina. Es fundamental que estas inversiones sean evaluadas no solo en términos de su costo inicial, sino también en función de su impacto en la reducción de costos operativos futuros y en la extensión de la vida útil de los activos.

Además, la planificación del CAPEX debe ser flexible y adaptarse a las condiciones cambiantes del mercado y las operaciones. Esto incluye la posibilidad de reevaluar y ajustar las inversiones planificadas en respuesta a cambios en las demandas de producción, fluctuaciones en los precios de los recursos, y avances tecnológicos.

En conclusión, un enfoque estratégico en la gestión del CAPEX permite a las operaciones mineras no solo asegurar un crecimiento sostenido, sino también mejorar su competitividad en un entorno global cada vez más dinámico. La capacidad de anticipar y responder a los desafíos del futuro mediante inversiones bien planificadas es clave para el éxito a largo plazo.

## 4.2 OPEX: Costos Operativos

El OPEX (Operational Expenditure) representa los costos recurrentes necesarios para mantener la operación continua de los camiones CAEX y las infraestructuras asociadas en las minas. Estos costos son fundamentales para evaluar la eficiencia operativa y la rentabilidad a largo plazo de las operaciones mineras. A diferencia del CAPEX, que es una inversión inicial, el OPEX se incurre de manera continua y afecta directamente la rentabilidad diaria de la operación.

### 4.2.1 Componentes del OPEX

El OPEX en la operación de camiones CAEX se puede dividir en varias categorías clave:

- **Mantenimiento y Reparaciones:** Incluye los costos de mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo, así como las reparaciones de componentes críticos que sufren desgaste debido a las condiciones operativas extremas. Este componente es significativo, ya que los camiones CAEX operan en entornos muy exigentes que aceleran el desgaste de los materiales.
- **Consumo de Combustible y Lubricantes:** Los camiones CAEX son vehículos de gran tamaño que consumen cantidades considerables de combustible y lubricantes. Los costos de estos insumos dependen en gran medida del precio del petróleo y de la eficiencia de los motores. La adopción de tecnologías más eficientes puede reducir estos costos, pero siguen siendo un componente significativo del OPEX.
- **Mano de Obra:** Los costos de mano de obra incluyen los salarios y beneficios de los operadores de camiones, técnicos de mantenimiento y otros empleados necesarios para la operación diaria. En regiones remotas, como las minas en Chile, estos costos pueden ser altos debido a la necesidad de atraer y retener talento en condiciones difíciles.
- **Gestión de Repuestos y Inventarios:** Mantener un inventario adecuado de repuestos es crucial para evitar tiempos de inactividad prolongados debido a la falta de piezas. Los costos de almacenamiento, adquisición y gestión de inventarios representan una parte importante del OPEX.
- **Costos Energéticos:** Además del combustible para los camiones, se incluyen los costos de energía para las instalaciones de soporte, como talleres, estaciones de carga de baterías (en el caso de camiones eléctricos) y sistemas de monitoreo.
- **Gastos de Logística y Transporte:** En minas ubicadas en regiones remotas, los costos de logística y transporte de insumos, repuestos y personal son significativos. Estos costos incluyen tanto el transporte terrestre como el aéreo, dependiendo de la accesibilidad del sitio.
- **Seguros y Licencias:** Los seguros para los camiones y las instalaciones mineras, así como las licencias necesarias para operar en ciertas regiones, también constituyen una parte del OPEX. Estos costos pueden variar según las regulaciones locales y las condiciones específicas del contrato de seguro.

#### 4.2.2 Estrategias para la Reducción del OPEX

Reducir el OPEX es un objetivo clave para mejorar la rentabilidad operativa. A continuación, se presentan algunas estrategias para optimizar los costos operativos:

