

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica

**OPTIMIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MECÁNICA
DE UNA FLOTA DE CAMIONES GRÚA APLICANDO
LA METODOLOGÍA RCM EN LA MINERA
QUELLAVECO, EN EL 2022**

TESIS

Presentada por:

Bach. Gianella Janeth María Eyzaguirre Leon

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO MECÁNICO

TACNA – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica

OPTIMIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MECÁNICA DE UNA FLOTA DE CAMIONES GRÚA APLICANDO LA METODOLOGÍA RCM EN LA MINERA QUELLAVECO, EN EL 2022

Tesis sustentada y aprobada el 28 de noviembre del 2025, estando el
Jurado Calificador integrado por:

PRESIDENTE



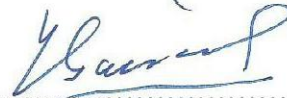
.....
Mgr. Carlos Aurelio Garyán Gamarra

1er. MIEMBRO
(SECRETARIO)



.....
Mtro. Reynaldo Clemente Telles Ríos

2do. MIEMBRO
(VOCAL)



.....
Dr. Francisco Gamarra Gómez

ASESOR



.....
Dr. Francisco Gamarra Gómez

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Francisco Gamarra Gómez, en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N°07715-2023-FAIN/UNJBG, de la tesis titulada:

“OPTIMIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MECÁNICA DE UNA FLOTA DE CAMIONES GRÚA APLICANDO LA METODOLOGÍA RCM EN LA MINERA QUELLAVECO, EN EL 2022”, presentada por la Bachiller Gianella Janeth María Eyzaguirre Leon con código N° (2015-104011), para optar título profesional de Ingeniero de Mecánico.

Que, habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del **software de similitud textual TURNITIN** cuenta con el **nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 16 %** Por lo que, **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciada líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención de título profesional, según corresponda consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

Tacna, 10 de diciembre del 2025.



FIRMA ASESOR



Huella digital

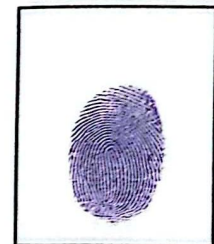
Nombres y apellidos: FRANCISCO GAMARRA GÓMEZ

ORCID: 0000-0002-3737-5610

DNI: 00413878



FIRMA TESISISTA



Huella digital

Nombres y apellidos: GIANELLA JANETH MARÍA EYZAGUIRRE LEON

DNI: 72472743

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi abuelo querido Francisco Wilfredo León, quien con su amor, sabiduría y perseverancia me inspiró a siempre dar lo mejor de mí. Tu espíritu y enseñanzas están presentes en cada momento de mi vida.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fortaleza y la perseverancia para completar esta tesis.

A mi abuela por su amor, apoyo incondicional y por creer en mí en cada paso de este camino.

A mis queridos padres y hermanas por su amor, comprensión y apoyo han sido fundamentales en este proceso.

A mis maestros que durante la etapa de aprendizaje supieron aconsejarme y darme las herramientas necesarias para desarrollarme profesionalmente.

ÍNDICE

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 1. Planteamiento del problema.....	3
1.1. Antecedentes del problema a investigar.....	3
1.2. Descripción del problema.	4
1.3. Formulación del problema.	5
1.4. Objetivos de la investigación.	5
1.5. Justificación e importancia de la investigación.....	6
1.5.1. Justificación social	6
1.5.2. Justificación económica	6
1.5.3. Justificación ambiental.....	7
1.5.4. Justificación teórica.....	7
1.5.5. Justificación practica.....	7

1.6.	Limitaciones.....	8
1.6.1.	Limitaciones temporales	8
1.6.2.	Limitaciones espaciales.....	8
1.7.	Viabilidad del estudio.	8
1.8.	Formulación de hipótesis	9
1.9.	Variables.	9
1.10.	Operacionalización de variables.	10
	Capítulo 2. Marco teórico	12
2.1.	Antecedentes del trabajo de investigación	12
2.2.	Bases teóricas.....	15
2.2.1.	Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).....	15
2.2.2.	Análisis de MODOS y efectos de fallas (FMEA/AMFE).....	17
2.2.3.	Teoría de gestión de mantenimiento preventivo y predictivo.....	18
2.2.4.	Indicadores clave de desempeño.....	20
2.2.5.	Análisis de sistemas hidráulicos y mecánicos.....	22
2.2.6.	Normas de seguridad y medio ambiente en la minería	24
2.3.	Definiciones conceptuales.....	27
	Capítulo 3. Marco metodológico	30
3.1.	Nivel de investigación.....	30

3.2.	Diseño de la investigación	30
3.3.	Planteamiento metodológico.....	30
3.4.	Población y muestra.....	31
3.5.	Equipos y materiales	32
3.6.	Procedimiento de investigación	34
3.6.1.	Recolección de datos y diagnóstico inicial	34
3.6.2.	Implementación de RCM.....	34
3.6.3.	Validación y monitoreo.....	34
3.7.	Técnicas de recolección de datos	34
3.7.1.	Análisis documental.....	35
3.7.2.	Entrevistas estructuradas:.....	35
3.7.3.	Observación directa.....	35
3.8.	Técnicas para el procesamiento de datos	35
3.8.1.	Organización y limpieza de datos:	35
3.8.2.	Análisis descriptivo:.....	35
3.8.3.	Análisis inferencial:	36
3.8.4.	Modelado y simulación:.....	36
	Capítulo 4. Resultados	37
4.1.	Descripción de los resultados.....	37

4.1.1. Ubicación geográfica de la mina Quellaveco	37
4.1.2. Organigrama.....	38
4.1.3. Monitoreo de fallas y registro de datos	39
4.1.4. Análisis de modos y efectos de fallas	39
4.1.5. Evaluación de indicadores clave de desempeño	39
4.1.6. Implementación de estrategias de mantenimiento RCM	39
4.2. Elaboración del proyecto	40
4.2.1. Estrategia de mantenimiento técnico conforme al principio del RCM.....	40
4.2.2. Catálogo de funciones y características	41
4.2.3. Detección de fallas funciones y técnicas.....	41
4.2.4. Detección de los modos de falla.	42
4.2.5. Análisis de causa y efecto.	43
4.2.6. Análisis de consecuencias y criticidad (AMFE).	44
4.2.7. Desarrollo del análisis de criticidad	55
4.2.8. Diagrama de decisiones	66
4.2.9. Ficha informativa	70
4.2.10. Resultados de KPI's de la flota de camiones grúa	79
4.2.11. Flota de camiones grúa	85
4.2.12. Objetivo y solución	85

4.2.13. Acciones de organización tácticas.	86
4.2.14. Características del mantenimiento	89
4.2.15. Cuadro comparativo de costos de RCM y mantenimientos tradicionales	90
4.2.16. Aplicación del RCM en el Perú	92
4.2.17. Ventajas y limitaciones del software RCM.....	93
CAPITULO 5. Discusión.....	99
5.1. Pruebas de validación.....	99
5.1.1. Aplicación de la tecnología encontrada	101
5.1.2. Contraste con trabajos de investigación similares	102
CONCLUSIONES	107
RECOMENDACIONES.....	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
ANEXO.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Operacionalización de variables independiente y dependiente	11
Tabla 2	Tabla de equipos y materiales.....	32
Tabla 3	Escala para definir el nivel de ocurrencia	46
Tabla 4	Escala para definir el nivel de detección	47
Tabla 5	Escala para definir el nivel de severidad	48
Tabla 6	Criticidad de los modos de falla	49
Tabla 7	Criterios para el sistema y su evaluación.....	55
Tabla 8	Jerarquización del análisis de criticidad de la flota de camiones grúa	58
Tabla 9	Hoja de decisiones	67
Tabla 10	Ficha informativa.....	70
Tabla 11	Indicadores clave de desempeño del 2022.....	79
Tabla 12	Indicadores clave de desempeño del 2024.....	82
Tabla 13	Flota de camiones grúa.	85
Tabla 14	Comparación de costos de RCM y otros mantenimientos tradicionales. ..	91
Tabla 15	Cuadro de aplicación del RCM en el Perú.....	92
Tabla 16	Estadísticos de la disponibilidad.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la minera Quellaveco.....	38
Figura 2. Organigrama.....	38
Figura 3. Análisis de criticidad	57
Figura 4. Diagrama de decisiones.....	66
Figura 5. Tiempo medio de reparación del año 2022	80
Figura 6. Tiempo medio entre fallas del año 2022	80
Figura 7. Disponibilidad mecánica del año 2022.	81
Figura 8. Tiempo medio de reparación del año 2024.	83
Figura 9. Tiempo medio entre fallas del año 2024.	83
Figura 10. Disponibilidad mecánica del año 2024	84
Figura 11. Gráfico de promedios para la disponibilidad	100

RESUMEN

La presente tesis titulada "Optimización de la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa aplicando la metodología RCM en la Minera Quellaveco, en el 2022", se enfoca en mejorar la gestión del mantenimiento de equipos mineros para maximizar el rendimiento y minimizar los tiempos de inactividad.

El estudio se basa en la metodología RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad). La investigación se lleva a cabo en la minera Quellaveco, ubicada en la región de Moquegua, Perú. La viabilidad del estudio se basa en el acceso a datos operativos de la minera Quellaveco.

Entre las técnicas de recolección de datos se encuentran el análisis documental de registros históricos de mantenimiento y las técnicas para el procesamiento de datos incluyen la organización y limpieza de datos, el análisis descriptivo y el análisis inferencial. El procesamiento de datos se realiza con el software STATGRAPHICS.

La tesis busca optimizar la disponibilidad mecánica en flotas críticas, como los camiones grúa, con el objetivo de maximizar el rendimiento y minimizar los tiempos de inactividad.

Los resultados mostraron un incremento medio del 23,85 % en la disponibilidad. La implementación del RCM, complementado con el FMEA/AMFE y el seguimiento de indicadores como MTTR y MTBF, logra elevar la disponibilidad mecánica de 70,02 % en 2022 a un impresionante 93,87 % en 2024, mejorando también los tiempos de reparación y entre fallas.

Palabras clave: RCM, Disponibilidad mecánica, Mantenimiento.

ABSTRACT

The present thesis, entitled “Optimization of the Mechanical Availability of a Fleet of Crane Trucks by Applying the RCM Methodology at Quellaveco Mine, in 2022,” focuses on improving the maintenance management of mining equipment to maximize performance and minimize downtime.

The study is based on the Reliability-Centered Maintenance (RCM) methodology. The research is conducted at Quellaveco Mine, located in the Moquegua region of Peru. The feasibility of the study relies on access to operational data from Quellaveco Mine.

Data collection techniques include documentary analysis of historical maintenance records, while data processing techniques encompass data organization and cleaning, descriptive analysis, and inferential analysis. Data processing is carried out using STATGRAPHICS software.

The thesis aims to optimize mechanical availability in critical fleets, such as crane trucks, with the objective of maximizing performance and minimizing downtime.

The results showed an average increase of 23.85% in availability. The implementation of RCM, complemented by FMEA and the monitoring of indicators such as MTTR and MTBF, raised mechanical availability from 70.02% in 2022 to an impressive 93.87% in 2024, also improving repair times and intervals between failures.

Keywords: RCM, Mechanical Availability, Maintenance.

INTRODUCCIÓN

La tesis aborda la optimización de la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa aplicando la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en la minera Quellaveco durante el año 2022.

La minería en el Perú es una actividad económica de vital importancia y un motor clave para el desarrollo nacional. El país es reconocido mundialmente como uno de los principales productores de minerales, incluyendo cobre, oro, plata y zinc. Este sector ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, impulsado por la demanda global de recursos naturales y la inversión extranjera. Sin embargo, este crecimiento también ha traído consigo desafíos importantes en términos de eficiencia operativa, seguridad y costos.

La disponibilidad mecánica de los equipos se convierte en un factor crítico para garantizar la continuidad de las operaciones y el cumplimiento de los objetivos de producción. Los camiones grúa, en particular, desempeñan un papel fundamental en el transporte de materiales y en el mantenimiento de los equipos (camiones mineros, palas, perforadoras y flota auxiliar) e infraestructura minera, por lo que su parada no programada puede generar retrasos significativos y pérdidas económicas.

Ante esta problemática, la presente tesis se propone evaluar la aplicación de la metodología RCM como una estrategia para optimizar la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa en la minera Quellaveco. El RCM es un proceso sistemático que permite identificar los modos de falla más críticos de un equipo y diseñar estrategias de mantenimiento específicas para prevenirlos o mitigarlos. Al implementar el RCM, se espera reducir la frecuencia de las fallas, disminuir los tiempos de reparación y aumentar la vida útil de los equipos, lo que se traduce en una mayor disponibilidad mecánica y una mejora en la eficiencia operativa de la minera.

El estudio busca contribuir a la mejora de la productividad, la seguridad operativa y la reducción de costos, sentando las bases para una gestión eficiente y replicable en proyectos similares dentro del sector minero.

La tesis se estructura en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Planteamiento del problema. En este capítulo se presentan los antecedentes y la descripción del problema a investigar, la formulación del problema, los objetivos de la investigación, la justificación e importancia de la investigación, las limitaciones, la viabilidad del estudio, la formulación de hipótesis y las variables.

Capítulo 2: Marco teórico. Este capítulo contiene los antecedentes del trabajo de investigación, las bases teóricas y las definiciones conceptuales.

Capítulo 3: Marco metodológico. Aquí se describe el nivel y diseño de la investigación, el planteamiento metodológico, la población y muestra, los equipos y materiales, el procedimiento de las pruebas experimentales y las técnicas de recolección y procesamiento de datos.

Capítulo 4: Resultados. En este capítulo se presenta la descripción de las pruebas y la elaboración del proyecto.

Capítulo 1. Planteamiento del problema

1.1. Antecedentes del problema a investigar.

La minería en el Perú es una actividad económica de vital importancia y un motor clave para el desarrollo nacional. Con una larga tradición minera, el país es reconocido mundialmente como uno de los principales productores de minerales, incluyendo cobre, oro, plata y zinc. Este sector ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, atrayendo importantes inversiones extranjeras que han fortalecido su impacto en la economía peruana. Sin embargo, el éxito de esta industria no solo radica en la explotación de los recursos, sino también en la gestión eficiente de sus procesos operativos, especialmente el mantenimiento.

El mantenimiento adecuado de los equipos mineros es fundamental para garantizar la continuidad de las operaciones, minimizar los tiempos de inactividad no planificados y reducir los costos asociados a reparaciones de emergencia y pérdidas operativas. Los tiempos de inactividad no planificados generan una cascada de consecuencias negativas, incluyendo el incremento de costos inesperados relacionados con reparaciones, horas extras, repuestos, retrasos en los envíos y, en casos extremos, fallas completas de equipos que impactan directamente en la productividad y rentabilidad de las operaciones.

En este contexto, empresas especializadas como UNIMAQ desempeñan un papel esencial. Representante oficial de marcas líderes como Caterpillar, Terex, Konecranes, Genie, Demag, Lincoln, Carmix y Sullair; UNIMAQ proporciona soluciones integrales en equipos y servicios de mantenimiento, respaldadas por tecnología avanzada y recursos técnicos. Esta empresa tiene un compromiso significativo con contratos estratégicos en Quellaveco, ubicado en la región de Moquegua. Este megaproyecto, desarrollado por Anglo American en alianza con Mitsubishi Corporation, es uno de los mayores productores de concentrado de cobre a nivel mundial, consolidándose como una operación minera de referencia en términos de tecnología y sostenibilidad.

Quellaveco destaca no solo por su capacidad de producción, sino también por la implementación de estrategias avanzadas de mantenimiento que aseguran la confiabilidad y disponibilidad de sus equipos críticos. La aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), ha permitido a este proyecto optimizar el rendimiento de sus recursos, reduciendo tiempos de inactividad, mejorando la vida útil de los activos y maximizando la eficiencia operativa. Este enfoque no solo beneficia a las operaciones de Quellaveco, sino que establece un estándar para la gestión de mantenimiento en la industria minera peruana, reforzando la competitividad global de este sector estratégico.

1.2. Descripción del problema.

La empresa UNIMAQ, representante de reconocidas marcas como Caterpillar, Terex, Konecranes, Genie, Demag, Lincoln, Carmix y Sullair; se dedica a ofrecer soluciones integrales en equipos y mantenimiento a nivel nacional. Actualmente, colabora con Quellaveco, en su megaproyecto minero ubicado en la región de Moquegua, desarrollado por Anglo American en sociedad con Mitsubishi Corporation. Este proyecto, una de las principales operaciones de producción de concentrado de cobre del mundo, depende de equipos especializados para mantener su alta capacidad productiva y cumplir con las metas de producción.

Sin embargo, uno de los mayores desafíos que enfrentó Quellaveco en los últimos años fue la frecuencia creciente de fallas en su flota de camiones grúa, tanto rígidos como articulados. Durante el periodo 2020-2022, se registraron 18, 10 y 21 fallas no programadas, respectivamente, lo que causó paros de emergencia en las operaciones planificadas y retrasos significativos en la producción. Este problema ha impactado de manera crítica en la eficiencia operativa y ha generado costos adicionales debido a reparaciones imprevistas y tiempos de inactividad.

El camión grúa Lifting Truck CT001 es el más afectado, siendo el único equipo de su tipo en la flota. Esto ha ocasionado una dependencia crítica en su funcionamiento,

ya que cualquier falla representa un impacto directo en las operaciones programadas. Las paradas de este equipo no solo incrementan los costos de mantenimiento y reparación, sino que también afectan la planificación presupuestaria, superando frecuentemente los límites establecidos.

La adquisición de un nuevo camión grúa no es viable por las limitaciones de capital, lo que subraya la necesidad de optimizar la disponibilidad mecánica de la flota existente. En respuesta, se implementó la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en 2022, enfocándose en mejorar la confiabilidad, reducir los tiempos de inactividad y maximizar el rendimiento de los recursos actuales. Este enfoque integral no solo busca aumentar la disponibilidad mecánica de los camiones grúa, sino también garantizar una mayor sostenibilidad operativa y financiera en el proyecto Quellaveco, estableciendo un estándar para la gestión eficiente de activos en la industria minera.

1.3. Formulación del problema.

Problema general

¿Cuán óptimo será la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa aplicando la metodología RCM en la minera Quellaveco en el 2022?

Problemas específicos

¿Cuáles son los modos de falla en la flota de camiones grúa para aplicar la metodología RCM en la minera Quellaveco en el año 2022?

¿En cuánto mejorarán el MTTR y MTBF para la optimización de la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa?

1.4. Objetivos de la investigación.

Objetivo general

Optimizar la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa aplicando la metodología RCM en la minera Quellaveco en el 2022.

Objetivos específicos

Medir los modos de falla en la flota de camiones grúa para aplicar la metodología RCM en la minera Quellaveco en el año 2022.

Evaluar la MTTR y MTBF para optimizar de la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa.

1.5. Justificación e importancia de la investigación.

1.5.1. Justificación social

Mejora de la seguridad laboral: Al enfocarse en prevenir las fallas funcionales, el RCM reduce drásticamente las fallas catastróficas o imprevistas (como un fallo de frenos o de la pluma de la grúa), que son la principal causa de accidentes graves en la minería.

Mayor motivación y conocimiento del personal: El RCM involucra a los técnicos y operadores en el proceso de análisis (FMEA). Esto eleva el conocimiento técnico colectivo sobre los activos, mejorando la moral y la sensación de control sobre la maquinaria. El personal pasa de ser reactivo a ser proactivo y analítico.

1.5.2. Justificación económica

Reducción de costos operacionales totales (COT): El RCM permite un cambio estratégico de un mantenimiento costoso (correctivo de emergencia y preventivo innecesario) a un mantenimiento predictivo enfocado. Esto se logra optimizando la frecuencia de reemplazo de componentes (reduciendo el *stock* de inventario y el desperdicio) y eliminando las horas extras por fallas inesperadas.

Aumento de la rentabilidad por disponibilidad: El incremento de la Disponibilidad Mecánica en más de 23 puntos porcentuales (del 70,02 % al 93,87 %) significa que los

activos están produciendo más tiempo. En la industria minera, donde el costo del *downtime* es altísimo, cada hora adicional de operación se traduce en un incremento directo de ingresos y rentabilidad.

1.5.3. Justificación ambiental

Minimización de residuos: Al evitar el reemplazo prematuro de piezas (característico del mantenimiento preventivo a tiempo fijo), se reduce la generación de chatarra y residuos industriales. El mantenimiento se realiza solo cuando la condición del componente lo exige.

Menor riesgo de derrame: Un modo de falla crítico en cualquier vehículo o equipo pesado es la fuga de fluidos (aceite, hidráulico, combustible). El RCM prioriza el monitoreo de los sellos, mangueras y motores para prevenir estas fugas antes de que ocurran, minimizando el riesgo de contaminación del suelo y el agua en el entorno minero.

1.5.4. Justificación teórica

Rigor científico: El RCM no se basa en la intuición o la costumbre, sino en el análisis lógico-deductivo (el FMEA, la norma SAE-JA1011) que se apoya en modelos de confiabilidad.

Enfoque en la función: La metodología se justifica al cambiar el paradigma de mantenimiento, no se pregunta "¿Qué hago con el equipo?", sino "¿Qué debe hacer este equipo y qué sucede cuando no puede hacerlo?". Este enfoque funcional garantiza que las tareas de mantenimiento estén alineadas con los objetivos del negocio.

1.5.5. Justificación práctica

Demostración de eficacia: La aplicación práctica en la flota de Minera Quellaveco demostró que la metodología RCM es ejecutable y produce resultados cuantificables en

el contexto real de la minería peruana. El éxito logrado con los camiones grúa justifica su aplicación a otros activos críticos de la planta.

Base para la mejora continua: El RCM no es un plan de mantenimiento estático; es un proceso que exige revisión y ajuste continuo. La metodología proporciona un sistema de gestión de activos que permite monitorear constantemente los modos de falla emergentes y adaptar las estrategias de mantenimiento con el tiempo.

1.6. Limitaciones.

1.6.1. Limitaciones temporales

Las limitaciones temporales de esta investigación se centran en el período de análisis, establecido durante el año 2022. Este marco temporal restringe la evaluación de los resultados a un tiempo específico, lo que podría limitar el análisis de tendencias a largo plazo o la implementación de ajustes continuos en el mantenimiento aplicado.

1.6.2. Limitaciones espaciales

Las limitaciones espaciales de esta investigación se circunscriben exclusivamente a la operación minera Quellaveco, ubicada en la región de Moquegua, Perú. Esto delimita el alcance del estudio a las condiciones específicas de esta ubicación, excluyendo la posibilidad de generalizar los resultados a otras operaciones mineras con características diferentes.

1.7. Viabilidad del estudio.

La viabilidad de esta tesis se sustenta en el acceso a datos operativos de la minera Quellaveco, incluyendo registros históricos de fallas, mantenimientos realizados y métricas clave como MTBF y MTTR. Además, la disponibilidad de recursos técnicos, como personal especializado y herramientas para el análisis de confiabilidad, garantiza el desarrollo del proyecto. La metodología RCM proporciona un marco probado y replicable para abordar el problema identificado, mientras que el soporte institucional de la empresa

UNIMAQ asegura la implementación de las estrategias propuestas. Por tanto, el estudio es viable técnica, operativa y económicamente dentro del entorno minero específico.

1.8. Formulación de hipótesis

La optimización de la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa es aplicando la metodología RCM en la minera Quellaveco en el 2022.