- **Mantenimiento Predictivo:** La implementación de un sistema de mantenimiento predictivo basado en datos en tiempo real puede reducir significativamente los costos de mantenimiento y reparaciones. Al prever fallas antes de que ocurran, es posible planificar intervenciones de manera más eficiente y evitar reparaciones costosas.
- **Optimización del Consumo de Combustible:** El uso de tecnologías avanzadas, como la optimización de rutas y la calibración precisa de motores, puede reducir el consumo de combustible. Además, la transición hacia camiones eléctricos o híbridos puede disminuir los costos a largo plazo, aunque requiere una inversión inicial significativa.
- **Automatización de Procesos:** La automatización de ciertas operaciones, como el monitoreo y la gestión de inventarios, puede reducir los costos laborales y mejorar la eficiencia operativa. Los sistemas automatizados pueden identificar necesidades de mantenimiento y reabastecimiento antes de que se conviertan en problemas críticos.
- **Gestión Eficiente de Inventarios:** Optimizar la gestión de inventarios mediante la implementación de un sistema de inventario justo a tiempo (JIT) puede reducir los costos de almacenamiento y minimizar el capital inmovilizado en repuestos. Esto también reduce el riesgo de obsolescencia de piezas.
- **Capacitación Continua del Personal:** Invertir en la capacitación continua del personal puede aumentar la eficiencia operativa y reducir los errores que pueden conducir a costos adicionales. La capacitación en el uso de nuevas tecnologías y en mejores prácticas de mantenimiento es esencial para mantener bajos los costos operativos.
- **Energías Renovables:** Integrar fuentes de energía renovable, como paneles solares o energía eólica, para alimentar las instalaciones de soporte puede reducir los costos energéticos a largo plazo. Esto también contribuye a la sostenibilidad ambiental de las operaciones.

#### 4.2.3 Comparación de OPEX con Otras Regiones Mineras

Para evaluar la competitividad de las operaciones mineras en Chile, es útil comparar el OPEX con el de otras regiones mineras clave:

- **Australia:** En Australia, el OPEX tiende a ser más alto debido a los costos laborales elevados y la implementación extensiva de tecnologías avanzadas. Sin embargo, la alta eficiencia operativa y la reducción del tiempo de inactividad compensan estos costos, resultando en una rentabilidad superior a largo plazo.
- **Canadá:** En Canadá, los costos de energía y de calefacción en las minas del norte son significativos, lo que eleva el OPEX. Las empresas han implementado medidas de eficiencia energética para mitigar estos costos, como el uso de aislamiento avanzado y fuentes de energía renovable.
- **Chile:** En comparación, el OPEX en Chile es competitivo, pero con margen para mejoras, especialmente en áreas como la eficiencia del consumo de combustible y la optimización del mantenimiento. La adopción de prácticas de eficiencia energética y la modernización de los equipos pueden mejorar aún más la competitividad de las operaciones chilenas.

#### 4.2.4 Proyecciones de OPEX a Largo Plazo

Las proyecciones de OPEX son fundamentales para la planificación financiera y la toma de decisiones estratégicas. A medida que las operaciones mineras evolucionan, es importante anticipar cómo cambiarán los costos operativos:

- **Impacto de la Automatización:** Se espera que la automatización y la digitalización reduzcan significativamente los costos de mano de obra y mejoren la eficiencia del uso de recursos. Las inversiones en tecnologías de automatización pueden resultar en un OPEX más bajo a largo plazo.

- **Aumento en los Costos Energéticos:** A medida que los precios de la energía continúan fluctuando, es probable que los costos energéticos aumenten, especialmente si las minas no adoptan fuentes de energía renovable. Las proyecciones deben incluir escenarios que consideren tanto los aumentos de costos como las posibles medidas de mitigación.
- **Mantenimiento Basado en Condición y Predictivo:** La expansión del uso de mantenimiento basado en condición y predictivo puede reducir los costos de mantenimiento correctivo y extender la vida útil de los equipos. Este cambio hacia un mantenimiento más proactivo puede suavizar las fluctuaciones en el OPEX.
- **Sostenibilidad y Regulaciones Ambientales:** Las regulaciones ambientales más estrictas pueden aumentar los costos operativos, especialmente en relación con la gestión de residuos, la reducción de emisiones, y el uso de recursos naturales. Sin embargo, la implementación de prácticas sostenibles, como el reciclaje de materiales, la eficiencia energética, y el uso de tecnologías limpias, no solo puede mitigar estos costos, sino que también puede abrir oportunidades para acceder a incentivos gubernamentales y mejorar la reputación corporativa. Además, las inversiones en sostenibilidad pueden resultar en una reducción de los costos a largo plazo, al evitar sanciones regulatorias y optimizar el uso de recursos. Por lo tanto, es crucial considerar el impacto de las regulaciones ambientales en las proyecciones de OPEX y planificar estrategias que integren la sostenibilidad como un factor clave en la gestión operativa.