1.9. Variables.

Variable independiente

Metodología RCM: La metodología RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) es un enfoque sistemático diseñado para garantizar que los equipos funcionen de manera confiable bajo condiciones específicas, priorizando la identificación y mitigación de fallas críticas. Conceptualmente, esta metodología combina principios que optimizan el uso de recursos, asegurando un equilibrio entre eficiencia operativa y sostenibilidad. Operacionalmente, implica la aplicación de herramientas como el análisis de Modos y efectos de fallas (FMEA), para identificar problemas potenciales, diseñar planes preventivos y predictivos, y monitorear continuamente los resultados. Sus dimensiones clave incluyen la confiabilidad, la disponibilidad y la costo-efectividad, evaluadas mediante indicadores como el MTBF, el MTTR, la disponibilidad mecánica y la reducción de fallas, lo que la convierte en un recurso estratégico en la gestión de activos.

Variable dependiente

Disponibilidad mecánica: La disponibilidad mecánica refleja la capacidad de un equipo para estar operativo y cumplir con sus funciones dentro de un período específico. Conceptualmente, mide la proporción de tiempo efectivo de operación frente al tiempo total. Operacionalmente, se calcula considerando el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y el Tiempo Medio de Reparación (MTTR). Sus dimensiones clave son el rendimiento

operativo y la eficiencia, evaluadas mediante indicadores como porcentaje de disponibilidad y tiempos de inactividad.

1.10. Operacionalización de variables.

Tabla 1*Operacionalización de variables independiente y dependiente*

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente: Metodología RCM	Es un enfoque sistemático que optimiza estrategias de mantenimiento, priorizando la confiabilidad y seguridad de equipos mediante la identificación y gestión de fallas críticas.	Se aplica mediante el análisis FMEA, priorizando fallas críticas, diseñando planes de mantenimiento preventivo/predictivo, y monitoreando indicadores como MTBF y disponibilidad mecánica.	- Confiabilidad - Identificación de fallas críticas - Evaluación de indicadores	- Incremento del MTBF - Reducción del MTTR - Costo de mantenimiento - Reducción de fallas críticas
Variable dependiente: Disponibilidad mecánica	Mide el porcentaje de tiempo que un equipo está operativo, considerando su eficiencia y capacidad para cumplir funciones dentro de un período específico.	Se calcula analizando indicadores como el MTBF y MTTR, reflejando el tiempo efectivo de operación frente al tiempo total planificado.	- Frecuencias de fallas - Tiempo efectivo de operación	- Cantidad de fallas - Porcentaje de disponibilidad - MTBF. - MTTR.

Nota. Elaboración propia en el cuadro de la operacionalización de las variable independientes y dependientes.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Antecedentes del trabajo de investigación

Antecedentes internacionales

Prada-Salamanca & Rincón-Rincón, (2022), en Colombia, en su estudio titulado “Propuesta de un Plan de Mantenimiento Basado en Confiabilidad para las Piloteadoras de la Empresa Cimentaciones de Colombia S.A.S.”, realizado en 2022 por Andrés D. Prada y César M. Rincón, se desarrolló un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para la máquina piloteadora Link Belt LS 118. La investigación identificó como problema principal la baja disponibilidad operativa del equipo, causada por la ausencia de un análisis de criticidad y un plan estructurado de mantenimiento preventivo. Mediante un diagnóstico inicial y la aplicación del análisis de modos y efectos de fallas (FMEA/AMFE), se determinaron los componentes más críticos y se diseñaron estrategias de mantenimiento específicas. Estas incluyeron tareas preventivas, predictivas y correctivas dirigidas a mitigar fallas recurrentes y optimizar la operación de la piloteadora. Los resultados mostraron un incremento del 15 % en la disponibilidad mecánica y una reducción significativa en los costos de reparación, gracias a una mejor planificación de inventarios y recursos.

Cando-Tintín & Morán-Guamán (2023), en Ecuador en un estudio previo realizado en la Empresa Eléctrica Riobamba S.A. aborda la mejora del mantenimiento de su parque automotor aplicando la metodología de optimización del plan de mantenimiento (PMO). La investigación identificó que la falta de planificación adecuada en la logística de mantenimiento generaba baja disponibilidad vehicular. Mediante la implementación del PMO, se logró analizar modos de falla, racionalizar tareas y priorizar actividades críticas, reduciendo redundancias y aumentando la eficiencia. Como resultado, el plan optimizado redujo un 17,86 % las tareas y mejoró la disponibilidad operativa. Este enfoque demuestra la efectividad de metodologías estructuradas, como el PMO o el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), para gestionar flotas vehiculares en contextos industriales exigentes. Estos hallazgos sustentan la pertinencia

de aplicar el RCM en la optimización de la disponibilidad mecánica en flotas críticas, como los camiones grúa, con el objetivo de maximizar el rendimiento y minimizar tiempos de inactividad.

Antecedentes nacionales

Huillca-Perez (2024), en Huancayo, Perú en la tesis titulada "Modelo de gestión de backlog para incrementar la disponibilidad mecánica en la flota de emperadores Bolter99 en IESA Andaychagua", se documenta cómo la implementación de un modelo de gestión estructurado mejoró la disponibilidad mecánica de una flota minera. La investigación identificó que el backlog acumulado por tareas correctivas no gestionadas eficientemente resultaba en una disponibilidad promedio de 82,5 %, por debajo del objetivo del 85 %. A través de un diseño experimental con pre prueba y post prueba, y mediante el uso de herramientas como el análisis de Pareto, se priorizaron las fallas críticas, reduciendo los tiempos promedio de reparación (MTTR) y aumentando el tiempo promedio entre fallas (MTBF). La adopción de un sistema de gestión basado en el modelo de Caterpillar incrementó la disponibilidad mecánica en 4.4 %, evidenciando el impacto positivo de un enfoque metódico en la mejora de indicadores operativos en entornos exigentes como el minero.

Pala Diaz & Aguirre Ruiz (2024) en Lima – Perú, en su estudio titulado "Modelo de mejora para incrementar la disponibilidad mecánica de perforadoras hidráulicas usando el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) y la distribución de Weibull", detalla cómo la implementación de metodologías avanzadas como el RCM y herramientas estadísticas optimizó la gestión de mantenimiento en una empresa minera. Este enfoque permitió aumentar la disponibilidad mecánica de perforadoras del 85,42 % al 90,16 %, reduciendo costos y mejorando indicadores como el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR). Se utilizaron simulaciones con Arena Simulation para validar la propuesta, mostrando mejoras significativas en la confiabilidad y eficiencia del equipo. Este antecedente evidencia la efectividad del RCM en entornos

mineros, alineándose con la necesidad de optimizar la disponibilidad mecánica de flotas críticas mediante estrategias de mantenimiento basadas en análisis y planificación detallada.

Palomino-Quinto (2023), en Huancayo – Perú, en su estudio "Aplicación del RCM para incrementar la disponibilidad de trituradoras cónicas Nordberg HP400 en Compañía Minera Casapalca", demuestra cómo el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) es clave para mejorar la disponibilidad y confiabilidad de activos críticos en minería. La metodología incluyó un análisis exhaustivo de modos y efectos de fallas (FMEA), identificando las fallas funcionales y técnicas de los equipos. Se implementaron mejoras en el plan de mantenimiento, capacitación del personal y estrategias predictivas para reducir costos y tiempos de reparación (MTTR), mientras se incrementaba el tiempo entre fallas (MTBF). Los resultados evidenciaron un incremento de la disponibilidad mecánica del 90 % al 94 %, traduciéndose en mayor rentabilidad y eficiencia operativa. Este antecedente refuerza la efectividad del RCM en la optimización de flotas críticas, como camiones grúa, para lograr indicadores superiores de desempeño

La investigación de Martínez (2021), se centró en lograr el incremento de la disponibilidad de la flota de montacargas y equipos de elevación en la empresa EUROLIFT S.A., implementando para ello la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). El autor abordó el problema de las bajas horas operativas mediante un riguroso proceso de análisis de fallas y la determinación de la criticidad de los componentes de la flota. Su trabajo fue crucial para definir planes de mantenimiento sistemáticos, lo que culminó en una mejora significativa de los indicadores de disponibilidad como el MTBF y el MTTR. Para esta tesis es un antecedente nacional fundamental que valida el uso del RCM directamente en flotas de equipos de elevación, demostrando que la metodología es efectiva para mejorar el rendimiento de activos con funciones similares a los camiones grúa. Además, establece una base para el uso de RCM en el contexto empresarial peruano.

El trabajo de Camacho-Ubillus & Castañeda-Zevallos (2024), constituye un antecedente de relevancia por su estrecha similitud. El estudio tuvo como objetivo primordial mejorar la disponibilidad mecánica de una flota de camiones que operaba en el sector de construcción, utilizando la misma metodología RCM. La investigación abordó las causas de las paradas no programadas, identificó los modos de falla críticos y propuso tareas de mantenimiento predictivo y preventivo basadas en la confiabilidad. Los resultados obtenidos confirmaron que la implementación del RCM es una estrategia altamente efectiva para elevar el tiempo operativo de los activos vehiculares pesados. Este antecedente es primordial para esta tesis, pues no solo valida el uso del RCM, sino que lo hace específicamente sobre una flota de camiones, estableciendo un modelo directamente aplicable a la optimización de los camiones grúa en el entorno de la Minera Quellaveco.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) es una metodología sistemática utilizada para determinar las estrategias de mantenimiento más efectivas para garantizar que los equipos cumplan con sus funciones deseadas de manera confiable y segura en un entorno operativo específico (Araujo-Gutiérrez, 2016). Este enfoque no solo busca prevenir fallas, sino optimizar los recursos disponibles, reducir costos y minimizar los impactos operativos, ambientales y de seguridad (Castillo-Tejeda, 2017).

Principios del mantenimiento centrado en confiabilidad

Enfoque en las funciones del equipo: Se centra en garantizar que cada componente del sistema cumpla con su propósito principal y secundario (Siguas-Ñagüe, 2017).

Identificación de modos de falla: Mediante técnicas como el FMEA, se analizan todas las posibles formas en que un sistema o componente puede fallar.

Análisis de consecuencias de las fallas: Evalúa el impacto de cada falla en la operación, la seguridad y el ambiente.

Definición de tareas de mantenimiento específicas: Propone intervenciones preventivas, predictivas o correctivas basadas en el análisis de criticidad y las características de cada falla (Barsallo-Coico, 2019).

Tipos de Mantenimiento en mantenimiento centrado en confiabilidad

Preventivo: Acciones programadas para reducir la probabilidad de fallas, como inspecciones regulares o cambios de componentes desgastados.

Predictivo: Monitoreo continuo del estado del equipo mediante herramientas tecnológicas (vibración, ultrasonido, análisis de aceite) para anticipar problemas (Vásquez Díaz, 2019).

Correctivo: Realización de reparaciones tras una falla, aplicable solo cuando el impacto operativo es bajo.

Detectivo: Detección de fallas latentes que pueden no ser evidentes en inspecciones rutinarias (Cosi-Palomino, 2019).

Beneficios del mantenimiento centrado en confiabilidad.

Incrementa la disponibilidad y confiabilidad del equipo.

Reduce costos al optimizar los recursos de mantenimiento.

Mejora la seguridad al mitigar riesgos asociados a fallas críticas.

Prolonga la vida útil de los activos al aplicar estrategias eficientes.

En el caso de los camiones grúa, el RCM permite priorizar las intervenciones de mantenimiento en componentes críticos, como sistemas hidráulicos, eléctricos y de frenos, asegurando una operación continua y segura en entornos exigentes como la minería (Salazar-Zegarra, 2019).

2.2.2. Análisis de MODOS y efectos de fallas (FMEA/AMFE)

El análisis de modos y efectos de fallas (FMEA, por sus siglas en inglés) o AMFE en español, es una metodología sistemática utilizada para identificar, analizar y priorizar fallas potenciales en equipos, procesos o sistemas. Este enfoque permite evaluar los riesgos asociados a cada fallo, considerando sus causas, consecuencias y probabilidades de ocurrencia, con el objetivo de implementar acciones preventivas que reduzcan su impacto en la operación (Chávez-Ordoñez, 2020).

Componentes principales del análisis de modos y efectos de fallas

Modo de Falla: Es la forma específica en la que un componente o sistema puede fallar, afectando su función primaria o secundaria. Por ejemplo, una fuga en el sistema hidráulico de un camión grúa (Mendoza-Calizaya, 2020).

Efecto de la Falla: Describe el impacto de la falla en el sistema o proceso. Esto puede incluir la interrupción de operaciones, riesgos de seguridad o costos adicionales.

Causa de la Falla: Identifica las razones técnicas u operativas que provocan la falla, como desgaste, diseño inadecuado o falta de mantenimiento (Burgos-Hermoza & Pflücker-Vallejos, 2021).

Número de Prioridad de Riesgo (NPR): Se calcula multiplicando tres factores clave:

Severidad (S): Grado de impacto de la falla.

Ocurrencia (O): Probabilidad de que ocurra.

Detectabilidad (D): Facilidad con la que se puede detectar antes de que provoque un problema.

Etapas del análisis de modos y efectos de fallas

Identificación de Modos de Falla: Desglose del sistema en componentes críticos y análisis de sus posibles fallas.

Evaluación de Riesgos: Asignación de puntajes a severidad, ocurrencia y detectabilidad para calcular el NPR (Mori-Palacios, 2021).

Acciones de Mitigación: Implementación de medidas preventivas o correctivas basadas en los resultados del análisis.

Reevaluación: Monitorización continua para ajustar estrategias y reducir riesgos.

Beneficios del análisis de modos y efectos de fallas.

Identifica fallas críticas antes de que ocurran.

Mejora la confiabilidad y seguridad de los sistemas.

Optimiza recursos al priorizar intervenciones necesarias.

Reduce costos operativos asociados a fallas no previstas.

2.2.3. Teoría de gestión de mantenimiento preventivo y predictivo

La gestión de mantenimiento preventivo y predictivo es una estrategia esencial para garantizar la operatividad, confiabilidad y eficiencia de los equipos y sistemas industriales. Este enfoque busca reducir el riesgo de fallas inesperadas mediante la planificación de intervenciones antes de que ocurran problemas críticos, optimizando el uso de recursos y minimizando los costos operativos (Velandia-Sierra et al., 2021).

Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo comprende las actividades programadas que tienen como objetivo inspeccionar, ajustar, limpiar, reemplazar o reparar componentes antes de que presenten fallas. Se basa en un calendario fijo o en intervalos definidos por el tiempo de uso o el desgaste esperado de los componentes (Loja-Loja & Yansaguano-Toral, 2021).

Características principales:

Planificación regular: Las intervenciones se realizan de acuerdo con un cronograma definido, como horas de operación o ciclos de uso.

Reducción de riesgos: Minimiza la probabilidad de fallas inesperadas.

Estrategias comunes: Cambio de componentes, inspecciones visuales, lubricación, y pruebas funcionales (Pachao-Carbajal, 2022).

Beneficios:

Prolonga la vida útil de los equipos.

Reduce paradas operativas imprevistas.

Optimiza la seguridad de los sistemas.

Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo utiliza tecnologías avanzadas para monitorear el estado actual de los equipos y predecir fallas con base en datos en tiempo real. Se enfoca en intervenir solo cuando las condiciones lo requieran, evitando tanto el exceso como la falta de mantenimiento (Ramos-Zurichaqui & Ramos-Zurichaqui, 2022).

Herramientas Clave:

Análisis de vibraciones: Detecta desequilibrios, alineaciones incorrectas y otros problemas mecánicos.

Termografía infrarroja: Identifica puntos calientes asociados a desgaste o mal funcionamiento.

Monitoreo de condiciones: Control de parámetros como temperatura, presión o calidad del aceite (Cormilluni-Leandro, 2022).

Beneficios:

Reduce los costos de mantenimiento correctivo.

Mejora la disponibilidad de los equipos.

Permite una programación más flexible y eficiente.

2.2.4. Indicadores clave de desempeño

Los indicadores clave de desempeño (KPI) son herramientas esenciales en la gestión de mantenimiento para medir, analizar y optimizar la eficiencia y confiabilidad de los equipos. Entre los más relevantes en el ámbito de la minería y maquinaria pesada, destacan la disponibilidad mecánica, el MTTR (Tiempo Medio de Reparación) y el MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas), que permiten evaluar el rendimiento de los equipos y establecer estrategias de mejora continua (Reyna-Alva & Romero-De la Cruz, 2022).

Disponibilidad mecánica

La disponibilidad mecánica mide el porcentaje de tiempo que un equipo está operativo y disponible para cumplir sus funciones dentro de un período determinado. Es un indicador clave para garantizar la continuidad de las operaciones (Prada-Salamanca & Rincón-Rincón, 2022).

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

Interpretación:

Valores altos indican que el equipo está operativo la mayor parte del tiempo.

Valores bajos reflejan problemas frecuentes o tiempos prolongados de reparación (Palomino-Quinto, 2023).

Importancia:

Asegura la productividad y minimiza interrupciones en las operaciones.

Ayuda a identificar cuellos de botella en los procesos de mantenimiento.

MTTR (Mean Time to Repair)

El Tiempo medio de reparación (MTTR) mide el tiempo promedio que se necesita para reparar un equipo y devolverlo a su estado funcional (Camacllanqui-Yallico, 2023).

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de reparación}}{\text{Número de reparaciones}}$$

Un MTTR bajo indica eficiencia en las reparaciones.

Un MTTR alto puede señalar deficiencias en recursos, repuestos o capacitación.

Permite evaluar la capacidad de respuesta del equipo de mantenimiento.

Ayuda a planificar recursos y repuestos para reducir tiempos de inactividad (Cando-Tintín & Morán-Guamán, 2023) (Corac-Angelo & Sánchez-Ponce, 2023).

MTBF (Mean Time Between Failures)

El tiempo medio entre fallas (MTBF) mide el tiempo promedio que un equipo opera sin fallar. Es un indicador directo de la confiabilidad del equipo (Alvarez-Llerena, 2023).

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total operativo}}{\text{Número de fallas}}$$

Un MTBF alto refleja equipos confiables y menor frecuencia de fallas.

Un MTBF bajo indica necesidad de mantenimiento preventivo o correctivo frecuente.

Evalúa la confiabilidad del equipo.

Permite identificar componentes críticos que requieren mayor atención (Santana Bauista, 2024).

La disponibilidad está directamente influenciada por el equilibrio entre MTTR y MTBF:

Alta disponibilidad: Se logra cuando el MTBF es alto (fallas poco frecuentes) y el MTTR es bajo (reparaciones rápidas).

Baja disponibilidad: Ocurre cuando el equipo falla con frecuencia (MTBF bajo) o las reparaciones son lentas (MTTR alto).

En los camiones grúa utilizados en minería, estos KPI permiten monitorear la eficiencia de los sistemas hidráulicos, eléctricos y mecánicos. A partir de su análisis, se pueden implementar estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo, optimizando la disponibilidad y reduciendo costos asociados a fallas inesperadas (Del Carpio-Zuñiga, 2024).

2.2.5. Análisis de sistemas hidráulicos y mecánicos

El análisis de sistemas hidráulicos y mecánicos es fundamental para comprender el comportamiento, funcionamiento y mantenimiento de los componentes críticos de los equipos industriales, como los camiones grúa. Estos sistemas son esenciales para la transmisión de energía, el movimiento y el control de las operaciones, especialmente en entornos exigentes como la minería (Ramon-Reynoso, 2024).

Sistemas hidráulicos

Un sistema hidráulico utiliza fluidos bajo presión para generar fuerza y movimiento, siendo ampliamente empleado en equipos móviles debido a su capacidad para manejar cargas pesadas con precisión y eficiencia (Soto-Mayhua, 2024).

Componentes Principales:

Bomba hidráulica: Genera flujo de fluido a presión.

Cilindros hidráulicos: Transforman la presión del fluido en movimiento lineal o rotacional.

Válvulas de control: Regulan el flujo y la dirección del fluido.

Tuberías y mangueras: Canalizan el fluido entre los componentes (Huillca-Perez, 2024).

Fallas Comunes:

Fugas en sellos o conexiones.

Contaminación del fluido hidráulico.

Desgaste en cilindros o válvulas.

Mantenimiento Recomendado:

Inspecciones regulares para detectar fugas.

Cambio periódico del fluido hidráulico.

Monitoreo de presión y temperatura (Pala-Diaz & Aguirre-Ruiz, 2024).

Sistemas mecánicos

Los sistemas mecánicos son responsables de transmitir y convertir movimientos y fuerzas, garantizando el funcionamiento estructural del equipo.

Componentes principales:

Ejes y engranajes: Transmiten potencia y torque.

Rodamientos: Reducen fricción en los puntos de giro.

Cadenas y cables: Soportan y transfieren carga.

Chasis y estructura: Proporcionan soporte y estabilidad al equipo.

Fallas Comunes:

Desgaste de engranajes y cables.

Alineación incorrecta de ejes.

Daños estructurales en el chasis.

Mantenimiento Recomendado:

Lubricación de componentes móviles.

Revisión de tensiones en cables y cadenas.

Inspección de soldaduras y puntos críticos en la estructura.

Importancia del Análisis

El análisis conjunto de sistemas hidráulicos y mecánicos permite identificar modos de falla, optimizar estrategias de mantenimiento y mejorar la confiabilidad del equipo. En los camiones grúa, estos sistemas trabajan en conjunto para soportar cargas, mover piezas estructurales y garantizar la seguridad durante las operaciones (Castillo-Tejeda, 2017).

Aplicación en el Contexto Minero

En entornos mineros, los sistemas hidráulicos y mecánicos están sometidos a condiciones extremas, como cargas pesadas, vibraciones y contaminación. El análisis periódico asegura que estos sistemas funcionen de manera óptima, reduciendo tiempos de inactividad, costos de reparación y riesgos asociados a fallas críticas. Esto es esencial para mantener la continuidad operativa y maximizar la productividad (Salazar-Zegarra, 2019).

2.2.6. Normas de seguridad y medio ambiente en la minería

Las normas de seguridad y medio ambiente en la minería constituyen un conjunto de principios, regulaciones y estándares diseñados para garantizar la protección de los trabajadores, las comunidades y el entorno natural durante las actividades mineras. Estas normas buscan minimizar los riesgos asociados a las operaciones, prevenir accidentes y mitigar los impactos ambientales, promoviendo una minería sostenible y responsable (Ramon-Reynoso, 2024).

Normas de seguridad en la minería

La seguridad en la minería es fundamental debido a los riesgos inherentes al trabajo en entornos hostiles, donde los trabajadores están expuestos a maquinaria pesada, explosivos, y condiciones adversas. Las normas de seguridad establecen directrices claras para reducir accidentes y proteger la integridad física de las personas (Siguas-Ñagüe, 2017).

Principales estándares de seguridad:

Uso de equipos de protección personal (EPP): Cascos, botas, guantes, gafas y dispositivos de protección respiratoria.

Capacitación continua: Formación en el uso seguro de equipos, gestión de emergencias y manejo de materiales peligrosos.

Evaluación de riesgos: Identificación de peligros y aplicación de medidas de control.

Mantenimiento preventivo: Garantiza que los equipos operen en condiciones óptimas, reduciendo fallas inesperadas (Mori-Palacios, 2021).

Normas internacionales relevantes:

ISO 45001: Sistemas de gestión de salud y seguridad en el trabajo.

OHSAS 18001: Antecesora de la ISO 45001, aplicada ampliamente en minería.

Normas de medio ambiente en la minería

El impacto ambiental de las actividades mineras requiere un enfoque riguroso para proteger los recursos naturales y minimizar la contaminación.

Principales ámbitos de regulación:

Gestión de residuos: Manejo adecuado de residuos sólidos, líquidos y peligrosos.

Protección de recursos hídricos: Prevención de la contaminación de fuentes de agua por efluentes y químicos.

Control de emisiones: Reducción de emisiones atmosféricas y de partículas.

Rehabilitación de áreas impactadas: Restauración del terreno después de las operaciones mineras (Loja-Loja & Yansaguano-Toral, 2021).

Normas internacionales relevantes:

ISO 14001: Sistemas de gestión ambiental.

Convenio de Minamata: Regulación sobre el uso y la emisión de mercurio.

Aplicación en operaciones mineras

En el contexto de los camiones grúa utilizados en minería, estas normas son esenciales para garantizar su operación segura y sostenible:

La implementación de un mantenimiento adecuado minimiza riesgos de fallas y accidentes (Cormilluni-Leandro, 2022).

El uso de equipos con bajo impacto ambiental, como sistemas de emisiones controladas, asegura el cumplimiento de estándares ambientales (Velandia-Sierra et al., 2021).

Las inspecciones regulares y capacitaciones específicas fortalecen la cultura de seguridad y sostenibilidad en el trabajo (Moubray, 2004).

Importancia de las normas de seguridad y medio ambiente

Protección del personal: Garantiza condiciones seguras para los trabajadores, reduciendo accidentes y enfermedades.

Minimización de impactos ambientales: Promueve una minería sostenible, protegiendo ecosistemas y recursos naturales.

Cumplimiento legal: Evita sanciones y mejora la reputación corporativa mediante la alineación con estándares internacionales (Cosi-Palomino, 2019).

2.3. Definiciones conceptuales

1. Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

Es una metodología estructurada que busca garantizar la operación confiable de un equipo mediante el análisis de fallas, la priorización de mantenimiento y la optimización de recursos.

2. Disponibilidad mecánica

Es el porcentaje de tiempo en el que un equipo está en condiciones óptimas de funcionamiento en relación con el tiempo total de operación planificado.

3. Tiempo medio entre fallas (MTBF)

Es el tiempo promedio que un equipo puede operar sin presentar fallas, usado como indicador clave de confiabilidad.

4. Tiempo medio de reparación (MTTR)

Es el tiempo promedio requerido para reparar un equipo y devolverlo a su estado operativo tras una falla.

5. Modos de falla

Son las diferentes maneras en que un componente o sistema puede fallar, afectando su rendimiento y confiabilidad.

6. Análisis de modos y efectos de fallas (FMEA/AMFE)

Es una metodología utilizada para identificar, evaluar y priorizar fallas potenciales en equipos o procesos, permitiendo la toma de acciones preventivas.

7. Mantenimiento preventivo

Es el conjunto de actividades programadas que se realizan para evitar fallas y prolongar la vida útil de los equipos.

8. Mantenimiento predictivo

Es el mantenimiento basado en el monitoreo continuo del estado del equipo, utilizando sensores y herramientas analíticas para anticipar fallas antes de que ocurran.

9. Mantenimiento correctivo

Es el mantenimiento realizado después de que una falla ha ocurrido, con el objetivo de restaurar el equipo a su funcionamiento normal.

10. Confiabilidad operativa

Es la capacidad de un equipo o sistema de cumplir su función de manera consistente bajo condiciones de operación establecidas.

11. Análisis de criticidad

Es el proceso de evaluación de fallas en función de su impacto en seguridad, costos y operación, para priorizar estrategias de mantenimiento.

12. Indicadores clave de desempeño (KPI)

Son métricas utilizadas para medir la efectividad y eficiencia del mantenimiento, como la disponibilidad, el MTBF y el MTTR.

13. Gestión de activos físicos (ISO 55000)

Es un estándar internacional que establece buenas prácticas para la administración eficiente del ciclo de vida de los activos en la industria.

14. Sistemas hidráulicos en camiones grúa

Son los mecanismos que utilizan fluidos a presión para generar fuerza y movimiento en el levantamiento de cargas pesadas.

15. Seguridad y normativa en minería

Es el conjunto de regulaciones y procedimientos diseñados para minimizar riesgos operativos y ambientales en la industria minera.

Capítulo 3. Marco metodológico

3.1. Nivel de investigación

La investigación es aplicada-tecnológica porque busca generar soluciones prácticas mediante el uso de herramientas cuantitativas avanzadas. La investigación aplicada transforma el conocimiento teórico en mejoras reales, mientras que la tecnológica optimiza procesos mediante técnicas estadísticas y metodologías innovadoras.

3.2. Diseño de la investigación

El diseño es no experimental y de tipo longitudinal porque no se manipulan variables deliberadamente, sino que se observan fenómenos en su entorno natural a lo largo del tiempo. Este enfoque permite analizar tendencias y relaciones entre variables sin alterar su comportamiento, garantizando mayor validez externa.

3.3. Planteamiento metodológico

El estudio se enmarcó en un enfoque cuantitativo, basado en el paradigma positivista, con el objetivo de optimizar la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa en la minera Quellaveco mediante la aplicación de la metodología Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). El diseño de investigación fue no experimental, ya que se implementó la metodología RCM en la flota de camiones grúa y se midieron los resultados antes y después de su aplicación. El alcance del estudio fue explicativo, pues buscó identificar las causas que afectaban la disponibilidad mecánica y proponer soluciones basadas en RCM.

La población estuvo conformada por la flota de camiones grúa operativos en la minera Quellaveco durante el año 2022, y la muestra se seleccionó considerando los equipos que presentaron mayores problemas de disponibilidad mecánica. Para la recolección de datos, se utilizaron registros históricos de mantenimiento, hojas de vida de

los equipos y entrevistas estructuradas con el personal técnico y operativo. Las variables se operacionalizaron a través de indicadores como tiempo medio entre fallas (MTBF), tiempo medio de reparación (MTTR) y disponibilidad mecánica (DM).

El análisis de datos se realizó mediante el software STATGRAPHICS, utilizando técnicas estadísticas como análisis de tendencias, pruebas de hipótesis para evaluar la efectividad de la metodología RCM en función de la disponibilidad mecánica. Los hallazgos se presentaron en tablas y gráficos, acompañados de una discusión que permitió contrastar los resultados con estudios previos y aportar nuevas perspectivas al campo de la gestión de mantenimiento en minería.

3.4. Población y muestra

Población: Flota de 04 camiones grúa.

Muestra: Flota de 04 camiones grúa.

3.5. Equipos y materiales

Tabla 2*Tabla de equipos y materiales*

Categoría	Equipos/Materiales	Propósito/Aplicación
Equipos principales	Camiones grúa (CT001, CT004,CT005,CT006)	Estudio de su disponibilidad mecánica y aplicación de RCM.
	Analizadores de vibraciones (SKF Microlog).	Monitoreo de vibraciones en componentes críticos (ej. motores, sistemas hidráulicos).
	Software Cummins Insite	Sistema de diagnóstico de motores de los tractos de los camiones grúas.
Herramientas de diagnóstico	Líquidos Penetrantes (END)	Ensayos no destructivos realizados en estructuras y ganchos de carga
	Viscosímetro, FTIR, Monitor de densidad ferrosa, Ferrografo, Plancha de crackeo, Contador de partículas	(Equipos utilizados para el análisis de aceites, refrigerantes y diésel)
	Termómetros infrarrojos (Fluke 62 Max)	Medición de temperatura en componentes como frenos, transmisiones y sistemas de enfriamiento.
Software	Software RCM (SAP)	Implementación de la metodología RCM para priorizar tareas de mantenimiento.
	SAP PM / IBM Máximo	Análisis estadístico de datos (MTBF, MTTR, correlaciones).
	SAP PM / IBM Máximo	Gestión de órdenes de trabajo y registro histórico de mantenimiento.

Categoría	Equipos/Materiales	Propósito/Aplicación
Registros y datos	Historial de mantenimiento (2022)	Análisis de tendencias de fallas y tiempos de reparación.
	Hojas de vida de los equipos	Identificación de componentes críticos y patrones de desgaste.
Instrumentos de campo	Checklist de inspección técnica	Evaluación física de componentes durante las inspecciones.
	Formatos de entrevistas estructuradas	Recolección de información cualitativa del personal técnico y operativo.
Equipos de seguridad	EPP (casco, lentes, guantes, calzado)	Protección del personal durante inspecciones y trabajos en campo.
Documentación	Manuales técnicos de los camiones grúa	Referencia para especificaciones técnicas y procedimientos de mantenimiento.
	Normas	Guía para la implementación estandarizada de RCM.
Recursos adicionales	Plataformas de simulación (AnyLogic)	Modelado de escenarios de falla y optimización de planes de mantenimiento predictivo.
	Sensores de telemetría integrados	Monitoreo en tiempo real de parámetros operativos.

Nota. Elaboración propia

3.6. Procedimiento de investigación

3.6.1. Recolección de datos y diagnóstico inicial

Se recopilaron registros históricos de mantenimiento (2022) de los camiones grúa, incluyendo MTBF, MTTR y causas de fallas recurrentes.

Se realizaron inspecciones físicas con herramientas de diagnóstico (termómetros infrarrojos, analizadores de vibración) para evaluar el estado de componentes críticos (ej. motores, transmisiones).

Se aplicaron entrevistas estructuradas al personal técnico para identificar problemas operativos y prácticas de mantenimiento actuales.

3.6.2. Implementación de RCM

Se identificaron modos de falla mediante análisis FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), priorizando aquellos con mayor impacto en la disponibilidad.

Se diseñaron tareas de mantenimiento predictivo y preventivo (lubricación programada, reemplazo de componentes críticos).

3.6.3. Validación y monitoreo

Se ejecutaron las tareas RCM durante 12 meses, registrando datos de desempeño (ej. reducción de fallas, tiempo de respuesta).

Se analizaron los resultados con STATGRAPHICS, aplicando pruebas estadísticas (t-student, ANOVA) para comparar métricas pre y post-RCM.

3.7. Técnicas de recolección de datos

Para garantizar la validez y confiabilidad del estudio, se emplearon técnicas cuantitativas y cualitativas, alineadas con los objetivos de la investigación:

3.7.1. Análisis documental

Se revisaron registros históricos de mantenimiento (2022) de la flota de camiones grúa, incluyendo órdenes de trabajo, tiempos de reparación (MTTR) y frecuencias de fallas (MTBF). Esta información permitió identificar patrones de falla y tendencias.

3.7.2. Entrevistas estructuradas:

Se aplicaron cuestionarios estandarizados al personal técnico y operativo (mecánicos, supervisores) para recopilar información cualitativa sobre prácticas de mantenimiento, desafíos operativos y percepción de la implementación de RCM.

3.7.3. Observación directa

Se realizaron inspecciones físicas en campo, utilizando herramientas como termómetros infrarrojos y analizadores de vibraciones, para evaluar el estado de componentes críticos.

3.8. Técnicas para el procesamiento de datos

El procesamiento de datos se realizó en tres etapas principales:

3.8.1. Organización y limpieza de datos:

Se depuraron los datos recopilados (registros históricos, encuestas, telemetría) para eliminar inconsistencias, valores atípicos o información incompleta.

Se clasificaron los datos en categorías como fallas mecánicas, tiempos de reparación y disponibilidad, utilizando hojas de cálculo en Excel para su organización inicial.

3.8.2. Análisis descriptivo:

Se calcularon métricas clave como el tiempo medio entre fallas (MTBF), tiempo medio de reparación (MTTR) y disponibilidad mecánica (A).

Se generaron gráficos (histogramas, diagramas de Pareto) para visualizar tendencias y patrones de falla, utilizando el software STATGRAPHICS.

3.8.3. Análisis inferencial:

Se aplicaron pruebas estadísticas para validar hipótesis, como la prueba t-student para comparar medias antes y después de la implementación de RCM, y el ANOVA para evaluar diferencias entre grupos de equipos.

Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para analizar la relación entre variables como frecuencia de mantenimiento y disponibilidad.

3.8.4. Modelado y simulación:

Se empleó software RCM (SAP) para modelar escenarios de falla y optimizar planes de mantenimiento predictivo.

Capítulo 4. Resultados

4.1. Descripción de los resultados

Para evaluar la optimización de la disponibilidad mecánica de la flota de camiones grúa en la minera Quellaveco mediante la aplicación de la metodología RCM, se llevaron a cabo diversas pruebas experimentales enfocadas en la identificación, análisis y mitigación de fallas críticas. Estas pruebas se desarrollaron bajo un enfoque sistemático basado en la recopilación de datos operativos, análisis de confiabilidad y monitoreo de indicadores clave de desempeño (KPI).

Las pruebas experimentales no implicaron la manipulación directa de los equipos en condiciones controladas, sino que se basaron en la observación y análisis de datos históricos, junto con la aplicación de herramientas de diagnóstico avanzadas para evaluar el desempeño de la flota.

4.1.1. Ubicación geográfica de la mina Quellaveco

La Mina Quellaveco se localiza en el departamento de Moquegua, provincia de General Sánchez Cerro, distrito de Torata. Está situada en la zona altoandina, a una altitud aproximada de 3,500 a 4,000 metros sobre el nivel del mar. La ubicación del taller de mantenimiento de flota soporte el cual está a cargo de Unimaq se encuentra en la Zona T4 en el área 2000 de la mina Quellaveco.

Las vía de acceso por aire es mediante el aeropuerto de Tacna a 200 km y del aeropuerto de Ilo a 155 km.

La vía por tierra es mediante la autopista costanera con acceso directo.

Figura 1.

Ubicación de la minera Quellaveco

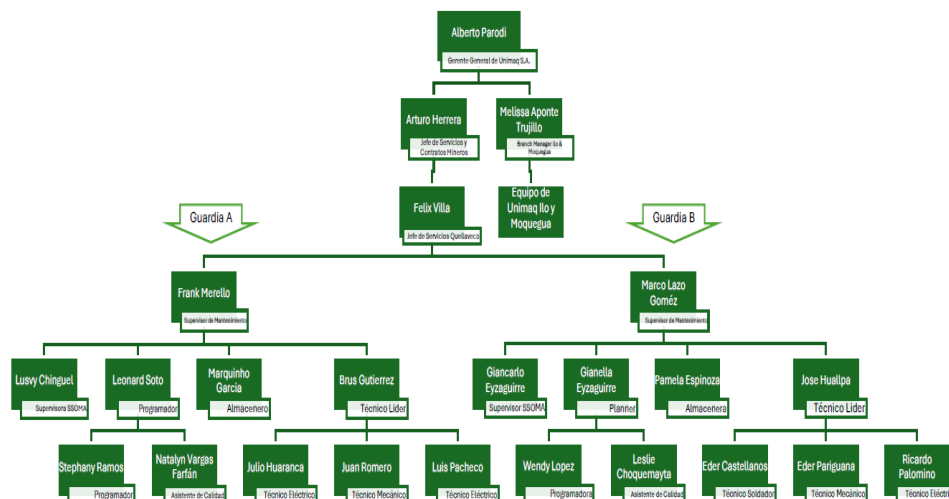


Nota. La ubicación de la minera Quellaveco se encuentra en el departamento de Moquegua, provincia de General Sánchez Cerro, distrito de Torata. Adaptado de Vista de Google Earth de la mina Toquepala. El yacimiento Quellaveco se encuentra... | Descargar diagrama científico por ResearchGate. (2025). ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Google-Earth-view-of-Toquepala-mine-The-Quellaveco-deposit-is-located-about-15-km-north_fig2_385632779

4.1.2. Organigrama

Figura 2.

Organigrama



Nota. El organigrama fue realizado por elaboración propia.

4.1.3. Monitoreo de fallas y registro de datos

Se recopilaron registros de fallas mecánicas de los camiones grúa entre los años 2020 y 2022.

Se analizaron las tendencias de fallas recurrentes, identificando los modos de falla más críticos.

Se implementó un sistema de clasificación de fallas según su impacto en la disponibilidad mecánica.

4.1.4. Análisis de modos y efectos de fallas

Se identificaron los principales componentes afectados por fallas críticas.

Se evaluaron las causas raíz de los problemas mecánicos mediante el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR).

Se clasificaron las fallas en categorías de criticidad para priorizar intervenciones de mantenimiento.

4.1.5. Evaluación de indicadores clave de desempeño

Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF): Se analizó el tiempo promedio de operación de los camiones antes de presentar una falla.

Tiempo Medio de Reparación (MTTR): Se midió el tiempo requerido para restaurar el equipo a condiciones operativas tras una falla.

Disponibilidad Mecánica: Se calculó la relación entre el tiempo efectivo de operación y el tiempo total disponible del equipo.

4.1.6. Implementación de estrategias de mantenimiento RCM

Se diseñaron planes de mantenimiento preventivo y predictivo en función de los hallazgos obtenidos.

Se aplicaron técnicas de monitoreo de condición, como análisis de aceite, análisis de vibraciones, tintes penetrantes y termografía infrarroja, para prever fallas futuras.

Se optimizó el inventario de repuestos críticos para reducir los tiempos de inactividad por espera de componentes.

4.2. Elaboración del proyecto

4.2.1. Estrategia de mantenimiento técnico conforme al principio del RCM.

La estrategia de mantenimiento técnico basada en el principio del RCM (Reliability-Centered Maintenance) busca garantizar que los activos físicos, como los camiones grúa, cumplan sus funciones operativas de manera confiable en su contexto de uso. Este enfoque se centra en preservar la funcionalidad de los equipos, identificando los modos de falla más críticos y priorizando intervenciones que sean costo-efectivas y minimicen riesgos operativos, de seguridad y ambientales.

Para implementarla, primero se definen las funciones principales y secundarias de los camiones grúa, como elevar cargas pesadas, facilidad de trabajo en altura mediante el uso de canastilla u operar en condiciones específicas de terreno. Luego, mediante el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (FMEA), se identifican los posibles fallos en componentes clave, como el sistema hidráulico, mecánico, y se evalúa su criticidad considerando la severidad, ocurrencia y detectabilidad.

Basado en este análisis, se seleccionan tipos de mantenimiento, preventivo para inspecciones regulares, predictivo mediante monitoreo de condiciones como vibración o desgaste, y correctivo para atender fallas menores no críticas. Un plan de mantenimiento estructurado incluye un calendario de tareas, un inventario de repuestos críticos y capacitación del personal técnico.

La estrategia se complementa con el uso de software de gestión de mantenimiento (SAP), permitiendo registrar y evaluar las intervenciones realizadas. Los resultados esperados incluyen un incremento en la disponibilidad mecánica, mayor confiabilidad operativa y reducción de costos, asegurando que los camiones grúa operen de manera

eficiente y segura, contribuyendo al cumplimiento de objetivos productivos y a una operación minera sostenible.

4.2.2. Catálogo de funciones y características

El catálogo de funciones y características de los camiones grúa en una operación minera como Quellaveco es esencial para comprender sus capacidades, limitaciones y el enfoque de mantenimiento que deben recibir. Estos equipos cumplen funciones críticas dentro del proceso operativo, siendo indispensables para tareas como el levantamiento y transporte de cargas pesadas, la asistencia en actividades de ensamblaje de maquinaria y la realización de maniobras en espacios confinados o terrenos complejos. Estas funciones principales aseguran la continuidad operativa y la productividad en las actividades mineras.

Entre las características técnicas más relevantes de los camiones grúa se encuentran su capacidad de carga nominal, que varía según el modelo y puede alcanzar varias toneladas; su sistema hidráulico, diseñado para garantizar precisión y estabilidad en las maniobras; y su motor, que combina potencia y eficiencia para operar en condiciones desafiantes. Asimismo, cuentan con sistemas de control eléctrico que aseguran un manejo seguro, sensores para monitoreo de parámetros operativos, y estructuras reforzadas que brindan durabilidad y resistencia al desgaste.

En términos operativos, los camiones grúa están diseñados para trabajar bajo estrictos estándares de seguridad y adaptarse a diversos entornos, desde climas extremos hasta suelos irregulares. Estas características los convierten en activos estratégicos cuya confiabilidad es fundamental para evitar interrupciones en la operación minera. Por tanto, su mantenimiento debe enfocarse en garantizar la funcionalidad de los sistemas críticos, reducir los tiempos de inactividad y prolongar la vida útil del equipo mediante estrategias como las propuestas por el RCM.

4.2.3. Detección de fallas funciones y técnicas.

La detección de fallas funcionales y técnicas en los camiones grúa es un proceso clave para garantizar su disponibilidad mecánica y minimizar interrupciones en la operación minera. Este proceso comienza con la identificación de fallas funcionales, que se manifiestan cuando el equipo no puede cumplir con su propósito principal, como elevar y trasladar cargas de manera segura y eficiente. Estas fallas suelen estar relacionadas con componentes críticos, como el sistema hidráulico, el motor o los mecanismos de tracción.

Mediante un análisis estructurado, como el FMEA (Análisis de Modos y Efectos de Fallas), se identifican los modos de falla potenciales, las causas raíz y las consecuencias operativas de cada uno. Por ejemplo, en el sistema hidráulico, un fallo podría ser causado por fugas, contaminación del fluido o desgaste de los cilindros, lo que podría derivar en pérdida de capacidad de levantamiento o riesgo de accidentes. En el sistema eléctrico, fallas en sensores o conexiones pueden causar interrupciones en el control del equipo.

Para detectar estas fallas de manera temprana, se utilizan técnicas avanzadas de monitoreo predictivo, como análisis de aceites, análisis de vibraciones, ultrasonido y termografía infrarroja, que permiten identificar anomalías antes de que se conviertan en problemas mayores. Asimismo, se implementan inspecciones regulares y revisiones programadas para prevenir fallas inesperadas.

La detección eficaz de fallas no solo permite mantener la confiabilidad operativa de los camiones grúa, sino también optimizar los recursos destinados a su mantenimiento, aumentando así la seguridad y eficiencia en las operaciones mineras.

4.2.4. Detección de los modos de falla.

La detección de los modos de falla en los camiones grúa es una tarea esencial para garantizar su confiabilidad y optimizar su disponibilidad en un entorno como el de la minería. Este proceso implica identificar las posibles formas en que cada componente del equipo puede fallar y los efectos que estas fallas tienen en el desempeño general del sistema. La metodología FMEA (Análisis de Modos y Efectos de Fallas) es ampliamente utilizada para este propósito, ya que permite descomponer el equipo en subsistemas y analizar cada uno de manera estructurada.

Los modos de falla más comunes en los camiones grúa incluyen fugas en los sistemas hidráulicos, desgaste prematuro de cables y cadenas, deformación de cable, sobrecalentamiento del motor, fallas del sistema de frenos, fallos en los sistemas eléctricos de control y desgaste mecánico en las juntas y puntos de pivote. Por ejemplo, una fuga en el sistema hidráulico puede ser causada por sellos deteriorados o contaminantes en el fluido, lo que compromete la capacidad de levantar cargas de manera segura. Para detectar estos modos de falla, se implementan técnicas como inspecciones visuales, análisis de fluidos, monitoreo de vibraciones y pruebas de carga. Este enfoque permite identificar fallas potenciales antes de que se conviertan en problemas críticos, permitiendo planificar el mantenimiento de manera proactiva. Al abordar los modos de falla más críticos, se logra una mejora significativa en la confiabilidad y eficiencia operativa de los camiones grúa.

4.2.5. Análisis de causa y efecto.

El análisis de causa y efecto es una herramienta fundamental para comprender las relaciones entre los modos de falla en los camiones grúa y sus consecuencias en las operaciones. Este enfoque permite identificar no solo las causas raíz de las fallas, sino también los impactos que estas generan en la seguridad, productividad y eficiencia del equipo. En los camiones grúa, una falla común como la pérdida de capacidad de elevación podría ser atribuida a múltiples factores: Desgaste en los cilindros hidráulicos (maquinaria), contaminación del fluido hidráulico (materiales), mantenimiento inadecuado (métodos), o falta de capacitación en los operadores (mano de obra). Cada una de estas causas puede generar efectos secundarios significativos, como retrasos en la operación, aumento de los costos de reparación y riesgos de accidentes.

El análisis de causa y efecto no solo ayuda a identificar y priorizar las causas más críticas, sino que también permite proponer acciones correctivas específicas. Por ejemplo, un plan de mantenimiento preventivo mejorado puede abordar el desgaste en componentes críticos, mientras que capacitaciones periódicas pueden reducir errores operativos. Este enfoque sistémico contribuye a eliminar las causas de las fallas

recurrentes, mejorar la confiabilidad de los equipos y garantizar una operación segura y eficiente en un entorno exigente como el minero.