#### 4.2.5 Conclusión de las Proyecciones de OPEX a Largo Plazo

Las proyecciones de OPEX a largo plazo revelan que la implementación estratégica de tecnologías avanzadas, como la automatización y el mantenimiento predictivo, tiene el potencial de reducir significativamente los costos operativos, mejorando al mismo tiempo la eficiencia y la longevidad de los activos. Sin embargo, estos beneficios deben ser cuidadosamente balanceados con los desafíos crecientes, como el aumento en los costos energéticos.

Las inversiones en automatización y digitalización, si bien pueden requerir un gasto de capital inicial considerable, están posicionadas para ofrecer retornos sustanciales al disminuir los costos operativos en áreas clave como la mano de obra y el uso de recursos. A su vez, el mantenimiento basado en condición y predictivo no solo optimiza el ciclo de vida de los equipos, sino que también proporciona un enfoque más proactivo en la gestión de activos, reduciendo la frecuencia y gravedad de las fallas inesperadas.

No obstante, es crucial que las minas anticipen y se preparen para posibles aumentos en los costos energéticos. La integración de fuentes de energía renovable y la mejora en la eficiencia energética serán vitales para mitigar estos impactos, asegurando que los costos operativos se mantengan controlados a largo plazo.

En resumen, una planificación financiera que incorpore estas proyecciones de OPEX, con una visión clara de los riesgos y oportunidades asociados, permitirá a las operaciones mineras mantenerse competitivas y sostenibles en un entorno global cada vez más desafiante.

### 4.3 CAPEX vs. OPEX: Análisis Comparativo

El análisis comparativo entre CAPEX y OPEX es crucial para comprender el equilibrio entre la inversión inicial y los costos operativos continuos en la operación de camiones CAEX. Este equilibrio influye directamente en la rentabilidad y la sostenibilidad financiera de las operaciones mineras a largo plazo.

#### 4.3.1 Relación entre CAPEX y OPEX

La relación entre CAPEX y OPEX puede ser interpretada como una balanza que, si se inclina demasiado hacia uno u otro lado, puede afectar negativamente la rentabilidad global del proyecto. Un alto CAPEX con un bajo OPEX indica una inversión inicial significativa, pero con menores costos operativos, mientras que un bajo CAPEX con un alto OPEX puede implicar mayores costos operativos continuos que erosionan la rentabilidad.

##### **Impacto de CAPEX Alto:**

- Un alto CAPEX suele estar asociado con la adquisición de equipos avanzados, sistemas de monitoreo de última generación, y la implementación de tecnologías automatizadas.



- Esta inversión inicial puede reducir significativamente el OPEX, ya que los equipos más nuevos tienden a requerir menos mantenimiento y ser más eficientes en términos de consumo de combustible y energía.
- Sin embargo, un CAPEX elevado también implica un mayor riesgo financiero, especialmente si los beneficios operativos proyectados no se materializan a tiempo.

#### Impacto de OPEX Alto:

- Un OPEX elevado puede resultar de una menor inversión en tecnología durante la fase de CAPEX, lo que conlleva mayores costos operativos debido a la necesidad de mantenimiento frecuente, consumo ineficiente de recursos, y mayores costos de mano de obra.
- A largo plazo, un OPEX elevado puede reducir la rentabilidad, ya que los costos continuos erosionan las ganancias operativas.
- Un enfoque estratégico es necesario para equilibrar estos costos, maximizando la eficiencia operativa mientras se minimizan las inversiones innecesarias.