4.2.6. Análisis de consecuencias y criticidad (AMFE).

El análisis de consecuencias y criticidad mediante la metodología AMFE permite identificar y priorizar las fallas en los camiones grúa, clasificándolas según su impacto en la operación minera. Este enfoque evalúa cada modo de falla utilizando tres parámetros: Severidad (NS), ocurrencia (NO) y detectabilidad (ND), obteniendo un Número de Prioridad de Riesgo (NPR) que define el nivel de criticidad y las acciones requeridas.

En el estado actual, el 27,36 % de las fallas tienen una criticidad inaceptable ($\text{NPR} \geq 200$), lo que indica un alto riesgo operativo y la necesidad de intervenciones inmediatas. Por ejemplo, la reparación de la línea del radiador (NPR: 294) y el cambio de los pulmones de freno y la válvula ABS (NPR: 294) son fallas que afectan directamente la seguridad y el rendimiento del equipo. Estas deben ser tratadas con mantenimiento correctivo urgente y la implementación de inspecciones regulares para prevenir recurrencias.

El 38,95 % de las fallas se encuentran en un estado de reducción deseable ($100 \leq \text{NPR} < 200$). Estas incluyen tareas como la inspección de neumáticos (NPR: 168) y el relleno de AdBlue (NPR: 180). Aunque no representan un riesgo crítico inmediato, deben abordarse mediante mantenimiento preventivo programado para evitar que evolucionen a fallas graves.

Así también, el 33,69 % de las fallas son clasificadas como aceptables ($\text{NPR} < 100$). Estas incluyen el cambio de amortiguadores traseros (NPR: 32) y la rotación de neumáticos (NPR: 12), que pueden resolverse durante mantenimientos generales, optimizando recursos.

El análisis permite priorizar las fallas más críticas y diseñar un plan de mantenimiento que equilibre acciones correctivas, preventivas y predictivas. Implementar estas estrategias reducirá los costos correctivos, mejorará la confiabilidad del equipo y aumentará la disponibilidad de los camiones grúa, garantizando la seguridad y eficiencia en las operaciones mineras.

Para el cálculo del NPR es la multiplicación de los factores NO, ND, NR.

$NPR = NO \times ND \times NR$.

Nivel de ocurrencia

Tabla 3*Escala para definir el nivel de ocurrencia*

Nivel de Ocurrencia (NO)	Descripción (frecuencia de ocurrencia)	Probabilidad de ocurrencia de la falla
10	Muy alta: Falla que es casi inevitable	Más de una ocurrencia por día, o una probabilidad de más de tres ocurrencias en diez eventos
9	Alta: Continuamente falla	Una ocurrencia cada tres o cuatro días, o una probabilidad de tres ocurrencias en diez eventos
8	Alta: Continuamente falla	Una ocurrencia por semana o una probabilidad de cinco ocurrencias en cien eventos
7	Moderada: Ocasionalmente falla	Una ocurrencia por mes, o una ocurrencia en cien eventos
6	Moderada: Ocasionalmente falla	Una ocurrencia cada tres meses o tres ocurrencias en mil eventos
5	Moderada: Ocasionalmente falla	Una ocurrencia cada seis meses en un año, o una ocurrencia en diez mil eventos
4	Baja: Relativamente falla poco	Una ocurrencia por año o seis ocurrencias en cien mil eventos
3	Baja: Relativamente falla poco	Una ocurrencia entre uno y tres años o seis ocurrencias en diez millones de eventos
2	Remota: No es probable que falle	Una ocurrencia entre tres y cinco años o dos ocurrencias en un billón de eventos
1	Remota: No es probable que falle	Una ocurrencia en más de cinco años, o menos de dos ocurrencias en un billón de eventos

Nota. La escala realizada utilizada fue del 1 al 10 para el nivel de ocurrencia en el análisis de criticidad y fue de elaboración propia.

Nivel de detección

Tabla 4

Escala para definir el nivel de detección

Nivel de Detección (ND)	Descripción (Grado de control o detección)	Definición
10	Absolutamente incierto	El proceso y el producto no es controlado o inspeccionado, las anomalías por fallas no son detectadas.
9	Muy remoto	Se inspecciona solo el producto final a partir de un nivel aceptable de calidad.
8	Remoto	Se inspecciona solo el producto final en base a un modelo previamente probado.
7	Muy bajo	Se inspecciona solo el producto manualmente durante todo el proceso (no hay ayuda de equipos modernos de control).
6	Bajo	Se inspecciona solo el producto manualmente durante todo el proceso, usando pruebas de ensayo y error.
5	Moderado	El proceso se controla bajo técnicas estadísticas de control de procesos, y el producto es inspeccionado al final del proceso en la línea de producción (25 % automatización).
4	Moderadamente alto	El proceso se controla bajo técnicas estadísticas de control de procesos, y el producto es inspeccionado en dos puntos del proceso en la línea de producción (50 % automatización).
3	Alto	El proceso se controla bajo técnicas estadísticas de control de procesos, y el producto es inspeccionado en más de dos puntos del proceso en la línea de producción (75 % automatización).
2	Muy alto	El proceso se controla bajo técnicas estadísticas de control de procesos, y el producto es inspeccionado durante todo el proceso en la línea de producción (100 % automatización).
1	Totalmente controlado	El proceso se controla bajo técnicas estadísticas de control de procesos, con calibración continua y mantenimiento preventivo de los equipos utilizados para controlar e inspeccionar el proceso y el producto.

Nota. La escala realizada utilizada fue del 1 al 10 para el nivel de detección en el análisis de criticidad y fue de elaboración propia.

Nivel de severidad

Tabla 5

Escala para definir el nivel de severidad

Nivel de Severidad (NS)	Descripción (Nivel de severidad de la falla)	Efectos de las fallas
10	Peligrosamente alto	Fallas que pueden causar pérdidas humanas
9	Extremadamente alto	Fallas que pueden crear complicaciones con regulaciones federales (leyes)
8	Alto	Fallas que hacen inoperables los equipos y provocan la pérdida de función para la que fueron diseñados.
7	Alto	Fallas que causan un alto grado de insatisfacción al cliente que recibe el servicio.
6	Moderado	Fallas que afectan un subsistema y originan un mal funcionamiento de los equipos disminuyendo la calidad del servicio.
5	Bajo	Fallas que provocan la pérdida de eficiencia y causan que el cliente se queje.
4	Bajo	Fallas que pueden ser mejoradas con pequeñas modificaciones y su impacto sobre la eficiencia de los equipos es pequeña.
3	Menor	Fallas que podrían crear mínimas molestias al cliente, molestias que el mismo cliente podría corregir en el proceso sin necesidad de perder eficiencia.
2	Menor	Fallas que son difíciles de reconocer por el cliente y cuyos efectos serán insignificantes para el proceso.
1	Ninguno	Fallas que no son identificables por el cliente y no afectan la eficiencia del proceso.

Nota. La escala realizada utilizada fue del 1 al 10 para el nivel de detección en el análisis de criticidad y fue de elaboración propia.

Resultado del NPR

Tabla 6

Criticidad de los modos de falla

Nº	Modo de falla	NO	ND	NS	NPR	Criticidad
1	Evaluación del estado de los estabilizadores del camión grúa para asegurar su correcto funcionamiento.	6	6	6	216	Inaceptable
2	Programación de mantenimiento cada 1000 horas, que incluye el rellenado de AdBlue, un líquido utilizado para reducir las emisiones contaminantes.	5	7	6	210	Inaceptable
3	Inspección de los neumáticos para verificar su presión, desgaste y seguridad general.	5	5	5	125	Reducción deseable
4	Evaluación de posibles fugas en el sistema hidráulico, lo cual es crucial para el funcionamiento seguro y eficiente del camión.	4	6	7	168	Reducción deseable
5	Evaluación del sistema anti bloqueo doble, que previene el mal funcionamiento en situaciones críticas.	6	5	8	240	Inaceptable
6	Relleno de AdBlue en el sistema del camión, esencial para la reducción de emisiones.	5	6	6	180	Reducción deseable
7	Reparación de la línea del radiador debido a una fuga, lo que es vital para mantener la temperatura del motor.	6	7	7	294	Inaceptable
8	Reparación del soporte del brazo del camión grúa para garantizar su estabilidad y funcionalidad.	5	5	6	150	Reducción deseable
9	Evaluación del código de la grúa y diagnóstico del ruido anómalo en los frenos para garantizar la seguridad en su operación.	4	6	8	192	Reducción deseable
10	Cambio de la válvula moduladora en la parte posterior derecha del camión.	4	5	3	60	Aceptable
11	Engrasado de los estabilizadores para reducir la fricción y prolongar su vida útil.	5	6	5	150	Reducción deseable
12	Cambio de las bandas de freno, una parte esencial para el sistema de frenado del camión.	4	5	6	120	Aceptable
13	Mantenimiento general del sistema de freno para asegurar su eficacia.	4	5	6	120	Aceptable
14	Relleno de AdBlue en el sistema, contribuyendo a la reducción de emisiones.	5	5	5	125	Reducción deseable
15	Cambio del pulmón neumático, que es parte del sistema de frenos.	5	7	6	210	Inaceptable

N°	Modo de falla	NO	ND	NS	NPR	Criticidad
16	Engrasado de cables para asegurar un funcionamiento suave y evitar desgastes.	4	6	4	96	Aceptable
17	Regulación de la pluma del camión grúa para asegurar su correcto funcionamiento y estabilidad.	6	7	5	210	Inaceptable
18	Instalación de la manguera y abrazadera necesarias para el sistema hidráulico.	5	5	6	150	Reducción deseable
19	Instalación de la pértiga y un foco LED para mejorar la visibilidad durante el trabajo.	6	6	7	252	Inaceptable
20	Evaluación del sistema eléctrico, incluyendo las luces y otros accesorios del camión.	7	8	5	280	Inaceptable
21	Engrasado de la pluma del camión grúa para asegurar su movimiento suave.	4	5	8	160	Reducción deseable
22	Programación de mantenimiento cada 500 horas, asegurando que el camión se mantenga en condiciones óptimas.	5	6	7	210	Inaceptable
23	Inspección adicional de los neumáticos.	5	7	6	210	Inaceptable
24	Instalación de la unión neumática, que permite la conexión entre diferentes componentes del sistema.	6	5	8	240	Inaceptable
25	Engrasado del brazo (boom) y estabilizadores para un funcionamiento eficiente.	5	6	5	150	Reducción deseable
26	Relleno de AdBlue nuevamente, asegurando que el sistema esté completo.	6	5	7	210	Inaceptable
27	Engrasado del brazo del camión grúa.	5	6	7	210	Inaceptable
28	Mantenimiento del sistema eléctrico y cambio del foco en la pértiga.	4	7	7	196	Reducción deseable
29	Relleno de AdBlue.	5	6	6	180	Reducción deseable
30	Instalación de un sistema de corte de corriente para seguridad.	5	5	5	125	Reducción deseable
31	Evaluación del rozamiento del neumático con el brazo del camión, que puede afectar su operación.	6	5	6	180	Reducción deseable

N°	Modo de falla	NO	ND	NS	NPR	Criticidad
32	Evaluación del sistema de frenos en la parte posterior del camión.	6	7	6	252	Inaceptable
33	Cambio del interruptor anti bloqueo doble.	5	7	6	210	Inaceptable
34	Toma de medidas de la mirilla para asegurar su correcto funcionamiento.	4	6	5	120	Aceptable
35	Evaluación de los estabilizadores y toma de medidas adicionales.	6	5	7	210	Inaceptable
36	Inspección general del equipo para verificar su estado.	5	5	7	175	Reducción deseable
37	Evaluación del sistema de frenos en la parte posterior.	5	6	5	150	Reducción deseable
38	Relleno de AdBlue.	5	5	5	125	Reducción deseable
39	Cambio de las plumillas y del motor del limpiaparabrisas.	6	6	6	216	Inaceptable
40	Cambio de los pulmones de freno y la válvula ABS.	6	7	7	294	Inaceptable
41	Cambio de los neumáticos delanteros.	6	6	6	216	Inaceptable
42	Rotación de los neumáticos en la parte posterior.	5	5	4	100	Aceptable
43	Programación de mantenimiento cada 500 horas, incluyendo el rellenado de AdBlue.	5	6	6	180	Reducción deseable
44	Programación de mantenimiento para la grúa cada 1000 horas.	4	6	5	120	Aceptable
45	Certificación del equipo de la grúa.	6	7	5	210	Inaceptable
46	Programación de mantenimiento cada 500 horas.	5	5	6	150	Reducción deseable
47	Inspección de neumáticos.	4	6	7	168	Reducción deseable
48	Relleno de AdBlue.	5	5	6	150	Reducción deseable
49	Inspección y arranque del equipo.	5	5	5	125	Reducción deseable
50	Instalación del cilindro neumático posterior número 6.	8	5	6	240	Inaceptable

N°	Modo de falla	NO	ND	NS	NPR	Criticidad
51	Relleno de AdBlue.	6	6	8	288	Inaceptable
52	Programación de mantenimiento cada 1000 horas.	5	5	7	175	Reducción deseable
53	Inspección de neumáticos.	5	5	5	125	Reducción deseable
54	Inspección de las cadenas posteriores izquierda y derecha.	5	6	6	180	Reducción deseable
55	Cambio del interruptor de señal de giro.	6	6	5	180	Reducción deseable
56	Sellado de la cabina para evitar filtraciones.	4	5	4	80	Aceptable
57	Servicio especializado para la inspección y evaluación del equipo TREX.	5	4	5	100	Aceptable
58	Evaluación de la canastilla.	4	5	6	120	Aceptable
59	Servicio especializado para la inspección y evaluación del equipo TREX.	5	6	6	180	Reducción deseable
60	Instalación del faro neblinero.	6	5	6	180	Reducción deseable
61	Evaluación de las mangueras hidráulicas.	5	5	5	125	Reducción deseable
62	Inspección y arranque del equipo.	6	6	6	216	Inaceptable
63	Reforzamiento de la soldadura del guardafango.	6	6	6	216	Inaceptable
64	Instalación de neumáticos.	5	7	4	140	Reducción deseable
65	Instalación de la pértiga.	4	6	5	120	Aceptable
66	Cambio de los amortiguadores delanteros derecho e izquierdo.	5	5	5	125	Reducción deseable
67	Programación de mantenimiento cada 250 horas.	4	4	6	96	Aceptable
68	Inspección de neumáticos.	5	5	6	150	Reducción deseable
69	Evaluación del sistema de dirección derecha.	6	5	5	150	Reducción deseable
70	Relleno de AdBlue.	6	6	4	144	Reducción deseable

N°	Modo de falla	NO	ND	NS	NPR	Criticidad
71	Inspección del sistema eléctrico del tablero para asegurar que todos los componentes funcionen correctamente.	5	5	5	125	Reducción deseable
72	Cambio de los faros direccionales delanteros izquierdo para garantizar la señalización adecuada del camión.	5	5	5	125	Reducción deseable
73	Cambio de la válvula distribuidora, que controla el flujo de fluidos en el sistema hidráulico.	7	5	8	280	Inaceptable
74	Cambio de la mirilla del tanque hidráulico para facilitar la verificación del nivel del líquido.	4	5	4	80	Aceptable
75	Engrasado de los estabilizadores para asegurar su correcto funcionamiento y reducir el desgaste.	5	4	6	120	Aceptable
76	Evaluación de las almohadillas de los estabilizadores para garantizar que estén en buen estado.	6	5	6	180	Reducción deseable
77	Evaluación del sistema de freno de la canastilla para asegurar su efectividad.	4	4	4	64	Aceptable
78	Cambio del perno de regulación del tope de dirección para mejorar el control del vehículo.	4	5	4	80	Aceptable
79	Reparación del guardafango, que protege las partes inferiores del camión de escombros y suciedad.	5	5	3	75	Aceptable
80	Programación de mantenimiento cada 500 horas para asegurar el rendimiento continuo del camión.	6	6	2	72	Aceptable
81	Inspección de neumáticos para verificar su estado y presión.	5	5	2	50	Aceptable
82	Cambio de los amortiguadores traseros para mejorar la estabilidad y confort del camión.	4	4	2	32	Aceptable
83	Cambio de los amortiguadores delanteros para asegurar la correcta respuesta de la dirección y el manejo del camión.	5	5	1	25	Aceptable
84	Evaluación del sistema de dirección para garantizar un control adecuado del camión.	4	5	1	20	Aceptable

N°	Modo de falla	NO	ND	NS	NPR	Criticidad
85	Fabricación o reparación de la soportería del chasis en el lado izquierdo, crucial para la integridad estructural del camión.	6	6	1	36	Aceptable
86	Cambio del faro direccional para asegurar que las señales de giro sean visibles.	5	7	1	35	Aceptable
87	Evaluación del sistema de circulina, que es utilizado para la orientación del equipo.	5	5	1	25	Aceptable
88	Instalación del faro delantero bajo para mejorar la visibilidad en condiciones de poca luz.	5	7	8	280	Inaceptable
89	Reparación del capó para asegurar que se cierre correctamente y proteja los componentes del motor.	5	5	2	50	Aceptable
90	Programación de mantenimiento preventivo cada 3000 horas para el modelo T800 con capacidad de 22 toneladas.	6	4	3	72	Aceptable
91	Inspección de neumáticos para verificar su estado.	5	3	2	30	Aceptable
92	Instalación de la pértiga para el uso adecuado en operaciones de elevación.	4	2	3	24	Aceptable
93	Relleno de AdBlue para asegurar que el sistema de reducción de emisiones funcione correctamente.	4	1	3	12	Aceptable
94	Rotación de los neumáticos para asegurar un desgaste uniforme y prolongar su vida útil.	4	1	3	12	Aceptable
95	Mantenimiento correctivo de muestreo de aceite	5	1	2	10	Aceptable

Nota. Criticidad de modos de falla para la flota de camiones grúa y fue de elaboración propia

4.2.7. Desarrollo del análisis de criticidad

El análisis de criticidad es una herramienta fundamental para priorizar las tareas de mantenimiento en los camiones grúa, permitiendo optimizar recursos y garantizar la seguridad y eficiencia operativa. Este análisis clasifica cada tarea según cinco criterios: frecuencia de fallas (FF), impacto operacional (IO), flexibilidad (F), costo de mantenimiento (CM) e impacto en seguridad, ambiente e higiene (ISAH). Las puntuaciones asignadas a estos criterios se suman para obtener un puntaje total que determina la jerarquía de criticidad: Crítico, Semi Crítico o No Crítico.

Los resultados destacan que tareas como el cambio del pulmón neumático (puntaje: 152), la evaluación del sistema eléctrico (92) y la instalación de la unión neumática (144) tienen criticidad alta. Estas fallas críticas requieren atención inmediata debido a su impacto en la seguridad, costos y continuidad de las operaciones. En contraste, actividades como el relleno de AdBlue (30) y el cambio de la mirilla del tanque hidráulico (6) tienen baja criticidad y se abordan en mantenimientos programados.

La clasificación facilita el diseño de un plan de mantenimiento enfocado en fallas críticas, mientras se optimizan los recursos para tareas de menor impacto. Este enfoque asegura la disponibilidad del equipo, reduce los riesgos operativos y mejora la confiabilidad del sistema, garantizando una operación eficiente y segura en entornos mineros desafiantes.

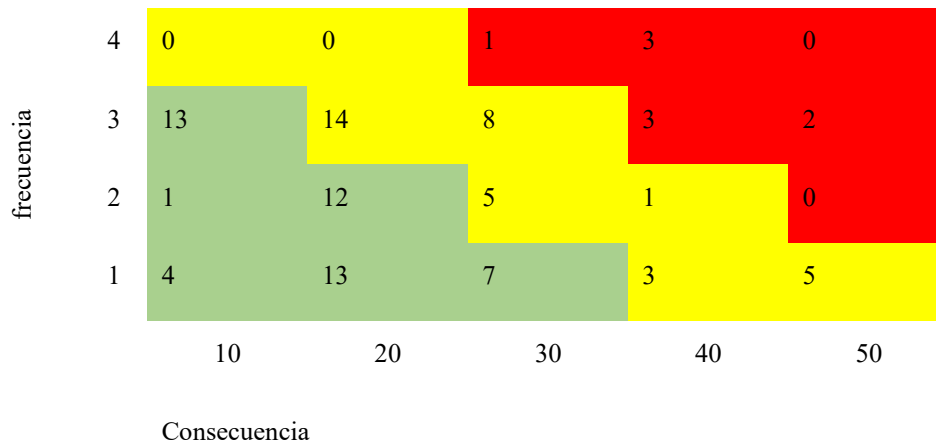
Tabla 7*Criterios para el sistema y su evaluación*

Categoría	Subcategoría	Puntuación
Frecuencia de fallas	Elevado (mayor a 40 fallas/año)	4
	Promedio (20-40 fallas/año)	3
	Buena (10-20 fallas/año)	2
	Excelente (menos de 10 fallas/año)	1
Impacto Operacional	Parada total de la producción	10
	Parada parcial 1 y repercute en otro equipo	7
	Impacta niveles de producción o calidad	5
	Repercute en costos operacionales	2
	No genera ningún efecto significativo	1
Flexibilidad	No existe opción igual o similar de repuesto	4
	El equipo puede seguir funcionando	2
	Existe otro igual o disponible (stand by)	1
Costo de Mantenimiento	Mayor o igual a S/ 700	2
	Inferior a S/ 700	1
Impacto a seguridad, ambiente e higiene	Accidente catastrófico	8
	Accidente mayor serio	6-
	Accidente menor e incidente menor	4
	Cuasi accidente o incidente menor	2
	Desvío	1
	No provoca 2 ningún tipo de riesgo	0

Nota. Los criterios utilizados para el sistema de evaluación fueron: Frecuencia de fallas, impacto operacional, flexibilidad, costo de mantenimiento e impacto a seguridad, ambiente e higiene. La elaboración fue propia.

Figura 3.*Análisis de criticidad*

Matriz de criticidad



Donde

	C: Crítico
	SC: Semi crítico
	NC: No crítico

Nota. El cuadro del análisis de criticidad muestra partes críticas, semi críticas y no críticas en base al criterio de frecuencia de fallas, impacto operacional, Flexibilidad, costo de mantenimiento e impacto a seguridad, ambiente e higiene. La elaboración fue propia.

Criticidad total: Frecuencia de falla * consecuencia

Consecuencia: (Impacto Operacional X Flexibilidad Operacional) + Costo Mantto +

Impacto SAH

FF: Frecuencia de falla

IO: Impacto operacional

F: flexibilidad

CM: Costo de mantenimiento

ISAH: Impacto a seguridad, ambiente e higiene.