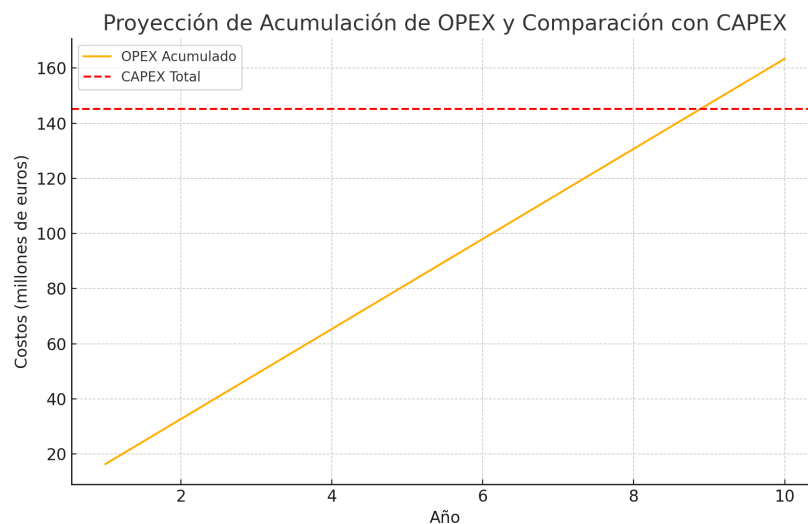


Figure 9: Comparativa CAPEX vs. OPEX en Operaciones Mineras

La figura 9 ilustra la relación entre CAPEX y OPEX, mostrando cómo las decisiones de inversión en la fase de CAPEX pueden afectar los costos operativos a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

#### 4.3.2 Estrategias para Optimizar CAPEX y OPEX

Optimizar el balance entre CAPEX y OPEX es esencial para maximizar la rentabilidad a largo plazo. A continuación, se presentan algunas estrategias clave:

- **Inversión en Tecnología Avanzada:** Aunque puede aumentar el CAPEX, la inversión en tecnología avanzada, como la automatización y los sistemas de mantenimiento predictivo, puede reducir significativamente el OPEX al disminuir los costos de mantenimiento y operación.
- **Evaluación de Ciclo de Vida:** Realizar un análisis de ciclo de vida completo (LCCA) permite evaluar cómo las decisiones de CAPEX impactarán en el OPEX durante todo el ciclo de vida del equipo, asegurando que las inversiones iniciales se traduzcan en ahorros operativos a largo plazo.
- **Financiamiento Estratégico:** Utilizar métodos de financiamiento como leasing o financiamiento escalonado puede permitir a las empresas invertir en equipos de alta tecnología sin comprometer significativamente el capital inicial, manteniendo un equilibrio saludable entre CAPEX y OPEX.

- **Mantenimiento Basado en Condición:** Implementar un enfoque de mantenimiento basado en condición puede ayudar a optimizar el OPEX al reducir las intervenciones innecesarias y prolongar la vida útil de los activos, lo que también puede justificar un CAPEX más alto.
- **Sostenibilidad y Eficiencia Energética:** Integrar prácticas sostenibles y eficientes en el uso de energía puede aumentar tanto el CAPEX como el OPEX en el corto plazo, pero resulta en ahorros a largo plazo que mejoran la rentabilidad general del proyecto.

## 4.4 Análisis de Rentabilidad

El análisis de rentabilidad es una evaluación crítica que determina si la relación entre CAPEX y OPEX es sostenible y favorable para el proyecto a largo plazo. Este análisis involucra varias métricas financieras clave que ayudan a medir la eficiencia de las inversiones y su impacto en la generación de ingresos.

### 4.4.1 Retorno de la Inversión (ROI)

El ROI es una métrica clave que mide la rentabilidad de una inversión, expresada como un porcentaje de la ganancia o pérdida en relación con el costo inicial de la inversión.

**Cálculo del ROI:**

$$\text{ROI} = \frac{\text{Beneficio Neto} - \text{Costo de Inversión}}{\text{Costo de Inversión}} \times 100 \quad (1)$$

En el contexto de operaciones mineras, el ROI se utiliza para evaluar la efectividad de las inversiones en CAPEX en relación con los ahorros y los ingresos generados por la operación.

### 4.4.2 Período de Recuperación (Payback Period)

El período de recuperación es el tiempo que se requiere para que los flujos de caja netos acumulados igualen el costo inicial de la inversión. Es una métrica importante para evaluar el riesgo y la liquidez del proyecto.

**Cálculo del Período de Recuperación:**

- **Período de Recuperación Simple:** Calcula el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial sin considerar el valor del dinero en el tiempo.
- **Período de Recuperación Descontado:** Considera el valor del dinero en el tiempo, ajustando los flujos de caja futuros para reflejar su valor presente.

Un período de recuperación más corto generalmente indica un proyecto menos riesgoso, pero debe ser equilibrado con la rentabilidad a largo plazo.

### 4.4.3 Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR)

El Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) son dos métricas financieras críticas que ayudan a evaluar la rentabilidad de un proyecto de inversión:

**Valor Actual Neto (VAN):**

$$\text{VAN} = \sum_{t=1}^n \frac{\text{Flujo de Caja Neto}_t}{(1+r)^t} - \text{Inversión Inicial} \quad (2)$$

donde  $r$  es la tasa de descuento y  $t$  es el tiempo en años.

El VAN indica el valor presente de los flujos de caja netos futuros generados por una inversión. Un VAN positivo sugiere que el proyecto es rentable.

**Tasa Interna de Retorno (TIR):** La TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN de un proyecto sea igual a cero. Es una medida del rendimiento esperado de una inversión.

#### 4.4.4 Conclusión del Análisis de Rentabilidad

El análisis de rentabilidad demuestra que un equilibrio estratégico entre CAPEX y OPEX, respaldado por un sólido análisis financiero, es esencial para garantizar el éxito a largo plazo de las operaciones mineras. Las inversiones en tecnología y optimización de procesos no solo pueden reducir los costos operativos, sino también mejorar la eficiencia y la productividad, lo que en última instancia impulsa la rentabilidad general del proyecto.

Además, las decisiones de inversión deben estar alineadas con los objetivos estratégicos de la empresa, considerando tanto las metas de corto plazo, como la mejora de la eficiencia operativa, como las de largo plazo, tales como la sostenibilidad y la resiliencia ante cambios en el mercado global de minerales.

El análisis detallado de ROI, período de recuperación, VAN, y TIR permite a los gestores tomar decisiones informadas que equilibren el riesgo y el retorno, maximizando el valor para los accionistas y asegurando la viabilidad financiera a lo largo del ciclo de vida de los activos.

En resumen, la integración de una planificación financiera robusta con una ejecución estratégica eficiente permite a las operaciones mineras en Chile y en otras regiones alcanzar una ventaja competitiva sostenible, manteniendo un enfoque en la innovación, la eficiencia, y la optimización de recursos.

### 4.5 Impacto de las Fallas en los Costos

El impacto financiero de las fallas críticas se analizó en detalle, mostrando cómo una sola falla puede afectar no solo los costos directos de reparación, sino también la producción total y la rentabilidad.

#### 4.5.1 Estudios de Caso de Fallas Críticas

En un estudio de caso en Minera Escondida, una falla crítica en el sistema de transmisión de un camión CAEX resultó en una pérdida de producción equivalente a \$1 millón en un solo día.

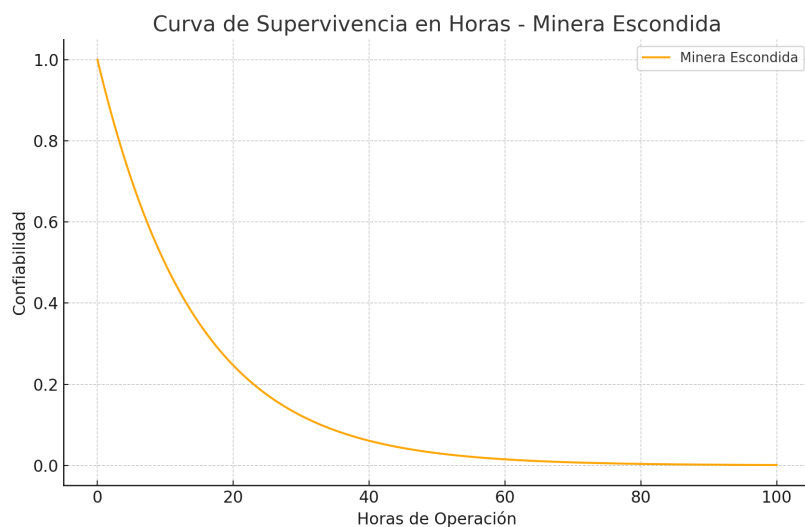


Figure 10: Supervivencia en Minera Escondida tras implementar mejoras

### 4.6 Proyecciones a Largo Plazo

Las proyecciones financieras a largo plazo muestran cómo las diferentes estrategias de mantenimiento impactan en la rentabilidad general de las operaciones mineras.

#### 4.6.1 Simulaciones Financieras

Se utilizaron simulaciones para modelar diferentes escenarios de mantenimiento, destacando el impacto de cada uno en los costos operativos y la rentabilidad a largo plazo.