C: Consecuencia

Tabla 8

Jerarquización del análisis de criticidad de la flota de camiones grúa

N ^o	Descripción	F F	I O	F	C M	ISA H	C	Tota l	Jerarquía
1	Evaluación del estado de los estabilizadores del camión grúa para asegurar su correcto funcionamiento.	2	4	3	2	7	2 1	42	Semi crítico
2	Programación de mantenimiento cada 1000 horas, que incluye el rellenado de AdBlue, un líquido utilizado para reducir las emisiones contaminantes.	2	6	2	2	1	1 5	30	No crítico
3	Inspección de los neumáticos para verificar su presión, desgaste y seguridad general.	3	4	2	1	3	1 2	36	Semi crítico
4	Evaluación de posibles fugas en el sistema hidráulico, lo cual es crucial para el funcionamiento seguro y eficiente del camión.	3	8	3	1	4	2 9	87	Semi crítico
5	Evaluación del sistema anti bloqueo doble, que previene el mal funcionamiento en situaciones críticas.	1	9	4	2	7	4 5	45	Semi crítico
6	Relleno de AdBlue en el sistema del camión, esencial para la reducción de emisiones.	3	4	2	1	1	1 0	30	No crítico
7	Reparación de la línea del radiador debido a una fuga, lo que es vital para mantener la temperatura del motor.	1	9	4	2	6	4 4	44	Semi crítico

N°	Descripción	FF	IO	F	CM	ISAH	C	Total	Jerarquía
8	Reparación del soporte del brazo del camión grúa para garantizar su estabilidad y funcionalidad.	1	8	4	1	6	39	39	Semi crítico
9	Evaluación del código de la grúa y diagnóstico del ruido anómalo en los frenos para garantizar la seguridad en su operación.	2	6	3	1	8	27	54	Semi crítico
10	Cambio de la válvula moduladora en la parte posterior derecha del camión.	3	5	3	2	8	25	75	Semi crítico
11	Engrasado de los estabilizadores para reducir la fricción y prolongar su vida útil.	3	4	3	1	6	19	57	Semi crítico
12	Cambio de las bandas de freno, una parte esencial para el sistema de frenado del camión.	2	7	4	2	8	38	76	Semi crítico
13	Mantenimiento general del sistema de freno para asegurar su eficacia.	2	5	3	2	8	25	50	Semi crítico
14	Relleno de AdBlue en el sistema, contribuyendo a la reducción de emisiones.	3	4	2	1	1	10	30	No crítico
15	Cambio del pulmón neumático, que es parte del sistema de frenos.	4	7	4	2	8	38	152	Crítico
16	Engrasado de cables para asegurar un funcionamiento suave y evitar desgastes.	1	5	3	2	6	23	23	No crítico
17	Regulación de la pluma del camión grúa para asegurar su correcto funcionamiento y estabilidad.	1	5	3	1	7	23	23	No crítico
18	Instalación de la manguera y abrazadera necesarias para el sistema hidráulico.	3	4	4	1	7	24	72	Semi crítico
19	Instalación de la pértiga y un foco LED para mejorar la visibilidad durante el trabajo.	1	5	2	1	0	11	11	No crítico
20	Evaluación del sistema eléctrico, incluyendo las luces y otros accesorios del camión.	4	8	2	1	6	23	92	Crítico

N°	Descripción	FF	IO	F	CM	ISAH	C	Total	Jerarquía
21	Engrasado de la pluma del camión grúa para asegurar su movimiento suave.	1	5	2	2	5	17	17	No crítico
22	Programación de mantenimiento cada 500 horas, asegurando que el camión se mantenga en condiciones óptimas.	2	6	2	2	1	15	30	No crítico
23	Inspección adicional de los neumáticos.	3	4	2	1	3	12	36	Semi crítico
24	Instalación de la unión neumática, que permite la conexión entre diferentes componentes del sistema.	4	7	4	1	7	36	144	Crítico
25	Engrasado del brazo (boom) y estabilizadores para un funcionamiento eficiente.	1	4	3	2	6	20	20	No crítico
26	Relleno de AdBlue nuevamente, asegurando que el sistema esté completo.	3	4	2	1	1	10	30	No crítico
27	Engrasado del brazo del camión grúa.	1	6	3	2	5	25	25	No crítico
28	Mantenimiento del sistema eléctrico y cambio del foco en la pértiga.	2	6	3	1	2	21	42	Semi crítico
29	Relleno de AdBlue.	3	4	2	1	1	10	30	No crítico
30	Instalación de un sistema de corte de corriente para seguridad.	2	5	2	2	0	12	24	No crítico
31	Evaluación del rozamiento del neumático con el brazo del camión, que puede afectar su operación.	3	4	4	1	3	20	60	Semi crítico
32	Evaluación del sistema de frenos en la parte posterior del camión.	4	7	3	1	8	30	120	Crítico
33	Cambio del interruptor anti bloqueo doble.	1	9	4	2	7	45	45	Semi crítico
34	Toma de medidas de la mirilla para asegurar su correcto funcionamiento.	1	1	2	1	0	3	3	No crítico

N°	Descripción	FF	IO	F	CM	ISAH	C	Total	Jerarquía
35	Evaluación de los estabilizadores y toma de medidas adicionales.	2	4	3	1	6	19	38	Semi crítico
36	Inspección general del equipo para verificar su estado.	3	1	2	1	3	6	18	No crítico
37	Evaluación del sistema de frenos en la parte posterior.	1	7	3	1	8	30	30	No crítico
38	Relleno de AdBlue.	3	4	2	1	1	10	30	No crítico
39	Cambio de las plumillas y del motor del limpiaparabrisas.	1	4	3	1	1	14	14	No crítico
40	Cambio de los pulmones de freno y la válvula ABS.	3	8	4	2	8	42	126	Crítico
41	Cambio de los neumáticos delanteros.	3	4	1	2	7	13	39	Semi crítico
42	Rotación de los neumáticos en la parte posterior.	3	4	2	1	3	12	36	Semi crítico
43	Programación de mantenimiento cada 500 horas, incluyendo el relleno de AdBlue.	2	6	2	2	1	15	30	No crítico
44	Programación de mantenimiento para la grúa cada 1000 horas.	2	6	2	2	1	15	30	No crítico
45	Certificación del equipo de la grúa.	3	6	4	2	7	33	99	Crítico
46	Programación de mantenimiento cada 500 horas.	2	6	2	2	1	15	30	No crítico
47	Inspección de neumáticos.	3	4	2	1	3	12	36	Semi crítico
48	Relleno de AdBlue.	3	4	2	1	1	10	30	No crítico
49	Inspección y arranque del equipo.	3	1	2	1	3	6	18	No crítico
50	Instalación del cilindro neumático posterior número 6.	3	7	4	2	7	37	111	Crítico

N°	Descripción	FF	IO	F	CM	ISAH	C	Total	Jerarquía
51	Relleno de AdBlue.	3	4	2	1	1	10	30	No critico
52	Programación de mantenimiento cada 1000 horas.	2	6	2	2	1	15	30	No critico
53	Inspección de neumáticos.	3	4	1	1	5	10	30	No critico
54	Inspección de las cadenas posteriores izquierda y derecha.	1	1	2	1	0	3	3	No critico
55	Cambio del interruptor de señal de giro.	1	4	3	2	1	15	15	No critico
56	Sellado de la cabina para evitar filtraciones.	1	4	3	1	0	13	13	No critico
57	Servicio especializado para la inspección y evaluación del equipo TREX.	3	5	3	2	4	21	63	Semi critico
58	Evaluación de la canastilla.	1	8	4	1	8	41	41	Semi critico
59	Servicio especializado para la inspección y evaluación del equipo TREX.	3	5	3	2	4	21	63	Semi critico
60	Instalación del faro neblinero.	3	5	3	1	6	22	66	Semi critico
61	Evaluación de las mangueras hidráulicas.	3	5	4	1	7	28	84	Semi critico
62	Inspección y arranque del equipo.	3	1	2	1	3	6	18	No critico
63	Reforzamiento de la soldadura del guardafango.	2	6	3	2	5	25	50	Semi critico
64	Instalación de neumáticos.	3	4	2	1	3	12	36	Semi critico
65	Instalación de la pértiga.	1	4	2	1	0	9	9	No critico
66	Cambio de los amortiguadores delanteros derecho e izquierdo.	1	6	3	2	4	24	24	No critico
67	Programación de mantenimiento cada 250 horas.	2	6	2	2	1	15	30	No critico
68	Inspección de neumáticos.	3	4	2	1	3	12	36	Semi critico
69	Evaluación del sistema de dirección derecha.	1	4	3	1	6	19	19	No critico
70	Relleno de AdBlue.	3	4	2	1	1	10	30	No critico

N°	Descripción	FF	IO	F	CM	ISAH	C	Total	Jerarquía
71	Inspección del sistema eléctrico del tablero para asegurar que todos los componentes funcionen correctamente.	2	4	2	1	3	12	24	No critico
72	Cambio de los faros direccionales delanteros izquierdo para garantizar la señalización adecuada del camión.	3	4	4	2	4	22	66	Semi critico
73	Cambio de la válvula distribuidora, que controla el flujo de fluidos en el sistema hidráulico.	3	8	4	2	7	41	123	Critico
74	Cambio de la mirilla del tanque hidráulico para facilitar la verificación del nivel del líquido.	1	4	1	1	1	6	6	No critico
75	Engrasado de los estabilizadores para asegurar su correcto funcionamiento y reducir el desgaste.	1	4	3	1	6	19	19	No critico
76	Evaluación de las almohadillas de los estabilizadores para garantizar que estén en buen estado.	1	4	3	1	3	16	16	No critico
77	Evaluación del sistema de freno de la canastilla para asegurar su efectividad.	1	8	4	1	8	41	41	Semi critico
78	Cambio del perno de regulación del tope de dirección para mejorar el control del vehículo.	1	3	3	1	2	12	12	No critico
79	Reparación del guardafango, que protege las partes inferiores del camión de escombros y suciedad.	1	7	4	2	4	34	34	Semi critico
80	Programación de mantenimiento cada 500 horas para asegurar el rendimiento continuo del camión.	2	6	2	2	1	15	30	No critico
81	Inspección de neumáticos para verificar su estado y presión.	3	4	2	1	3	12	36	Semi critico

N°	Descripción	FF	IO	F	CM	ISAH	C	Total	Jerarquía
82	Cambio de los amortiguadores traseros para mejorar la estabilidad y confort del camión.	1	4	3	2	4	18	18	No critico
83	Cambio de los amortiguadores delanteros para asegurar la correcta respuesta de la dirección y el manejo del camión.	1	6	3	2	5	25	25	No critico
84	Evaluación del sistema de dirección para garantizar un control adecuado del camión.	1	4	4	1	5	22	22	No critico
85	Fabricación o reparación de la soportería del chasis en el lado izquierdo, crucial para la integridad estructural del camión.	1	8	3	2	7	33	33	No critico
86	Cambio del faro direccional para asegurar que las señales de giro sean visibles.	3	4	3	1	6	19	57	Semi critico
87	Evaluación del sistema de circulina, que es utilizado para la orientación del equipo.	3	4	2	1	3	12	36	Semi critico
88	Instalación del faro delantero bajo para mejorar la visibilidad en condiciones de poca luz.	3	6	4	1	7	32	96	Critico
89	Reparación del capó para asegurar que se cierre correctamente y proteja los componentes del motor.	1	4	3	1	3	16	16	No critico
90	Programación de mantenimiento preventivo cada 3000 horas para el modelo T800 con capacidad de 22 toneladas.	2	6	2	2	1	15	30	No critico
91	Inspección de neumáticos para verificar su estado.	3	4	2	1	3	12	36	Semi critico

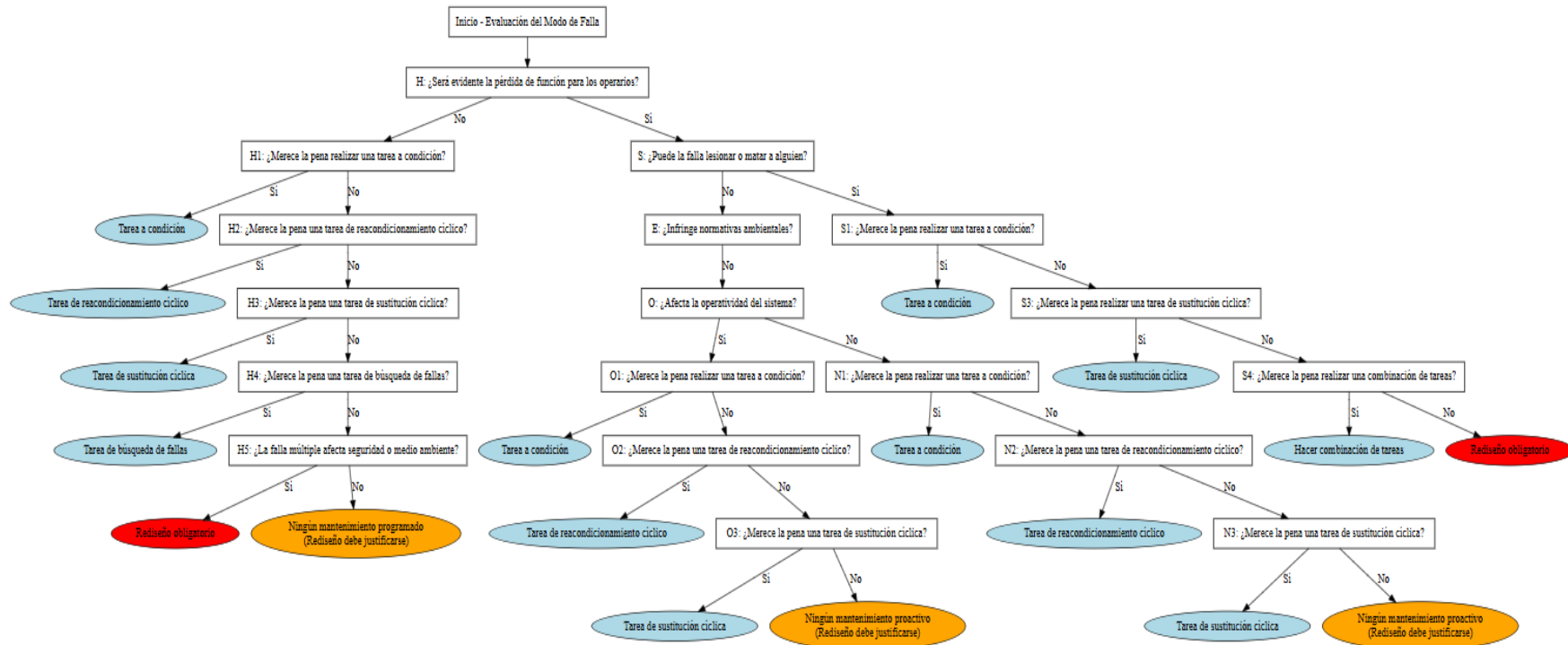
N°	Descripción	FF	IO	F	CM	ISAH	C	Total	Jerarquía
92	Instalación de la pértiga para el uso adecuado en operaciones de elevación.	1	5	2	1	0	11	11	No critico
93	Relleno de AdBlue para asegurar que el sistema de reducción de emisiones funcione correctamente.	3	4	2	1	1	10	30	No critico
94	Rotación de los neumáticos para asegurar un desgaste uniforme y prolongar su vida útil.	3	4	2	1	3	12	36	Semi critico
95	Mantenimiento correctivo de muestreo de aceite.	2	1	2	1	0	3	6	No critico

Nota. Los criterios utilizados para el sistema de evaluación fueron: Frecuencia de fallas, impacto operacional, flexibilidad, costo de mantenimiento e impacto a seguridad, ambiente e higiene. La elaboración fue propia.

4.2.8. Diagrama de decisiones

Figura 4.

Diagrama de decisiones



Nota. Se muestra la estructura para la toma de decisiones adaptado de mantenimiento centrado en confiabilidad de Moubray, J. (2004)

Hoja de decisiones

Tabla 9*Hoja de decisiones*

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de			Tarea propuesta	Intervalo inicial	A realizarse por:			
F	FF	FM	H	S	E	O	S1	S2	S3	O1	O2	O3				H4	H5	S4
1	A	1	S	S			S	N	S							Aplicar mantenimiento predictivo o preventivo (según condición del pulmón y tiempo de uso). Monitorear fugas o pérdida de presión en inspecciones regulares. Realizar cambio programado basado en vida útil del componente. La certificación es un proceso que evalúa la integridad de la grúa periódicamente.	250 horas	2 técnicos
2	A	1	N				N	N	N	S						Permite identificar fallas que no serían detectadas en operación normal. Es obligatoria para cumplir normativas de seguridad industrial.	6 meses	2 técnicos y 1 operador
3	A	1	N	S	N	S	N	N	S							Sustitución cíclica, si la unión tiene desgaste predecible y una vida útil definida. Búsqueda de fallas, si se requiere inspección regular para detectar fallos antes de una avería grave.	250 horas	2 técnicos
4	A	1	S	N	N	S	N	S								Verificar la presión neumática del cilindro mediante sensores y diagnósticos OBD. Inspeccionar visualmente la presencia de fugas o desgaste en conexiones. Revisar códigos de error en el sistema electrónico del camión.	1000 horas	2 técnicos

Referencia de información								H1	H2	H3	Acción a falta de	Tarea propuesta	Intervalo inicial	A realizarse por:
Evaluación de las consecuencias								S1	S2	S3				
								O1	O1	O3				
								N1	N2	N3				
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4		
5	A	1	S	S			N	N	S		Realizar inspección visual y funcional del sistema de frenos posterior, midiendo presión, verificando fugas, desgaste de zapatas/discos y calibración.	500 horas	2 técnicos y 1 operador	
6	A	1	S	S			N	N	S		Inspeccionar luces, conexiones y fusibles; medir voltaje de baterías y alternador; revisar cortocircuitos y sobrecargas; ajustar conexiones y sustituir componentes defectuosos para garantizar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico del camión.	500 horas	2 técnicos	
7	A	1	N				N	N	S		Inspeccionar fugas y presión de la válvula, limpiar y reemplazar sellos, lubricar componentes, sustituir según vida útil, realizar pruebas hidráulicas.	1000 horas	4 técnicos y 1 operador	
8	A	1	S	S	S		N	N	S		Inspeccionar y limpiar el faro, verificar conexiones eléctricas, ajustar posición, medir intensidad lumínica, sustituir bombilla o LED según vida útil y realizar pruebas para garantizar visibilidad óptima y cumplimiento normativo	500 horas	1 técnicos	

Referencia de información								H1	H2	H3	Acción a falta de			Tarea propuesta	Intervalo inicial	A realizarse por:		
F	FF	FM	H	S	E	O	S1	S2	S3	O1	O2	O3	H4	H5	S4			
9	A	1	S	S			N	N	S							Inspeccionar y limpiar el faro, verificar conexiones eléctricas, ajustar posición, medir intensidad lumínica, sustituir bombilla o LED s Inspeccionar fugas y presión de pulmones de freno, verificar activación del ABS, limpiar conexiones, ajustar componentes, sustituir según vida útil y realizar pruebas de frenado para garantizar seguridad y cumplimiento normativo según vida útil y realizar pruebas para garantizar visibilidad óptima y cumplimiento normativo	1000 horas	2 técnicos

Nota. Se presenta la hoja de decisiones para las fallas críticas. La elaboración fue propia

4.2.9. Ficha informativa

Tabla 10*Ficha informativa*

Nº	Función	Modos de falla	Efecto de falla
1	Estabilizadores del equipo	Desgaste o daño en los estabilizadores	Inestabilidad del equipo, afectando la seguridad y el rendimiento en operaciones.
2	Mantenimiento cada 1000 horas (incluyendo AdBlue)	No realizar mantenimiento adecuado o en el intervalo indicado	Fallas mecánicas, tiempos de inactividad no programados, daños a largo plazo.
3	Inspección de neumáticos	Desgaste, daño o mala presión de los neumáticos	Pérdida de tracción, aumento del riesgo de accidentes, y mayor desgaste de otros componentes.
4	Evaluación de fugas en el sistema hidráulico	Fugas en las conexiones o componentes del sistema hidráulico	Pérdida de presión, fallos en el funcionamiento de la maquinaria.
5	Sistema anti-bloqueo de doble	Fallo en los sensores o mal funcionamiento del sistema anti-bloqueo	Riesgo de bloqueos de frenos, afectando la seguridad del equipo.
6	Relleno de AdBlue en el sistema	No rellenado adecuado o falta de AdBlue	Aumento de emisiones contaminantes y posible daño al sistema de escape del motor.
7	Reparación de la línea del radiador	Fugas en la línea del radiador	Sobrecalentamiento del motor y posible daño al sistema de refrigeración.
8	Reparación del soporte del brazo del equipo	Daño o desgaste en los soportes del brazo	Pérdida de estabilidad y control, afectando la precisión de movimientos.
9	Evaluación del código de la grúa y los frenos	Fallo en el sistema de diagnóstico de la grúa o ruidos en los frenos	Pérdida de eficiencia operativa y posible fallo en el sistema de frenado.
10	Cambio de válvula moduladora en la parte posterior derecha	Mal funcionamiento de la válvula o daño en los componentes hidráulicos	Desajustes en la presión del sistema hidráulico, afectando el control y funcionamiento.

Nº	Función	Modos de falla	Efecto de falla
11	Engrasado de estabilizadores	Falta de lubricación o engrase insuficiente	Desgaste prematuro de los componentes, pérdida de funcionalidad de estabilizadores.
12	Cambio de las bandas de freno	Desgaste excesivo o daño en las bandas de freno	Pérdida de capacidad de frenado, lo que puede comprometer la seguridad operativa y aumentar el riesgo de accidentes.
13	Cambio de las bandas de freno	Desgaste o daño de las bandas de freno	Pérdida de capacidad de frenado, comprometiendo la seguridad del equipo.
14	Mantenimiento del sistema de freno	Desgaste o mal funcionamiento de componentes del sistema de freno	Pérdida de efectividad en el frenado, riesgo de accidentes.
15	Cambio del pulmón neumático	Daño o desgaste en los pulmones neumáticos	Pérdida de presión en los sistemas neumáticos, afectando la operación del equipo.
16	Engrasado de cables	Falta de lubricación o deterioro de los cables	Aumento de la fricción, lo que puede llevar a fallos en el sistema.
17	Regulación de la pluma	Desajustes o mal funcionamiento de la pluma	Reducción de la precisión y eficiencia del equipo, mayor riesgo de accidentes.
18	Instalación de manguera y abrazadera	Mala instalación o fallo de las mangueras y abrazaderas	Fugas, pérdida de presión, y mal funcionamiento de los sistemas hidráulicos.
19	Instalación de la pértiga y el foco LED	Falla en los componentes eléctricos o mala instalación	Foco LED inoperativo, visibilidad reducida, aumento del riesgo de accidentes.
20	Instalación de la pértiga y el foco LED	Falla en los componentes eléctricos o mala instalación	Foco LED inoperativo, visibilidad reducida, aumento del riesgo de accidentes.
21	Evaluación del sistema eléctrico, luces y accesorios	Cortocircuitos, fallos en cables o conexiones eléctricas	Pérdida de control del sistema eléctrico, posible mal funcionamiento de luces y accesorios.

N°	Función	Modos de falla	Efecto de falla
22	Engrasado de la pluma	Falta de lubricación o engrase insuficiente	Desgaste prematuro, reducción de la vida útil de los componentes de la pluma.
23	Mantenimiento cada 500 horas	No realizar mantenimiento en el intervalo adecuado	Fallos operacionales, daños por desgaste prematuro, reducción de la vida útil del equipo.
24	Inspección de neumáticos	Desgaste, daño o presión incorrecta en los neumáticos	Riesgo de accidentes por pérdida de tracción, mayor desgaste de otros componentes.
25	Instalación de la unión neumática	Falla en la unión o mala instalación de la conexión neumática	Pérdida de presión, mal funcionamiento de los sistemas neumáticos.
26	Engrasado del brazo y estabilizadores	Falta de lubricación o engrase insuficiente	Desgaste acelerado de los componentes, pérdida de funcionalidad.
27	Relleno de AdBlue	No rellenado adecuado o falta de AdBlue	Aumento de emisiones contaminantes, posible daño al sistema de escape del motor.
28	Engrasado del brazo del equipo	Falta de engrase o lubricación insuficiente	Aumento de la fricción, desgaste prematuro y mal funcionamiento del equipo.
29	Mantenimiento del sistema eléctrico y cambio del foco de la pértiga	Falla en el sistema eléctrico o en el foco	Pérdida de visibilidad, fallo en los sistemas de control eléctrico.
30	Instalación del sistema de corte de corriente	Mal funcionamiento de los interruptores o mal ajuste en el sistema	Peligro de cortocircuitos o daños eléctricos, afectando otros sistemas del equipo.
31	Evaluación del rozamiento del neumático con el brazo	Desalineación o contacto incorrecto entre neumático y brazo	Desgaste excesivo de los neumáticos, mayor riesgo de daño en otros componentes.
32	Evaluación del sistema de frenos en la parte posterior	Desgaste de componentes del sistema de frenos posterior	Pérdida de capacidad de frenado, mayor riesgo de accidentes.