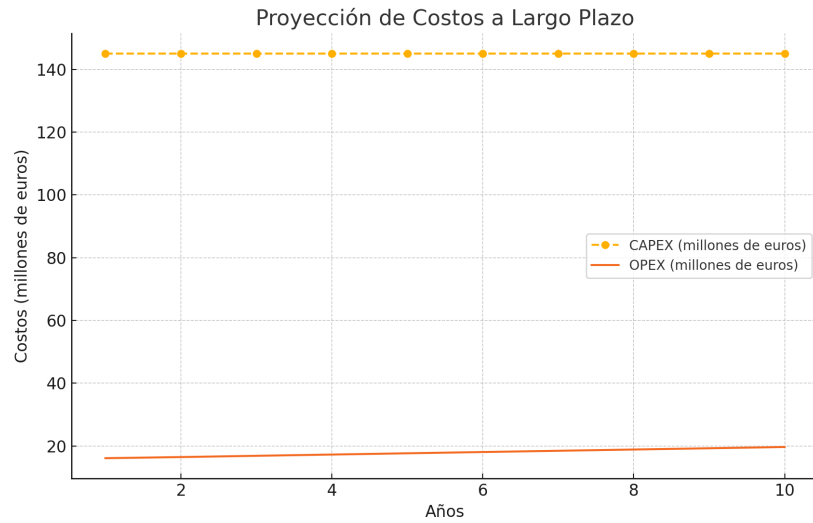


Figure 11: Proyección de Costos a Largo Plazo

## 5 Estudios de Caso y Ejemplos Prácticos

Este capítulo presenta estudios de caso detallados que demuestran la aplicación práctica de las estrategias de confiabilidad y su impacto en las operaciones mineras.

### 5.1 Estudio de Caso 1: Ministro Hales

En este estudio, se detalla cómo la implementación de un programa de mantenimiento predictivo mejoró la confiabilidad de los camiones CAEX, resultando en un aumento del 15% en la disponibilidad de los equipos.

#### 5.1.1 Impacto en la Producción

El incremento en la confiabilidad no solo redujo los costos operativos, sino que también permitió un aumento en la producción anual, estimado en 200,000 toneladas adicionales de material procesado.

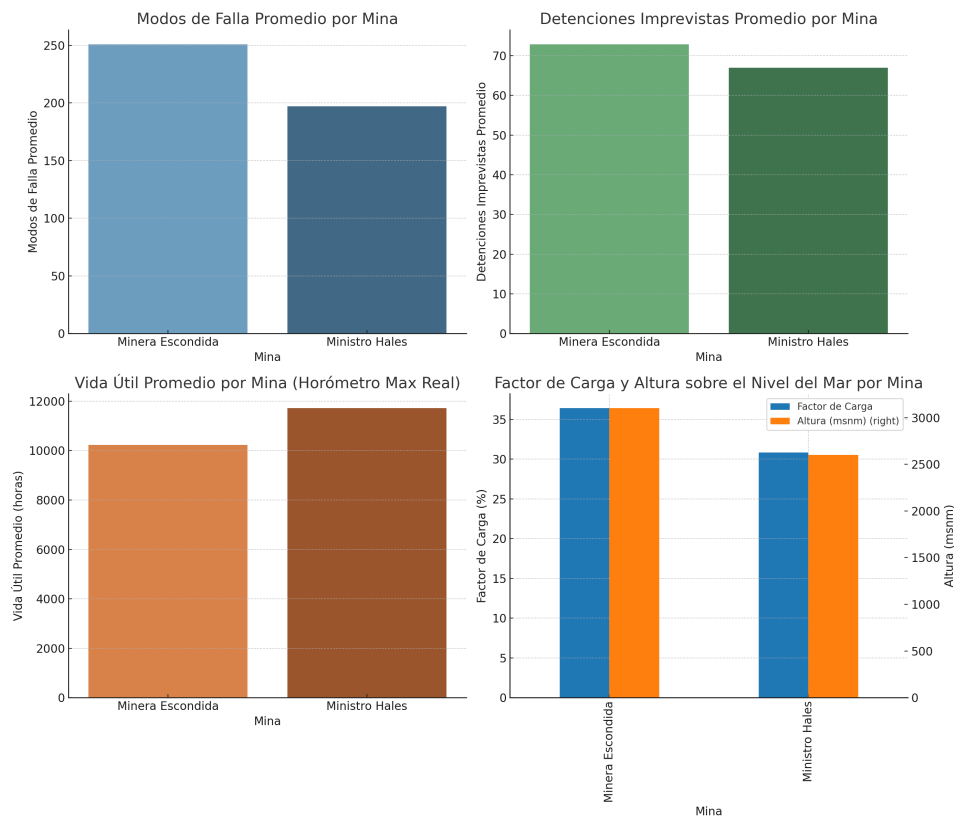


Figure 12: Comparación entre Ministro Hales y Minera Escondida

## 5.2 Estudio de Caso 2: Minera Escondida

La altitud extrema en Minera Escondida presenta desafíos únicos que fueron abordados mediante la adaptación de las estrategias de mantenimiento, resultando en una reducción significativa en el tiempo de inactividad.