N°	Función	Modos de falla	Efecto de falla
33	Cambio del interruptor anti bloqueo doble	Mal funcionamiento del interruptor o daño en los circuitos de señalización	Fallos en el sistema anti-bloqueo, afectando la seguridad durante las maniobras.
34	Toma de medidas de la mirilla	Error en la medición o daño en el equipo de medición	Medición incorrecta, posible daño a componentes relacionados.
35	Evaluación de los estabilizadores y toma de medidas	Desgaste de los estabilizadores o mal ajuste	Inestabilidad del equipo, reducción de la eficiencia operativa y riesgo de daño a otros componentes.
36	Inspección general del equipo	Desgaste o fallo generalizado en componentes del equipo	Fallos múltiples, afectando la operación general y aumentando el tiempo de inactividad.
37	Evaluación de los frenos en la parte posterior	Desgaste o mal funcionamiento de los frenos traseros	Pérdida de capacidad de frenado, riesgo de accidentes.
38	Relleno de AdBlue	No relleno adecuado o falta de AdBlue	Aumento de emisiones contaminantes, posible daño al sistema de escape del motor.
39	Cambio de las plumillas y motor del limpiaparabrisas	Desgaste de las plumillas o motor del limpiaparabrisas	Reducción de visibilidad, aumentando el riesgo de accidentes en condiciones climáticas adversas.
40	Cambio de los pulmones de freno y válvula ABS	Desgaste o mal funcionamiento de los pulmones o válvula ABS	Pérdida de capacidad de frenado, riesgo de pérdida de control del vehículo.
41	Cambio de los neumáticos delanteros	Desgaste o daño en los neumáticos delanteros	Pérdida de tracción, aumento del riesgo de accidentes.
42	Rotación de los neumáticos en la parte posterior	Desgaste irregular o mala rotación de neumáticos	Desgaste no uniforme, mayor riesgo de daño a otros componentes y menor eficiencia operativa.
43	Mantenimiento cada 500 horas (incluyendo AdBlue)	No realizar mantenimiento adecuado o a tiempo	Fallos mecánicos, tiempos de inactividad no programados, posibles daños a largo plazo.

N°	Función	Modos de falla	Efecto de falla
44	Mantenimiento para la grúa cada 1000 horas	Falta de mantenimiento o retraso en la programación	Fallos operacionales en la grúa, afectando la carga y operación de la maquinaria.
45	Certificación del equipo de la grúa	No realizar la certificación o no cumplir con los estándares requeridos	Pérdida de conformidad operativa, posibles problemas legales y de seguridad.
46	Mantenimiento cada 500 horas	No realizar el mantenimiento según el intervalo recomendado	Desgaste prematuro de componentes, fallos operacionales y paradas inesperadas.
47	Inspección de neumáticos	Desgaste, daño o mala presión de los neumáticos	Riesgo de accidentes, pérdida de estabilidad y tracción, aumento de desgaste de otros componentes.
48	Relleno de AdBlue	Falta de AdBlue o mal relleno	Aumento de emisiones contaminantes y posible daño al sistema de escape del motor.
49	Inspección y arranque del equipo	Fallo en el sistema de arranque o deficiencias en el equipo	Paradas no planificadas, reducción de la disponibilidad del equipo.
50	Instalación del cilindro neumático posterior número 6	Falla en la instalación o daño del cilindro neumático	Pérdida de funcionalidad en el sistema neumático, afectando el rendimiento general.
51	Relleno de AdBlue	No relleno adecuado o falta de AdBlue	Aumento de emisiones contaminantes, posible daño al sistema de escape del motor.
52	Programación de mantenimiento cada 1000 horas	Falta de mantenimiento o retraso en la programación	Fallos operacionales, daño a largo plazo de los componentes, tiempos de inactividad no planificados.
53	Inspección de neumáticos	Desgaste, daño o presión incorrecta en los neumáticos	Pérdida de tracción, mayor desgaste de otros componentes, riesgo de accidentes.
54	Inspección de las cadenas posteriores izquierda y derecha	Desgaste o daño en las cadenas	Pérdida de eficiencia operativa, mayor riesgo de daño a otros componentes.

N°	Función	Modos de falla	Efecto de falla
55	Cambio del interruptor de señal de giro	Mal funcionamiento del interruptor	Falta de señalización adecuada, mayor riesgo de accidentes.
56	Sellado de la cabina	Fugas o mala instalación de los sellos de la cabina	Ingreso de polvo, agua o ruido excesivo, reducción de la comodidad y seguridad del operador.
57	Servicio especializado para la inspección y evaluación del equipo TREX	No realizar una inspección adecuada o realizarla fuera del tiempo indicado	Fallos no detectados a tiempo, afectando la seguridad y eficiencia operativa del equipo.
58	Evaluación de la canastilla	Daños o desgaste de la canastilla	Riesgo de accidentes o mal funcionamiento del equipo debido a fallos estructurales.
59	Servicio especializado para la inspección y evaluación del equipo TREX	Falta de inspección o evaluación incorrecta	No detección de fallos o problemas en el equipo, lo que puede llevar a fallas operativas graves, aumento de costos de reparación y tiempos de inactividad.
60	Instalación del faro neblinero	Falla en la instalación o mal funcionamiento del faro	Reducción de visibilidad en condiciones climáticas adversas, mayor riesgo de accidentes.
61	Evaluación de las mangueras hidráulicas	Fugas o desgaste en las mangueras hidráulicas	Pérdida de presión, fallos en el funcionamiento de los sistemas hidráulicos.
62	Inspección y arranque del equipo	Deficiencias en el arranque o problemas en el sistema de encendido	Paradas no planificadas, tiempos de inactividad inesperados.
63	Reforzamiento de la soldadura del guardafango	Falla en la soldadura o daño en el guardafango	Pérdida de protección, posible daño a otras partes del vehículo debido a la falta de refuerzo.
64	Instalación de neumáticos	Neumáticos mal instalados o de baja calidad	Pérdida de tracción, reducción de estabilidad y aumento del riesgo de accidentes.
65	Instalación de la pértiga	Instalación incorrecta o daños en la pértiga	Pérdida de funcionalidad en el equipo, afectando la capacidad de operar de manera segura.
66	Cambio de los amortiguadores delanteros derecho e izquierdo	Desgaste o mal funcionamiento de los amortiguadores	Pérdida de absorción de impactos, menor estabilidad y confort al conducir.

N°	Función	Modos de falla	Efecto de falla
67	Programación de mantenimiento cada 250 horas	No realizar mantenimiento en el intervalo adecuado	Desgaste prematuro de componentes, fallos operacionales, tiempos de inactividad no programados.
68	Inspección de neumáticos	Desgaste, daño o presión incorrecta en los neumáticos	Pérdida de tracción, aumento del riesgo de accidentes, desgaste acelerado de otros componentes.
69	Evaluación del sistema de dirección derecha	Mal funcionamiento o desajuste en el sistema de dirección	Pérdida de control de dirección, lo que puede comprometer la seguridad operativa del vehículo.
70	Relleno de AdBlue	No rellenado adecuado o falta de AdBlue	Aumento de emisiones contaminantes, posible daño al sistema de escape del motor.
71	Inspección del sistema eléctrico del tablero	Cortocircuitos, fallos en los cables o componentes del sistema eléctrico	Pérdida de señalización y control, posible mal funcionamiento de otros sistemas eléctricos.
72	Cambio de los faros direccionales delanteros izquierdo	Falla en los faros o daños en las luces	Reducción de visibilidad y señalización, mayor riesgo de accidentes.
73	Cambio de la válvula distribuidora	Desgaste o fallo de la válvula distribuidora	Desajuste en el flujo de fluidos, afectando la eficiencia y el control del sistema hidráulico.
74	Cambio de la mirilla del tanque hidráulico	Falla en la mirilla o daño en el componente	Dificultad para visualizar el nivel del fluido, riesgo de operación sin lubricación adecuada.
75	Engrasado de estabilizadores	Falta de lubricación o engrase insuficiente	Desgaste prematuro, reducción de la vida útil de los estabilizadores y componentes asociados.
76	Evaluación de las almohadillas de los estabilizadores	Desgaste o mal estado de las almohadillas	Pérdida de estabilidad y eficiencia de los estabilizadores, afectando la seguridad.
77	Evaluación del freno de la canastilla	Desgaste o mal funcionamiento del sistema de freno	Pérdida de capacidad de frenado, mayor riesgo de accidentes, especialmente en maniobras.
78	Cambio del perno de regulación del tope de dirección	Desgaste o daño en el perno	Mal ajuste de la dirección, afectando la maniobrabilidad del equipo.

N°	Función	Modos de falla	Efecto de falla
79	Reparación del guardafango	Daño o desgaste del guardafango	Protección insuficiente, mayor riesgo de daño en otras partes del vehículo debido a la falta de protección.
80	Programación de mantenimiento cada 500 horas	No realizar el mantenimiento adecuado o en el intervalo indicado	Daño en componentes clave por desgaste no detectado, aumento de los costos de reparación a largo plazo.
81	Inspección de neumáticos	Desgaste, daño o presión incorrecta en los neumáticos	Pérdida de tracción, mayor desgaste de otros componentes, aumento del riesgo de accidentes.
82	Cambio de los amortiguadores posteriores	Desgaste o mal funcionamiento de los amortiguadores	Pérdida de absorción de impactos, menor estabilidad y confort al conducir.
83	Cambio de los amortiguadores delanteros	Desgaste o mal funcionamiento de los amortiguadores	Pérdida de absorción de impactos, menor estabilidad y confort al conducir.
84	Evaluación del sistema de dirección	Desgaste o mal funcionamiento en los componentes de dirección	Pérdida de control, mayor riesgo de accidentes debido a la falta de maniobrabilidad.
85	Fabricación o reparación de la soportería del chasis	Daños o desgaste en la estructura del chasis	Pérdida de estabilidad estructural, afectando la seguridad y la operatividad del equipo.
86	Cambio del faro direccional	Daño o mal funcionamiento de los faros	Reducción de visibilidad y señalización, mayor riesgo de accidentes, especialmente en condiciones de baja visibilidad.
87	Evaluación de la circulina	Desgaste o mal estado de la circulina	Pérdida de control o eficiencia en las maniobras, afectando la operación del equipo.
88	Instalación del faro delantero bajo	Falla en los componentes o mala instalación	Pérdida de visibilidad en condiciones de poca luz, mayor riesgo de accidentes.

N°	Función	Modos de falla	Efecto de falla
89	Reparación del capó	Daño o desgaste en el capó	Exposición de componentes internos del vehículo a daños, pérdida de protección.
90	Mantenimiento preventivo cada 3000 horas	No realizar el mantenimiento en el intervalo recomendado	Desgaste prematuro de componentes, fallos operacionales y tiempos de inactividad no planificados.
91	Inspección de neumáticos	Desgaste, daño o presión incorrecta en los neumáticos	Pérdida de tracción, mayor desgaste de otros componentes, riesgo de accidentes.
92	Instalación de la pértiga	Instalación incorrecta o daño en la pértiga	Pérdida de funcionalidad en el equipo, afectando la capacidad de operar de manera segura.
93	Relleno de AdBlue	No rellenado adecuado o falta de AdBlue	Aumento de emisiones contaminantes, posible daño al sistema de escape del motor.
94	Rotación de los neumáticos	Desgaste irregular o mala rotación	Desgaste no uniforme, mayor riesgo de daño a otros componentes, menor eficiencia operativa.
95	Muestreo del aceite para análisis	No tomar muestras o análisis incorrecto del aceite	No detección de contaminación o problemas en el sistema de lubricación, afectando la vida útil del motor.

Nota. Se presenta la ficha informativa en función de los modos de falla y su efecto de falla. La elaboración fue propia

4.2.10. Resultados de KPI's de la flota de camiones grúa

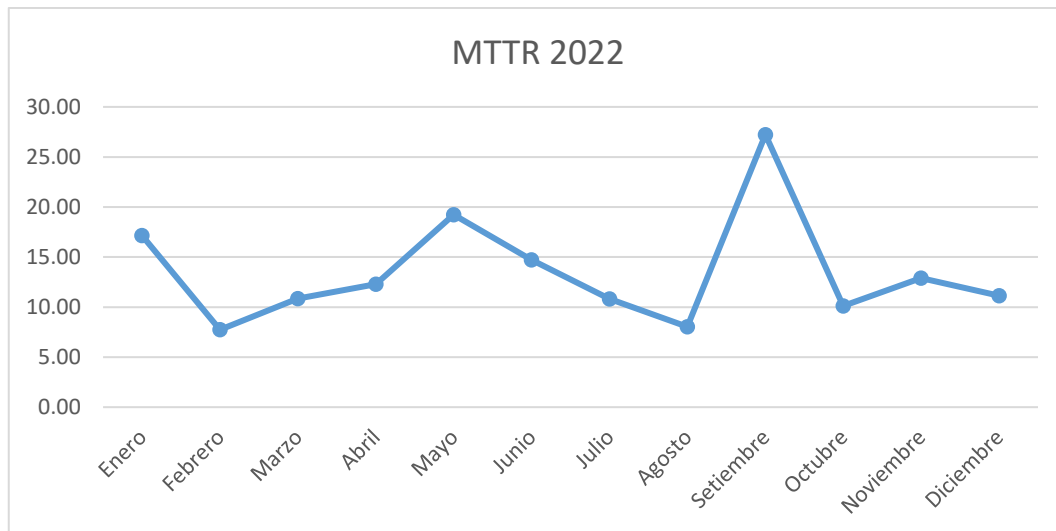
Tabla 11*Indicadores clave de desempeño del 2022*

Año	Mes	Días	Tiempo de operación (Horas)	Tiempo de reparación (Horas)	Numero de falla	MTTR	MTBF	DM	DM (%)
2022	Enero	31	290	223	13	17,15	22,31	0,565	56,53
2022	Febrero	28	503	116	15	7,73	33,53	0,813	81,26
2022	Marzo	31	505	271	25	10,84	20,20	0,651	65,08
2022	Abril	30	604	135	11	12,27	54,91	0,817	81,73
2022	Mayo	31	673	327	17	19,24	39,59	0,673	67,30
2022	Junio	30	685	206	14	14,71	48,93	0,769	76,88
2022	Julio	31	705	335	31	10,81	22,74	0,678	67,79
2022	Agosto	31	590	265	33	8,03	17,88	0,690	69,01
2022	Setiembre	30	664	354	13	27,23	51,08	0,652	65,23
2022	Octubre	31	456	162	16	10,13	28,50	0,738	73,79
2022	Noviembre	30	605	232	18	12,89	33,61	0,723	72,28
2022	Diciembre	31	520	301	27	11,15	19,26	0,633	63,34

Nota. Se muestran los indicadores de los KPI's de la flota de camiones grúa en el año 2022. La elaboración fue propia

Figura 5.

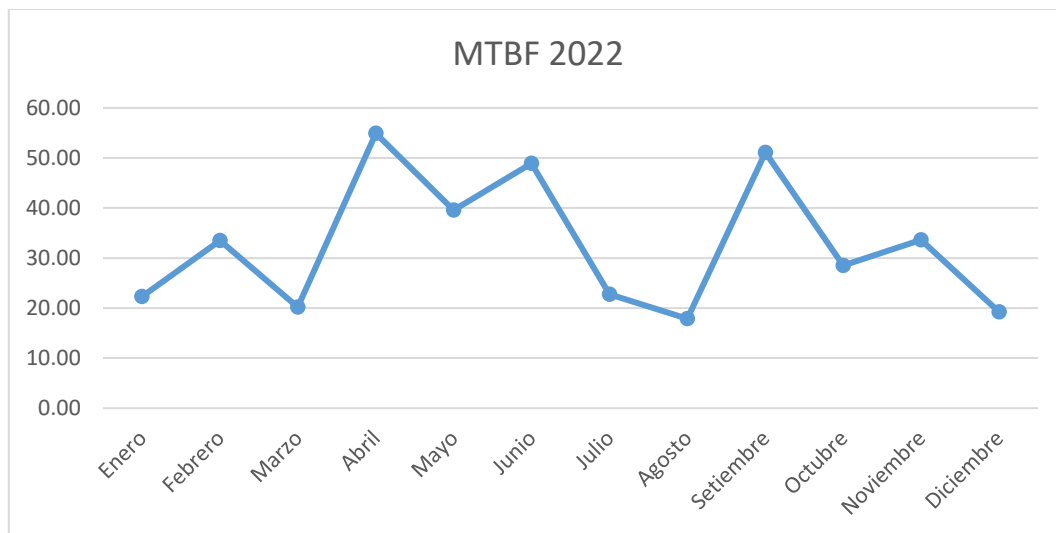
Tiempo medio de reparación del año 2022



Nota. La figura muestra la evolución del tiempo medio de reparación durante del año 2022. La elaboración es propia.

Figura 6.

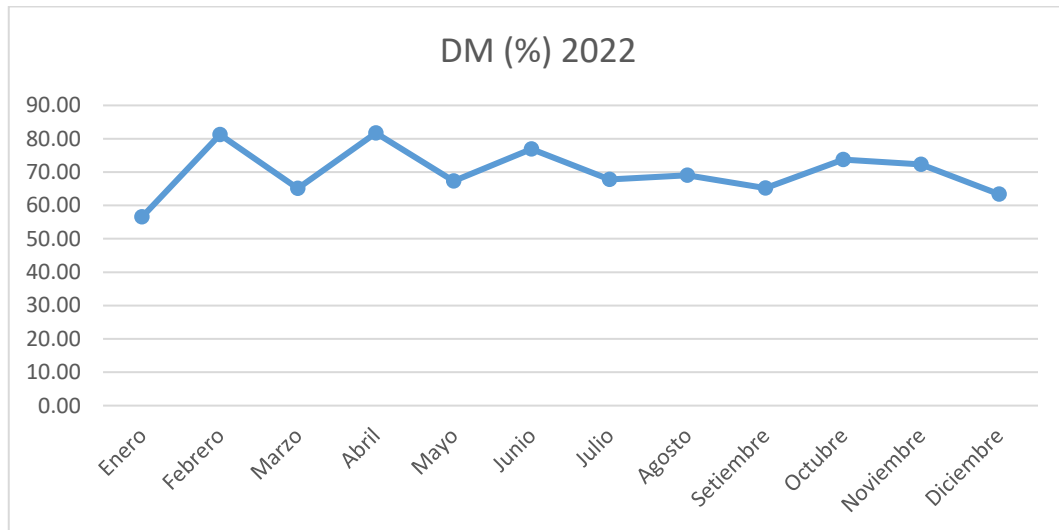
Tiempo medio entre fallas del año 2022



Nota. La figura muestra la evolución del tiempo medio entre fallas durante del año 2022. La elaboración es propia.

Figura 7.

Disponibilidad mecánica del año 2022.



Nota. La figura muestra la evolución de la disponibilidad mecánica durante del año 2022.
La elaboración es propia.

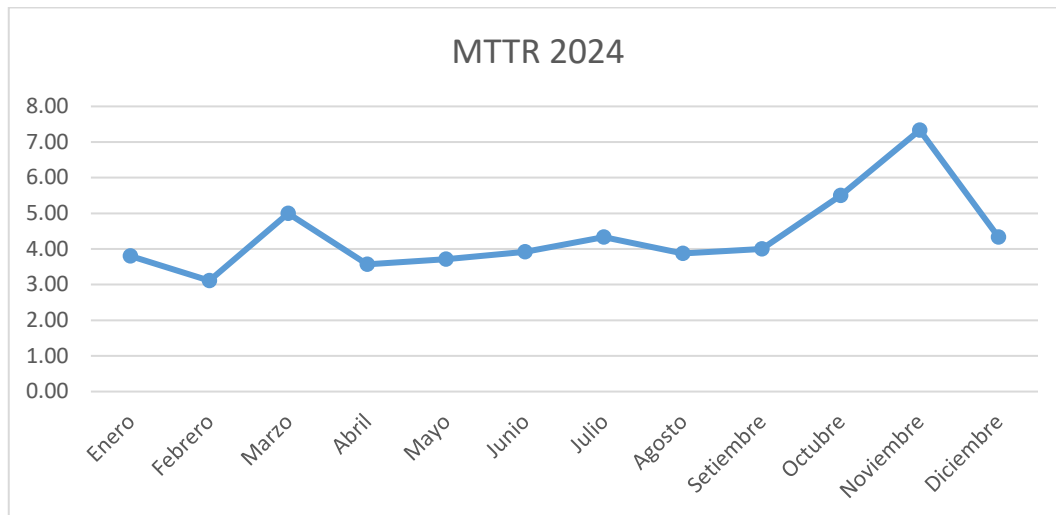
Tabla 12*Indicadores clave de desempeño del 2024.*

Año	Mes	Días	Tiempo de operación	Tiempo de reparación	Numero de falla	MTTR	MTBF	DM	DM (%)
2024	Enero	31	426	19	5	3,80	85,20	0,957	95,73
2024	Febrero	28	521,9	28	9	3,11	57,99	0,949	94,91
2024	Marzo	31	666	60	12	5,00	55,50	0,917	91,74
2024	Abril	30	471,1	25	7	3,57	67,30	0,950	94,96
2024	Mayo	31	521	26	7	3,71	74,43	0,952	95,25
2024	Junio	30	680	47	12	3,92	56,67	0,935	93,54
2024	Julio	31	514	39	9	4,33	57,11	0,929	92,95
2024	Agosto	31	381,9	31	8	3,88	47,74	0,925	92,49
2024	Setiembre	30	490	20	5	4,00	98,00	0,961	96,08
2024	Octubre	31	694	66	12	5,50	57,83	0,913	91,32
2024	Noviembre	30	540	44	6	7,33	90,00	0,925	92,47
2024	Diciembre	31	495	26	6	4,33	82,50	0,950	95,01

Nota. Se muestran los indicadores de desempeño para el año 2024 obteniendo un aumento de la disponibilidad mecánica. La elaboración fue propia.

Figura 8.

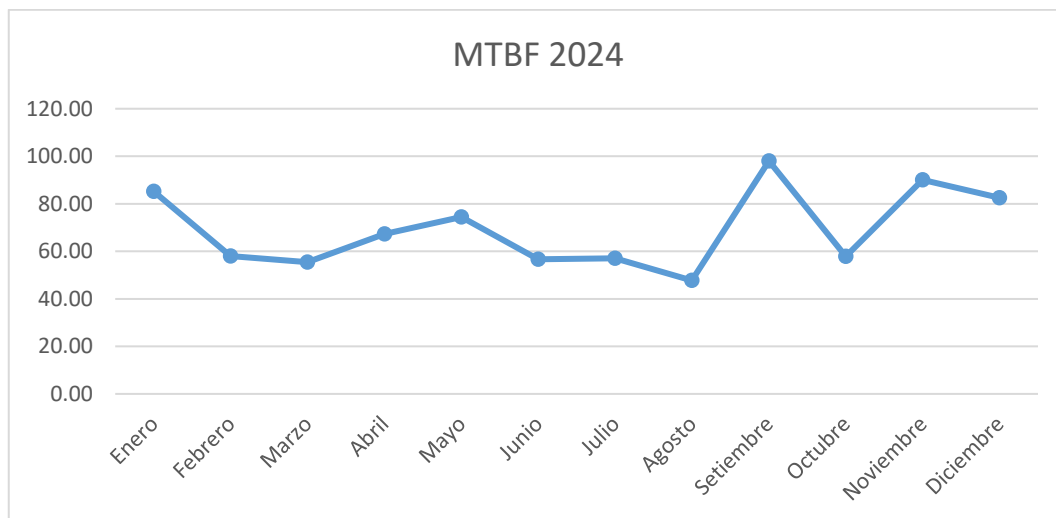
Tiempo medio de reparación del año 2024.



Nota. La figura muestra la evolución del tiempo medio de reparación durante del año 2024. La elaboración es propia.

Figura 9.

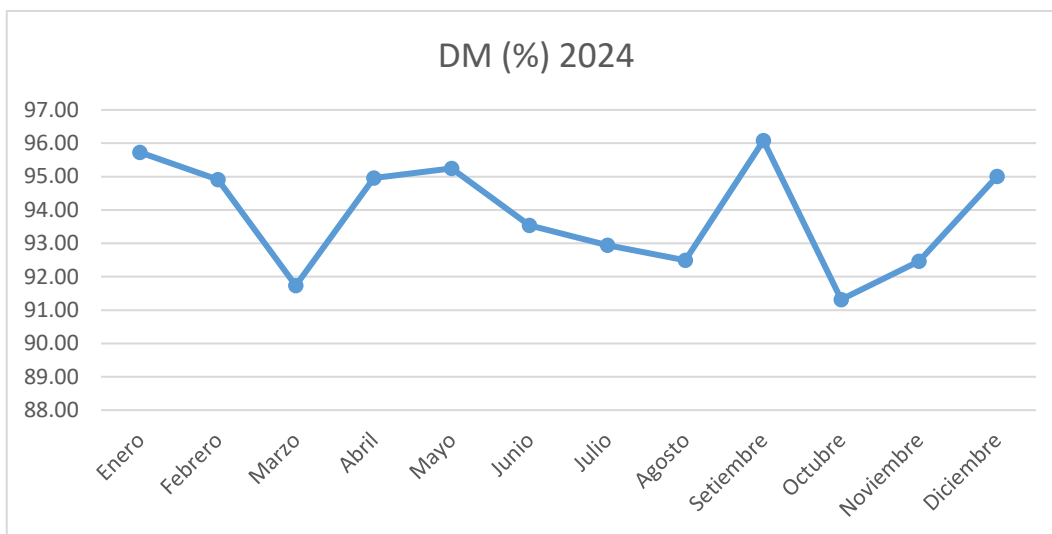
Tiempo medio entre fallas del año 2024.



Nota. La figura muestra la evolución del tiempo medio entre fallas durante del año 2024. La elaboración es propia.

Figura 10.

Disponibilidad mecánica del año 2024



Nota. La figura muestra la evolución de la disponibilidad mecánica durante del año 2024.

La elaboración es propia

4.2.11. Flota de camiones grúa

La flota de camiones grúa que conforma la muestra de estudio para la optimización de la disponibilidad mecánica en Minera Quellaveco, está compuesta por cuatro (4) unidades principales.

Estos camiones grúa fueron los equipos principales analizados para la aplicación de la metodología RCM.

Composición de la flota de camiones grúa analizada

La siguiente tabla especifica la codificación de las unidades que conformaron la flota de camiones grúa analizada en la sección de equipos y materiales de la investigación:

Tabla 13

Flota de camiones grúa.

N°	Código de la Unidad (ID)	Observación / Rol en la Flota
1	CT001	Identificado como el camión grúa
2	CT004	Unidad de la flota de camiones grúa analizada.
3	CT005	Unidad de la flota de camiones grúa analizada.
4	CT006	Unidad de la flota de camiones grúa analizada.

Nota. Se muestran la flota de camiones grúa. La elaboración fue propia

4.2.12. Objetivo y solución

La flota de camiones grúa se había convertido en un dolor de cabeza operativo. el problema era claro y urgente: Una disponibilidad mecánica (DM) inaceptablemente baja,

que se situaba en un promedio del 70,02 %. esto significaba paradas frecuentes e imprevistas para un equipo vital en la mina, traduciéndose en altos costos de emergencia y retrasos en la producción.

El objetivo general que impulsó el proyecto fue simple pero ambicioso: Optimizar la disponibilidad mecánica de estos equipos, sacándolos del ciclo de mantenimiento reactivo.

para lograrlo, se establecieron pasos tácticos:

1. Diagnóstico del problema: Entender qué tan grave era realmente la situación, cuantificando el bajo MTBF (tiempo medio entre fallas) y el largo MTTR (tiempo medio de reparación).
2. Identificación de las amenazas: Usar la herramienta FMEA (análisis de modos y efectos de falla) para señalar con precisión al enemigo: el equipo más crítico (como el camión grúa ct001) y las causas exactas de sus fallas recurrentes fallas en el sistema eléctrico y en el motor.
3. Elaboración del plan definitivo: Diseñar un nuevo plan de mantenimiento que desechara las tareas innecesarias y se concentrara, exclusivamente, en las estrategias más efectivas (predictivas y preventivas) para mitigar las fallas críticas.

4.2.13. Acciones de organización tácticas.

Las acciones tácticas se centraron en la selección de estrategias, la definición de procedimientos y la integración de la información para cada modo de falla crítico.

1. Reestructuración y Priorización del Plan de Mantenimiento

Esta es la acción táctica central que surge del análisis FMEA.

- Selección de estrategias óptimas: Se realizó una evaluación de los modos de falla críticos (identificados en el camión grúa CT001, como fallas eléctricas y de

motor). Para cada modo de falla, se eligió la estrategia de mantenimiento más efectiva:

Mantenimiento a condición (CBM): Aplicación de técnicas predictivas (como el análisis de aceite o la termografía) para componentes con patrones de falla relacionados con la edad, pero que varían según su uso. Esto evita el reemplazo prematuro.

Mantenimiento preventivo a tiempo fijo: Mantenimiento programado solo para componentes con vida útil conocida y predecible (ej. correas o filtros de vida limitada).

Mantenimiento por detección de falla oculta: Inspección regular de equipos de protección (ej. válvulas de seguridad, alarmas) para asegurar que funcionen cuando se necesiten.

- Eliminación de Tareas Innecesarias: Se eliminaron las tareas de mantenimiento preventivo tradicionales que no estaban vinculadas a un modo de falla específico ni eran económicamente justificables, reduciendo la carga de trabajo y el costo del sobre mantenimiento.

2. Estandarización de procedimientos operacionales y de mantenimiento

Se crearon documentos detallados para asegurar la consistencia y la calidad de la intervención.

- Generación de hojas de tareas (Job Plans): Creación de instrucciones de trabajo detalladas, paso a paso, para las nuevas tareas CBM y preventivas. Estas hojas definen:

Frecuencia exacta de la tarea (ej. cada 250 horas, o basado en el nivel de vibración).

Herramientas y repuestos específicos requeridos.

Personal y especialidad necesaria.

Puntos de control (check-points) y tolerancias aceptables.

- Protocolos de inspección basada en el riesgo (RBI): Desarrollo de listas de verificación enfocadas en los puntos críticos de inspección de los camiones grúa. Por ejemplo, en lugar de una inspección visual general, se establecen puntos específicos de medición de espesores o niveles de desgaste en la estructura de la pluma.

3. Integración de sistemas de información (GMAO/CMMS)

Para que el plan RCM sea operativo, la información debe ser gestionada digitalmente.

- Codificación de activos y modos de falla: Los resultados del FMEA/AMFE (las causas de falla y sus consecuencias) se cargaron en el sistema de Gestión de Mantenimiento asistido por computadora (GMAO o CMMS) para estructurar el árbol de activos.
- Programación de órdenes de trabajo (OT): Las tareas óptimas seleccionadas se programaron automáticamente en el GMAO, asegurando que los nuevos planes de mantenimiento predictivo y preventivo se ejecuten en los intervalos correctos.
- Recolección de datos detallados: Se implementaron formularios digitales para que los técnicos registren las horas de parada, el tiempo de reparación (MTTR) y la causa raíz exacta de cualquier falla remanente, alimentando el ciclo de mejora continua.

4. Capacitación y responsabilidad de roles (R&R)

El RCM depende de que los equipos de trabajo comprendan y confíen en la nueva metodología.

- Entrenamiento específico en técnicas predictivas: Capacitación del personal de mantenimiento en el uso de herramientas predictivas (si aplica, como análisis de aceite o termografía) y en la interpretación de los datos para tomar decisiones *justo a tiempo*.
- Definición de roles y responsabilidades (R&R): Clarificación de quién es responsable de la ejecución de cada tipo de tarea:

Operadores: Responsables de las inspecciones diarias de primer nivel y la detección temprana de fallas.

Técnicos: Responsables de las tareas preventivas y CBM.

4.2.14. Características del mantenimiento

El RCM no se enfoca en el activo o componente en sí, sino en las funciones que el activo debe cumplir y las consecuencias de su falla. Esto se resume en siete preguntas fundamentales:

A. Enfoque funcional y contexto operacional

¿Qué debe hacer el activo? El RCM comienza definiendo las funciones y los estándares de desempeño que el activo debe cumplir.

Contexto Operacional: Las tareas de mantenimiento se definen basándose en cómo se utiliza el equipo en su entorno real. Una bomba que trabaja 24/7 en un ambiente corrosivo tendrá un plan de mantenimiento diferente a la misma bomba que trabaja 8 horas en un ambiente limpio.

B. Análisis de modos y efectos de falla (FMEA/AMFE)

¿De qué maneras puede fallar? Se identifican todos los modos de falla que podrían impedir que el activo cumpla su función por ejemplo fractura de la pluma, falla hidráulica, sobrecalentamiento del motor.

¿Qué sucede si falla? Se analiza el efecto de la falla, es decir, las consecuencias directas de cada modo de falla (ej. pérdida de producción, daño ambiental, riesgo para la seguridad). La tesis usa el FMEA para detectar los modos de falla críticos en los camiones grúa, por ejemplo, fallas en el sistema eléctrico y en el motor.

C. Análisis de criticidad y consecuencias

¿Qué importancia tiene la falla? Las consecuencias de la falla se clasifican en categorías (seguridad, medio ambiente, producción y costes). El RCM prioriza las fallas en función

de su criticidad, enfocando los recursos de mantenimiento en aquellos modos de falla con las consecuencias más graves.

D. Orientación a la confiabilidad

Objetivo de Confiabilidad: El RCM busca garantizar la confiabilidad inherente del equipo.

Optimización de Tareas: Se seleccionan tareas que son técnicamente factibles (pueden evitar o mitigar la falla) y económicamente justificables (el costo de la tarea es menor al costo de la falla).

E. Estrategias de mantenimiento basadas en la condición (CBM)

El RCM prioriza tareas que permiten operar el activo hasta justo antes de que se produzca el fallo, a menudo mediante el Mantenimiento Predictivo o Basado en la Condición (CBM):

Mantenimiento a condición (*On-Condition*): Inspecciones o monitoreo de la condición (ej. análisis de vibraciones, termografía, análisis de aceite) para detectar fallas potenciales.

4.2.15. Cuadro comparativo de costos de RCM y mantenimientos tradicionales

La comparación de costos entre el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) y los enfoques de mantenimiento tradicionales (Correctivo y Preventivo) demuestra que, aunque el RCM requiere una inversión inicial mayor en análisis y planificación, genera ahorros significativos y un mayor retorno de la inversión (ROI) a largo plazo.

El RCM optimiza el gasto al enfocar los recursos solo en las fallas críticas que realmente afectan las funciones de la actividad minera.

Tabla 14

Comparación de costos de RCM y otros mantenimientos tradicionales.

Característica de Costo	Mantenimiento Correctivo (Reactivo)	Mantenimiento Preventivo (Basado en Tiempo)	Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)
Inversión Inicial	Muy Baja (solo mano de obra y piezas para la reparación).	Baja a Moderada (costo de establecer calendarios y rutinas fijas).	Alta (requiere capacitación, análisis FMEA/AMFE, recolección de datos y tecnología de monitoreo).
Costo de Mano de Obra	Alto y Variable (horas extras por emergencias, costos de reparación de alto impacto).	Moderado y Fijo (tiempo dedicado a tareas programadas, incluso si no son necesarias).	Optimizado y Fijo (mano de obra enfocada en tareas críticas y en análisis, reduciendo las horas extras).
Costo de Repuestos y Inventario	Muy Alto (necesidad de mantener un stock grande de repuestos críticos para emergencias).	Alto (reemplazo de piezas basado en el tiempo, a menudo cuando aún tienen vida útil, generando desperdicio).	Bajo y Controlado (solo se compran repuestos justo antes de la falla predicha, optimizando el stock).
Costo por Tiempo de Inactividad (Downtime)	Máximo (paradas no planificadas, largas y catastróficas, que detienen la producción).	Moderado (paradas planificadas para mantenimiento, pero a veces innecesarias).	Mínimo (paradas programadas y muy cortas, basadas en la condición real del equipo, como lo demostró la tesis de Quellaveco al mejorar la Disponibilidad).
Costo de Falla Secundaria	Alto (una falla inicial puede causar daños severos a otros componentes del equipo).	Moderado (existe el riesgo de introducir fallas humanas o fallas al intervenir innecesariamente).	Bajo (la intervención se realiza cuando es estrictamente necesaria, minimizando el riesgo de daño secundario o infant mortality).
Costo a Largo Plazo	El más Alto (altos costos operativos totales, baja vida útil del activo).	Alto (costos recurrentes por sobre-mantenimiento o mantenimiento inadecuado).	El más Bajo (máxima vida útil del activo y la mayor eficiencia operativa).

Nota. El cuadro de comparación de costos de RCM y el mantenimiento correctivo y mantenimiento preventivo está dada por las características de Inversión Inicial, Costo de

Mano de Obra, Costo de Repuestos e Inventario, Costo por Tiempo de Inactividad (Downtime), Costo de Falla Secundaria, Costo a Largo Plazo. La elaboración fue propia.

4.2.16. Aplicación del RCM en el Perú

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) es la metodología predominante y más exitosa en la industria pesada y minera.

Tabla 15

Cuadro de aplicación del RCM en el Perú.

Sector de Aplicación	Activo/Sistema Crítico Analizado	Enfoque Metodológico Específico	Indicador de Mejora Clave (KPI)	Resultados Típicos Logrados
Minería (Minera Quellaveco) (Tesis Analizada)	Camiones Grúa de (Flota de equipos auxiliares)	RCM (SAE-JA1011) + Análisis FMEA/AMFE	Disponibilidad Mecánica (DM)	Incremento de la DM del 70,02 % al 93,87 %. Reducción drástica de paradas no programadas. Reducción del tiempo de inactividad. Mejora en la confiabilidad de componentes mayores (ej. motores).
Minería (Arequipa)	Camiones Mineros (Flota Caterpillar 797F)	RCM para optimizar el contrato Marco	Nivel de Servicio y Confiabilidad	Mejora de la DM del 84 % al 94 %.
Minería (Cajamarca)	Equipos de Carguío y Acarreo (Palas y Dumpers)	RCM (Propuesta de Plan de Mantenimiento)	Disponibilidad Mecánica	Propuesta para reducir los tiempos de paradas y optimizar la gestión de mantenimiento.
Industria Textil	Maquinaria de Producción (General)	RCM (Propuesta de Plan de Gestión)	Tiempos de Parada	

Sector de Aplicación	Activo/Sistema Crítico Analizado	Enfoque Metodológico Específico	Indicador de Mejora Clave (KPI)	Resultados Típicos Logrados
Logística y Transporte	Tractocamiones y Freightliner (Flota de carga pesada)	RCM/MCC (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad)	Disponibilidad de la Flota	Implementación de mantenimiento predictivo para incrementar la disponibilidad de las unidades más críticas.
Agroindustria	Línea de Molienda (Equipos de procesamiento)	RCM + FMEA + Análisis de Criticidad	Confiabilidad y Pérdidas Económicas	La Confiabilidad (MTBF) aumentó 84,01 % (de 5,54 hrs a 37,22 hrs). Reducción de 33,61 % en pérdidas económicas.
Generación Eléctrica	Equipos Auxiliares (Central Termoeléctrica)	RCM para Gestión de Mantenimiento	Disponibilidad y Confiabilidad	Propuesta para optimizar el mantenimiento y elevar la disponibilidad de los equipos de soporte vital.

Nota. El cuadro de aplicación del RCM en el Perú está dada para la Minería (Minera Quellaveco) (Tesis Analizada), Minería (Arequipa), Minería (Cajamarca), Industria Textil, Logística y Transporte, Agroindustria, Generación Eléctrica. La elaboración fue propia.

4.2.17. Ventajas y limitaciones del software RCM

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) es una metodología estructurada orientada a asegurar que los activos físicos (equipos) continúen desempeñando sus funciones requeridas dentro de su contexto operativo específico. Esta metodología se fundamenta en el análisis sistemático de modos de falla, sus consecuencias y estrategias de mitigación, con el objetivo de maximizar la disponibilidad, seguridad y eficiencia operativa de los equipos.

En el presente estudio, la metodología RCM fue implementada utilizando el módulo PM del software SAP, el cual permite gestionar integralmente las actividades de mantenimiento a través de funcionalidades que abarcan la planificación, ejecución, seguimiento y análisis de tareas.

La aplicación del RCM se enfocó en mejorar la disponibilidad operativa de los camiones grúa utilizados en la operación minera de Quellaveco, mediante la identificación de modos de falla críticos y la implementación de tareas preventivas y predictivas. Como resultado del análisis, se identificaron las siguientes ventajas y limitaciones asociadas a la implementación de esta metodología:

Ventajas

- Optimización de recursos técnicos y económicos: La priorización de tareas según la criticidad funcional de los equipos permite una asignación más eficiente de recursos, reduciendo costos operativos innecesarios.
- Incremento en la disponibilidad técnica: Al abordar proactivamente los modos de falla de mayor impacto, se extiende el tiempo de operación efectiva de los activos.
- Reducción de mantenimientos correctivos no planificados: La incorporación de estrategias preventivas y predictivas disminuye la ocurrencia de fallas inesperadas, mejorando la continuidad operativa.
- Mejora en la seguridad industrial: La mitigación de fallas potencialmente catastróficas contribuye a la protección del personal, los equipos y el entorno.
- Identificar modos de falla recurrentes y diseñar tareas preventivas específicas.
- Optimizar el inventario de repuestos críticos, reduciendo el “late time”.
- Simular escenarios de mejora mediante herramientas como Weibull y análisis Pareto.

Limitaciones

- Elevados costos iniciales de implementación: La recopilación de datos técnicos, el desarrollo del análisis FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) y la capacitación del personal requieren una inversión considerable.

- Dependencia de información histórica confiable: La efectividad del RCM está condicionada por la calidad y disponibilidad de registros de fallas, mantenimientos y condiciones operativas.
- Resistencia organizacional al cambio: La transición desde un enfoque reactivo hacia uno proactivo implica una transformación cultural y estructural dentro de la organización, lo cual puede generar fricciones en su adopción.

Integración de RCM con sistemas de monitoreo en tiempo real: SAP aún depende de entradas manuales, lo que limita la precisión de KPIs como MTBF.

Software RCM

La metodología RCM se implementa en SAP PM a través de la planificación y ejecución de tareas de mantenimiento basadas en la confiabilidad de los equipos. Este enfoque puede representarse matemáticamente mediante los siguientes componentes:

- Evaluación de criticidad de activos: Cada equipo se evalúa según su criticidad funcional, que puede calcularse como:

$$C=F \cdot S \cdot P$$

Donde:

C: criticidad del equipo

F: frecuencia de falla del equipo

S: severidad del impacto de la falla

P: probabilidad de detección o prevención

Esta fórmula permite priorizar los activos en SAP PM para asignar recursos de mantenimiento de forma óptima.

- Priorización de tareas de mantenimiento: SAP PM permite clasificar las órdenes de trabajo según su prioridad, que puede definirse como:

$$PR = \frac{C}{R}$$

Donde:

PR: Prioridad de la tarea

C: Criticidad del equipo asociado

R: Recursos disponibles para ejecutar la tarea

Esto permite que el sistema genere alertas y planes de mantenimiento más eficientes.

- Disponibilidad operativa del equipo

La disponibilidad técnica de los equipos se puede calcular con la fórmula clásica de confiabilidad:

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

Donde:

D: disponibilidad del equipo

MTBF: tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures)

MTTR: tiempo medio de reparación (Mean Time To Repair)

SAP PM registra automáticamente estos indicadores a partir de las órdenes de mantenimiento ejecutadas, permitiendo evaluar el impacto de la estrategia RCM en la operación.

- Intervalo óptimo de mantenimiento preventivo: Esta fórmula se basa en el equilibrio económico entre el costo de realizar mantenimientos preventivos y el costo de enfrentar fallas inesperadas. Su objetivo es minimizar el costo total de mantenimiento durante el ciclo de vida del activo.

$$T_{opt} = \sqrt{\frac{2xC_f x T}{C_p}}$$

Donde:

T_{opt} : Intervalo óptimo de mantenimiento preventivo.

C_f : Costo asociado a una falla no prevista.

C_p : Costo de ejecutar una tarea de mantenimiento preventivo.

T : Tiempo de operación o ciclo de vida esperado del equipo.

Cabe recalcar que SAP PM no permite ingresar directamente esta fórmula como una ecuación matemática, su lógica puede ser implementada mediante la configuración de planes de mantenimiento y análisis de costos. El proceso se desarrolla en las siguientes etapas:

- Modelado de activos: Se definen las ubicaciones técnicas y los equipos en SAP, incluyendo sus modos de falla críticos mediante registros de historial y análisis FMECA.
- Asignación de estrategias de mantenimiento: Se configuran ciclos de mantenimiento (por ejemplo, cada 500 horas o cada 6 meses) en función de la criticidad del equipo y su historial de fallas.
- Evaluación de costos: Los módulos de gestión financiera (SAP CO) permiten calcular los valores de C_f y C_p a partir de órdenes de mantenimiento ejecutadas y costos asociados.

- Simulación de escenarios: Se utilizan reportes y análisis de desempeño en SAP PM para ajustar los intervalos de mantenimiento y aproximarse al valor óptimo T_{opt}
- Optimización continua: A través de indicadores como MTBF, MTTR y disponibilidad técnica, se ajustan los planes de mantenimiento para mejorar la confiabilidad y reducir costos operativos.

Capítulo 5. Discusión

5.1. Pruebas de validación

Prueba de hipótesis

Para la hipótesis del presente trabajo realizado tenemos dos alternativas:

Ho: La optimización de la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa no es aplicando la metodología RCM en la minera Quellaveco en el 2022.

H1: La optimización de la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa es aplicando la metodología RCM en la minera Quellaveco en el 2022.

Tabla 16

Estadísticos de la disponibilidad

Resumen estadístico		
	Disponibilidad mecánica 2022	Disponibilidad mecánica 2024
Recuento	12	12
Promedio	70,0183	93,8708
Desviación Estándar	7,4905	1,64252
Coefficiente de Variación	10,70%	1,75%
Mínimo	56,53	91,32
Máximo	81,73	96,08
Rango	25,2	4,76
Sesgo Estandarizado	0,147243	-0,304554
Curtosis Estandarizada	-0,249822	-1,09439

Nota. El cuadro muestra un recuento de la estadística realizada. La elaboración fue propia.