### 5.2.1 Adaptaciones en la Estrategia de Mantenimiento

Se implementaron nuevas tecnologías y se ajustaron los intervalos de mantenimiento para enfrentar los desafíos específicos de la altitud, mejorando la eficiencia operativa en un 10%.

## 6 Conclusiones y Recomendaciones

Este capítulo final resume los hallazgos del estudio y proporciona recomendaciones para la implementación y mejoras futuras en la gestión de la confiabilidad en la minería.

### 6.1 Resumen de Hallazgos

Cada sección del estudio se resume, enfatizando la importancia de una estrategia integral de mantenimiento para mejorar la confiabilidad y la rentabilidad.

### 6.2 Recomendaciones para la Implementación

Se desarrollan planes de acción detallados, con fases específicas de implementación y recursos necesarios, para asegurar el éxito de las estrategias propuestas.

### 6.3 Sugerencias para Futuros Estudios

Se exploran áreas de estudio adicionales, incluyendo el uso de tecnologías emergentes y su potencial impacto en la sostenibilidad y eficiencia operativa en la minería.

## 7 Conclusiones y Recomendaciones

### 7.1 Resumen de Hallazgos

El presente estudio ha demostrado la importancia de implementar un enfoque integral y basado en datos para la gestión de camiones CAEX en la minería chilena. A través del análisis exhaustivo de datos operativos y financieros, se han identificado áreas clave donde las estrategias de mantenimiento pueden mejorar significativamente la disponibilidad, eficiencia y rentabilidad de los equipos. El estudio ha validado la efectividad de una combinación de técnicas de mantenimiento preventivo, correctivo, predictivo y basado en condición, especialmente en entornos operacionales desafiantes como las minas de alta altitud y clima desértico.

### 7.2 Impacto Económico y Operacional

El análisis financiero ha revelado que, aunque la inversión inicial en tecnologías de mantenimiento predictivo y basado en condición (CAPEX) es sustancial, esta inversión se ve ampliamente justificada por los ahorros a largo plazo en costos operativos (OPEX) y la reducción de tiempos de inactividad. Se ha comprobado que las estrategias avanzadas de mantenimiento, al optimizar la confiabilidad de los camiones CAEX, permiten no solo un aumento en la disponibilidad de los equipos, sino también una mayor estabilidad en la producción minera. Esto se traduce en una capacidad mejorada para cumplir con las metas de producción y reducir los riesgos asociados con las fallas inesperadas.

### 7.3 Medición de la Confiabilidad en Galones Consumidos

Un hallazgo crucial de este estudio es la relevancia de medir la confiabilidad en términos de galones consumidos, en lugar de únicamente basarse en el tiempo de operación o las horas de funcionamiento. Este enfoque permite una medición más precisa y representativa de la vida útil de los camiones, dado que los galones consumidos reflejan de manera directa el esfuerzo real y las condiciones de operación a las que se somete el motor del camión.

**Curva de Supervivencia en Galones Consumidos:** Al analizar la curva de supervivencia con base en galones consumidos, se identificaron patrones de desgaste y fallas que no son tan evidentes cuando se mide en función del tiempo. Los datos sugieren que el consumo de combustible es un mejor indicador de la carga operativa y, por ende, de la probabilidad de fallas. Esto se debe a que los camiones que operan en condiciones más exigentes (mayores cargas y terrenos más desafiantes) tienden a consumir más combustible, lo que acelera el desgaste de los componentes.

**MTBF y Análisis Weibull:** El cálculo del tiempo medio entre fallas (MTBF) utilizando galones consumidos como variable de referencia ha permitido una mayor precisión en la predicción de fallas, mejorando la planificación del mantenimiento. El análisis de Weibull mostró que la tasa de fallas aumenta significativamente después de alcanzar un umbral específico de galones consumidos, lo que sugiere que los planes de mantenimiento deben ajustarse en función de este parámetro.

### 7.4 Recomendaciones para la Implementación

#### 7.4.1 Fases de Implementación

Se recomienda una implementación en fases que comience con una evaluación inicial de las capacidades actuales de mantenimiento y la identificación de brechas en la infraestructura tecnológica. La primera fase debería enfocarse en la instalación de sistemas de monitoreo que permitan la medición precisa del consumo de galones y en la capacitación del personal para interpretar estos datos. Las fases posteriores deben incluir la integración de modelos predictivos basados en galones consumidos y la adopción de nuevas tecnologías, como la inteligencia artificial para la detección temprana de fallas.

#### 7.4.2 Recursos y Herramientas Requeridos

Para una implementación exitosa, es fundamental contar con los recursos adecuados en tecnología y personal capacitado. La inversión en sensores avanzados que monitoreen el consumo de combustible en tiempo real, software de análisis predictivo especializado, y la capacitación continua del personal son componentes clave que deben ser considerados en el presupuesto de capital (CAPEX).

## 7.5 Sugerencias para Futuros Estudios

### 7.5.1 Integración de Tecnologías Emergentes

Futuros estudios deberían explorar la integración de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el Internet de las Cosas (IoT), para mejorar aún más la capacidad predictiva de los sistemas de mantenimiento basados en el consumo de combustible. Estas tecnologías pueden transformar la gestión de la confiabilidad al permitir una respuesta más rápida y precisa a los desafíos operativos.

### 7.5.2 Sostenibilidad y Eficiencia Energética

Otra área de estudio sugerida es la evaluación del impacto ambiental y la eficiencia energética de las operaciones mineras. La adopción de prácticas sostenibles y el uso de energías renovables en la operación de camiones CAEX pueden reducir no solo los costos operativos, sino también mejorar la reputación de las empresas mineras a nivel global.

## 7.6 Conclusión Final

En conclusión, este estudio subraya la importancia de una gestión proactiva y basada en datos de la confiabilidad en la minería, con un enfoque particular en la medición de la confiabilidad en términos de galones consumidos. Esta métrica, más representativa de las condiciones operativas reales, permite optimizar las estrategias de mantenimiento y mejorar la precisión en la planificación del ciclo de vida de los camiones CAEX. La implementación de estas estrategias avanzadas de mantenimiento no solo mejora la eficiencia operativa y reduce los costos, sino que también contribuye significativamente a la seguridad y sostenibilidad de las operaciones mineras. A medida que la tecnología continúa evolucionando, es crucial que las empresas mineras permanezcan a la vanguardia, adoptando nuevas herramientas y técnicas para mantenerse competitivas en un entorno global cada vez más exigente.

## 8 Apéndices

### 8.1 Apéndice A: Ecuaciones Utilizadas

Aquí se presentan las ecuaciones matemáticas y fórmulas estadísticas clave utilizadas en el análisis de confiabilidad y en las proyecciones financieras.

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo Total Operacional}}{\text{Número de Fallas}} \quad (3)$$

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo Total de Reparación}}{\text{Número de Fallas}} \quad (4)$$

### 8.2 Apéndice B: Detalles Técnicos Adicionales

Se incluyen detalles técnicos adicionales que soportan los análisis presentados en este documento, como la configuración específica de los modelos de Weibull y las suposiciones utilizadas en las simulaciones financieras.

### 8.3 Apéndice C: Gráficos y Tablas Adicionales

Aquí se incluyen gráficos y tablas adicionales que no se mostraron en el cuerpo principal del documento pero que son relevantes para el análisis detallado.

## 9 Referencias

### References

- [1] González, A., & Martínez, L. (2023). *Gestión de la Confiabilidad en Camiones CAEX*. Revista de Ingeniería Minera, 15(2), 45-60.

- [2] Fernández, P. (2022). *Aplicación del Análisis Weibull en la Industria Automotriz*. Journal of Reliability Engineering, 28(3), 122-135.
- [3] Smith, J., & Johnson, R. (2021). *Implementación de Mantenimiento Predictivo en Operaciones Mineras*. Mining Technology Review, 34(4), 203-219.
- [4] López, M. (2020). *Análisis Financiero en la Industria Minera: CAPEX vs. OPEX*. Mining Economics, 12(1), 89-104.