Prueba t para comparar medias

Hipótesis nula: $\text{media1} = \text{media2}$

Hipótesis Alt.: $\text{media1} < \text{media2}$

suponiendo varianzas iguales: $t = -10.775$ valor-P = $3.05233E-10$

Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

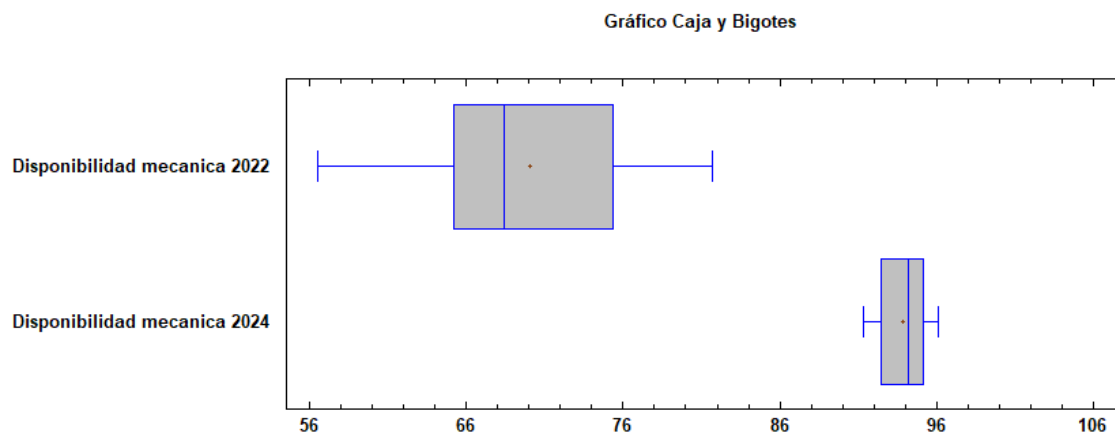
Estadístico DN estimado = 1.0

Estadístico K-S bilateral para muestras grandes = 2.44949

Valor P aproximado = 0.0000122884

Figura 11.

Gráfico de promedios para la disponibilidad



Nota. La figura muestra la caja y bigotes de la disponibilidad mecánica del 2022 y 2024 donde se muestra un incremento. La elaboración es propia.

Por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa H1, con un P-valor de muy cercano a 0.

5.1.1. Aplicación de la tecnología encontrada

1. Sensores de monitoreo en tiempo real

Uso de sensores IoT en los camiones grúa para medir vibraciones, temperatura, presión hidráulica y desgaste de componentes.

Estos sensores permiten un diagnóstico predictivo, reduciendo fallas imprevistas.

2. Análisis de datos con inteligencia artificial (IA)

Implementación de IA y machine learning para analizar datos históricos de fallas.

Permite predecir modos de fallas y generar alertas preventivas antes de que ocurran.

3. Inspección con drones y cámaras térmicas

Uso de drones con termografía infrarroja para inspeccionar componentes de difícil acceso.

Detecta sobrecalentamientos en motores, cables y sistemas hidráulicos sin detener operaciones.

4. Lubricación automatizada con control remoto.

Implementación de sistemas automáticos de engrase en puntos críticos de los camiones grúa.

Se reduce el desgaste mecánico y se optimiza la disponibilidad del equipo.

5. Simulación de fallas con gemelos digitales

Creación de modelos digitales (Digital Twins) de los camiones grúa para probar diferentes escenarios de fallas.

Permite mejorar estrategias de mantenimiento sin intervenir en los equipos reales.

6. Uso de materiales avanzados en repuestos

Implementación de aleaciones de alta resistencia y recubrimientos cerámicos en piezas sujetas a desgaste.

Prolonga la vida útil de los componentes y reduce la frecuencia de reemplazo.

7. Implementación de energía híbrida

Uso de baterías de ion-litio y sistemas híbridos en camiones grúa para reducir consumo de combustible y mejorar eficiencia.

Disminuye costos operativos y emisiones de CO₂.

8. Realidad aumentada (AR) para mantenimiento

Aplicación de AR en gafas inteligentes para guiar a los técnicos en procedimientos de mantenimiento.

Reduce tiempos de reparación y mejora la precisión del diagnóstico.

9. Robótica para reparación automatizada

Uso de brazos robóticos para tareas repetitivas como cambio de filtros, ajuste de pernos y soldaduras en componentes dañados.

Mejora la seguridad y eficiencia del mantenimiento.

5.1.2. Contraste con trabajos de investigación similares

Prada-Salamanca & Rincón-Rincón (2022), se enfocan en una máquina piloteadora Link Belt LS 118 en Colombia, donde la falta de un análisis de criticidad y un plan de mantenimiento preventivo generaba baja disponibilidad operativa. A través del RCM y el análisis de modos y efectos de fallas (FMEA/AMFE), identifican los componentes más críticos y diseñan estrategias de mantenimiento específicas. Esto les permite lograr un incremento del 15 % en la disponibilidad mecánica y una reducción significativa en los costos de reparación, gracias a una mejor planificación de inventarios y recursos. Por otro lado, esta tesis aborda el problema de las fallas recurrentes en camiones grúa de la minera Quellaveco en Perú, que causaban paros de emergencia y

retrasos en la producción. Mediante la implementación del RCM, complementado con el FMEA/AMFE y el seguimiento de indicadores como MTTR y MTBF, logra elevar la disponibilidad mecánica de 70,02 % en 2022 a un impresionante 93,87 % en 2024, mejorando también los tiempos de reparación y entre fallas.

En el ámbito minero, la gestión eficiente del mantenimiento es clave para optimizar la disponibilidad mecánica de los equipos. Huillca-Perez (2024), aborda el problema del backlog de tareas correctivas en emperradores Bolter99, utilizando el análisis de Pareto y un modelo de gestión basado en Caterpillar para priorizar fallas críticas. Su enfoque logra un incremento del 4,4 % en la disponibilidad mecánica. En cambio, esta tesis aplica el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en camiones grúa de la minera Quellaveco. Mediante el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (FMEA/AMFE) y el seguimiento de indicadores como MTTR y MTBF, reduce fallas y mejora la disponibilidad mecánica de 70.02 % en 2022 a 93.87 % en 2024. Ambas investigaciones, con enfoques metodológicos distintos, resaltan la importancia de una gestión proactiva para optimizar la operatividad en la industria minera.

En el ámbito industrial, donde la eficiencia operativa es crucial, dos estudios destacan por su enfoque en mejorar el mantenimiento de flotas vehiculares, aunque con metodologías y contextos distintos. Cando-Tintín & Morán-Guamán (2023) abordan la optimización del plan de mantenimiento (PMO) para el parque automotor de la Empresa Eléctrica Riobamba S.A., identificando que la falta de planificación adecuada genera baja disponibilidad vehicular. Mediante el análisis de modos de falla y la racionalización de tareas, logran reducir un 17,86 % las actividades de mantenimiento y mejorar la disponibilidad operativa. Por otro lado, esta tesis aplica el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en una flota de camiones grúa de la minera Quellaveco, donde las fallas frecuentes causaban paros de emergencia y retrasos. Con el RCM, la disponibilidad mecánica aumenta de 70,02 % en 2022 a 93,87 % en 2024, mejorando también los indicadores MTTR y MTBF.

En el dinámico y exigente mundo de la minería, donde la disponibilidad mecánica de los equipos es un factor crítico para la productividad, las investigaciones destacan por su enfoque en mejorar la gestión del mantenimiento. Aunque con enfoques y contextos distintos, tanto la tesis de Huillca-Perez (2024), como esta tesis comparten un objetivo común: Optimizar la operatividad de las flotas mineras mediante metodologías de gestión eficiente. Huillca-Perez (2024), se enfoca en resolver el problema del backlog de tareas correctivas en una flota de empernadores Bolter99 en IESA Andaychagua. Utilizando el análisis de Pareto y un sistema de gestión basado en el modelo de Caterpillar, prioriza y resuelve fallas críticas, logrando un incremento del 4,4 % en la disponibilidad mecánica. Por otro lado, Eyzaguirre León aborda la creciente frecuencia de fallas en camiones grúa de la minera Quellaveco, que causaban paros de emergencia y retrasos en la producción. Aplicando la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), junto con el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (FMEA/AMFE), logra elevar la disponibilidad mecánica de 70,02 % en 2022 a un impresionante 93,87 % en 2024, además de mejorar los indicadores MTTR y MTBF.

En el competitivo y demandante sector minero, donde la disponibilidad mecánica de los equipos es un factor clave para la eficiencia operativa, las investigaciones destacan por su enfoque en mejorar la gestión del mantenimiento a través de metodologías avanzadas. Aunque aplicadas a diferentes tipos de equipos y con herramientas estadísticas distintas, tanto el estudio de Pala Diaz & Aguirre Ruiz (2024), como la presente tesis comparten un objetivo común: Optimizar la disponibilidad mecánica y reducir costos mediante una gestión de mantenimiento eficiente. Pala Diaz & Aguirre Ruiz (2024), se centran en perforadoras hidráulicas, implementando el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) junto con la distribución de Weibull y simulaciones en Arena Simulation. Estas herramientas les permiten analizar estadísticamente las fallas y validar su propuesta de mejora, logrando aumentar la disponibilidad mecánica de las perforadoras del 85,42 % al 90,16 %, además de reducir costos y mejorar los tiempos medios entre fallas (MTBF) y de reparación (MTTR). Por otro lado, esta investigación aborda el

problema de las fallas frecuentes en camiones grúa de la minera Quellaveco, que causaban paros de emergencia y retrasos en la producción. Aplicando también el RCM, complementado con el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (FMEA/AMFE) y el software STATGRAPHICS, logra elevar la disponibilidad mecánica de 70,02 % en 2022 a un impresionante 93,87 % en 2024, mejorando además los indicadores MTTR y MTBF.

En el exigente mundo de la minería, donde la disponibilidad y confiabilidad de los equipos son fundamentales para la productividad, las investigaciones destacan por su aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para optimizar el rendimiento de activos críticos. Aunque enfocadas en diferentes tipos de maquinaria, tanto el estudio de Palomino-Quinto (2023), como esta tesis demuestra la efectividad de esta metodología para mejorar la eficiencia operativa y reducir los tiempos de inactividad. Palomino-Quinto (2023), se centra en las trituradoras cónicas Nordberg HP400 de la Compañía Minera Casapalca, activos clave en el proceso de producción. A través del RCM y un análisis exhaustivo de modos y efectos de fallas (FMEA), identifica y prioriza fallas funcionales, logrando incrementar la disponibilidad mecánica del 90 % al 94 %. Este avance no solo mejora la rentabilidad, sino que también optimiza el plan de mantenimiento y fortalece la capacitación del personal. Por otro lado, esta tesis aborda el problema de las fallas recurrentes en camiones grúa de la minera Quellaveco, que causaban paros de emergencia y retrasos en la producción. Mediante la implementación del RCM, complementado con el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (FMEA/AMFE) y el seguimiento de indicadores como MTTR y MTBF, logra elevar la disponibilidad mecánica de 70,02 % en 2022 a un impresionante 93,87 % en 2024, además de mejorar los tiempos de reparación y entre fallas.

La tesis de Camacho-Ubillus & Castañeda-Zevallos (2024), es un sólido precedente al haber obtenido y comprobado resultados concretos: La aplicación exitosa de la metodología RCM para mejorar la disponibilidad mecánica de una flota de camiones en el sector de construcción. Su valor reside en la confirmación de que la optimización

de los indicadores de confiabilidad, como el aumento del MTBF (Tiempo Promedio Entre Fallas), es alcanzable en vehículos de trabajo pesado. En contraste, la investigación de esta tesis se enfoca en resultados esperados o proyectados. Aunque utiliza la misma herramienta (RCM) y persigue la misma meta (mejorar la disponibilidad), el contraste se establece en el contexto: La tesis aplica el modelo a una flota de camiones grúa operando en el entorno de la Minera Quellaveco, un contexto de mayor criticidad y exigencia que el de construcción. Esta tesis, al ser proyectiva, busca optimizar la disponibilidad, lo que implica no solo replicar el aumento logrado por Camacho y Castañeda, sino superarlo mediante un diseño de RCM adaptado a la alta criticidad de la minería, donde cada hora de parada tiene un impacto económico exponencialmente mayor. Así, el trabajo de Camacho valida el método, mientras que esta tesis eleva a un nuevo nivel de especificidad y criticidad operacional.

La tesis de Martínez (2021), enfocada en el incremento de la disponibilidad de la flota en la empresa EUROLIFT S.A. mediante la metodología del RCM, establece un antecedente de validación metodológica para esta tesis. Martínez obtuvo resultados positivos al aplicar el RCM en una flota de montacargas y equipos de elevación, logrando una mejora comprobada en la disponibilidad. Su principal aporte es la confirmación de que el RCM es efectivo para la gestión de activos móviles y la optimización de sus métricas de rendimiento en el contexto empresarial peruano. En cambio, esta tesis que busca la optimización de la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa, espera replicar y superar estos resultados en un entorno de mayor criticidad. La diferencia clave radica en el activo: La tesis se enfoca en camiones grúa (equipos más complejos y de doble función que un montacargas) y, sobre todo, en el contexto: La Minera Quellaveco. Mientras Martínez demostró la eficacia del RCM a nivel de servicios y equipos de manejo de materiales, la tesis se proyecta que la aplicación de RCM en un ambiente de alta producción minera resultará en una optimización de la disponibilidad, impactando directamente en la productividad y la reducción de costos operativos a una escala significativamente mayor.

CONCLUSIONES

Se optimizó la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa en la minera Quellaveco. Tras implementar el RCM, la disponibilidad aumentó de 70,02 % en 2022 a 93,87 % en 2024, mejorando también los indicadores MTTR y MTBF, lo que refleja mayor eficiencia en reparaciones y menor frecuencia de fallas. Mediante el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (FMEA/AMFE), se identificaron fallas críticas, permitiendo priorizar intervenciones. La estrategia de mantenimiento, que incluye tareas preventivas, predictivas y correctivas; optimizó recursos, redujo riesgos operativos y aseguró la continuidad de las operaciones, minimizando costos y maximizando la sostenibilidad.

Se midió los modos de falla en camiones grúa para aplicar el RCM en Quellaveco lo que destaca que la identificación de fallas es fundamental para el éxito del RCM. Utilizando el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (FMEA/AMFE), se priorizaron fallas mediante el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), clasificándolas en criticidad inaceptable (27,36 %, $\text{NPR} \geq 200$), criticidad reducible (39,95 %, $\text{NPR} 100-200$) y aceptable (33,69%, $\text{NPR} < 100$). La implementación del RCM aumentó la disponibilidad mecánica de 70,02 % en 2022 a 93,87 % en 2024, optimizando el mantenimiento y mejorando la eficiencia operativa en la minera.

Se evaluó el MTTR (Tiempo Medio de Reparación) y MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas) para optimizar la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa. Antes de implementar el RCM en 2022, el MTTR oscilaba entre 8,03 y 27,23 horas, y el MTBF entre 17,88 y 54,91 horas. Tras la aplicación del RCM en 2024, el MTTR mejoró a un rango de 3,11 a 7,33 horas, y el MTBF aumentó a 47,74 – 98,00 horas. Estos resultados reflejan una mayor eficiencia en reparaciones (menor MTTR) y una mayor confiabilidad de los equipos (mayor MTBF), demostrando que el RCM es clave para mejorar la disponibilidad mecánica y reducir interrupciones operativas.

RECOMENDACIONES

1. Monitoreo avanzado: Implementar sensores (vibraciones, termografía, análisis de aceite) para detectar fallas incipientes y habilitar mantenimiento predictivo.
2. Mantenimiento preventivo: Crear un programa basado en FMEA/AMFE y recomendaciones del fabricante, incluyendo lubricación, revisión de tensiones e inspección de estructuras.
3. Gestión de repuestos: Optimizar el inventario de repuestos críticos para evitar retrasos y reducir el MTTR.
4. Capacitación técnica: Formar al personal en técnicas avanzadas de diagnóstico y reparación para mejorar la eficiencia.
5. Sistema CMMS: Usar software para gestionar órdenes de trabajo, inventario y KPIs, facilitando el seguimiento y la toma de decisiones.
6. Análisis de causa raíz (RCA): Investigar fallas recurrentes con técnicas como el diagrama de Ishikawa o los 5 porqués para soluciones a largo plazo.
7. Cultura de seguridad: Promover la identificación y reporte de condiciones inseguras, fomentando la mejora continua.
8. Alianzas con proveedores: Colaborar con proveedores para obtener soporte técnico, repuestos de calidad y capacitación especializada.
9. Monitoreo de KPIs: Seguir indicadores como disponibilidad, MTTR y MTBF para ajustar estrategias y optimizar el rendimiento.
10. Pruebas físicas: Realizar pruebas post construcción del puente grúa para garantizar su correcto funcionamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez-Llerena, M. F. (2023). *Propuesta de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad RCM para la mejora de disponibilidad en la flota de barredoras industriales de la marca MACRO modelo M40 de la empresa Ingenia Green.*
- Araujo-Gutiérrez, E. J. (2016). *Influencia de la Confiabilidad en los Índices de la flota de Tractores JD MF 291 en la empresa Casa Grande SAC.*
- Barsallo-Coico, M. L. (2019). *Análisis de la gestión del mantenimiento en los vehículos de la empresa Induamerica Servicios Logísticos SAC–Lambayeque.*
- Burgos-Hermoza, J. M., & Pflücker-Vallejos, R. L. (2021). *Mejora de la gestión del mantenimiento de las grúas tipo puente en el taller de construcciones navales del astillero SIMA Callao.*
- Camacho-Ubillus, R. M., & Castañeda-Zevallos, E. (2024). Aplicación de la metodología RCM para mejorar la disponibilidad mecánica en una flota de camiones en el sector de construcción. In *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/676147>
- Camacllanqui-Yallico, H. (2023). *Estimación de la disponibilidad de los camiones mineros Liebherr T 284 en la empresa minera Antamina, 2022.*
- Cando-Tintín, J. V., & Morán-Guamán, I. L. (2023). *Mejora del plan mantenimiento, aplicando la metodología de la optimización del plan de mantenimiento, para el parque automotor de la Empresa Eléctrica Riobamba SA.*
- Castillo-Tejeda, A. L. (2017). *Mantenimiento centrado en la confiabilidad para mejorar la disponibilidad mecánica del camión volquete volvo Fmx–440 en el Proyecto El Toro.*
- Chávez-Ordoñez, R. A. (2020). *Optimización de la gestión del mantenimiento de una flota de maquinaria pesada, en la construcción de un tranque de relaves mineros.*
- Corac-Angelo, D. L., & Sánchez-Ponce, A. J. (2023). *Propuesta de implementación de un sistema de gestión de mantenimiento para la mejora de la disponibilidad*

mecánica de las grúas telescópicas.

- Cormilluni-Leandro, J. (2022). *Propuesta de mejora en el sistema de gestión de mantenimiento utilizando el RCM en el proceso de producción y extendido de asfalto.*
- Cosi-Palomino, C. A. (2019). *Propuesta de mejora en el proceso de mantenimiento preventivo del motor de marca cummins de modelo isx a fin de incrementar su disponibilidad mecánica.*
- Del Carpio-Zuñiga, M. A. (2024). *Análisis de fallas de la flota de camiones de servicio mecánico para mejora del plan de mantenimiento en minera Chinalco.*
- Huillca-Perez, A. O. (2024). *Modelo de gestión de Backlog para incrementar la disponibilidad mecánica en la flota de emperadores bolter99 en IESA Andaychagua.*
- Loja-Loja, F. E., & Yansaguano-Toral, J. A. (2021). *Propuesta de un plan de mantenimiento para la flota vehicular y maquinaria pesada mediante el uso del programa SMPProg para la Prefectura del Azuay.*
- Martínez, L. (2021). *Incremento de la disponibilidad de la flota en la empresa Eurolift s.a. mediante a metodología del rcm.* Universidad Privada del Norte.
- Mendoza-Calizaya, E. H. (2020). *Propuesta de mejora de la gestión de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para un puente Grúa de 15 Ton a la empresa San Martín Contratistas Generales SA.*
- Mori-Palacios, A. P. (2021). *Mejora del plan de mantenimiento para incrementar la disponibilidad de unidades en una empresa de alquiler de vehículos.*
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento centrado en confiabilidad.*
- Pachao-Carbajal, J. R. (2022). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo programado para mejorar la disponibilidad y confiabilidad de la flota de camiones 797F en el proyecto operaciones Mina Toquepala de la empresa Ferreyros SA.*
- Pala-Diaz, A. A. S., & Aguirre-Ruiz, J. L. (2024). *Modelo de mejora para incrementar*

- la disponibilidad mecánica de perforadoras hidráulicas usando el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) y la distribución de Weibull en una empresa del sector minero.* 2024.
- Pala Diaz, A. A. S., & Aguirre Ruiz, J. L. (2024). *Modelo de mejora para incrementar la disponibilidad mecánica de perforadoras hidráulicas usando el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) y la distribución de Weibull en una empresa del sector minero.* Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- Palomino-Quinto, M. A. (2023). *Aplicación del RCM para incrementar la disponibilidad de trituradoras cónicas Nordberg HP400 en Compañía Minera Casapalca.* Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Prada-Salamanca, A. D., & Rincón-Rincón, C. M. (2022). *Propuesta de un plan de mantenimiento basado en confiabilidad para las piloteadoras de la empresa Cimentaciones de Colombia SAS.*
- Ramon-Reynoso, G. G. (2024). *Aplicación de la metodología PMBOK 7º Edición para el incremento de disponibilidad en planta de beneficio El Brocal-Buenaventura.*
- Ramos-Zurichaqui, V. G., & Ramos-Zurichaqui, J. B. (2022). *Propuesta de implementación de la metodología RCM para incrementar la disponibilidad de grúas pórtico sobre neumáticos en un terminal portuario de contenedores.*
- Reyna-Alva, A. H., & Romero-De la Cruz, C. I. (2022). *Propuesta de mejora para aumentar la disponibilidad mecánica de las maquinarias de construcción, en una empresa constructora aplicando RCM y TPM.*
- Salazar-Zegarra, J. (2019). *Propuesta de plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (mcc) para incrementar la disponibilidad de los tractocamiones Freightliner de la empresa Transportes Pakatnamu SAC.*
- Santana Bauista, T. E. (2024). *Análisis de criticidad en sistemas de la flota Scooptram mediante el método Jack-Knife para mejorar su disponibilidad en Minera Condestable.*
- Siguas-Ñagüe, A. J. (2017). *Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento*

centrado en la confiabilidad de cargadores frontales 980h Caterpillar.

Soto-Mayhua, O. M. (2024). *Aplicación de la metodología RCM utilizando el modelo Weibull para mejorar la disponibilidad de excavadoras Komatsu 350PC de una empresa constructora en una unidad minera en Marcona, 2021.*

Vásquez Díaz, J. J. (2019). *Implementación de la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad a excavadoras Caterpillar 336D2L.*

Velandia-Sierra, P. A., Saldaña-Marín, J. A., & Hernández-Moreno, C. H. (2021). *Propuesta de mejora de la gestión para el mantenimiento de los activos en el área de taller de la empresa Solo-Toyota.*

Anexo
Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores	Método
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable dependiente:		
¿Cuán óptimo será la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa aplicando la metodología RCM en la minera Quellaveco en el 2022?	Optimizar la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa aplicando la metodología RCM en la minera Quellaveco en el 2022.	La optimización de la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa es aplicando la metodología RCM en la minera Quellaveco en el 2022.	Disponibilidad mecánica.	Cantidad de fallas. Porcentaje de disponibilidad MTBF y MTTR.	Tipo: Investigación aplicada.
Problemas específicos	Objetivos específicos		Variable independiente:		Nivel: Descriptiva.
¿Cuáles son los modos de falla en la flota de camiones grúa para aplicar la metodología RCM en la minera Quellaveco en el año 2022?	Medir los modos de falla en la flota de camiones grúa para aplicar la metodología RCM en la minera Quellaveco en el año 2022.			Incremento del MTBF. Reducción del MTTR.	
¿En cuánto mejoraran el MTTR y MTBF para la optimización de la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa?	Evaluar la MTTR y MTBF para optimizar de la disponibilidad mecánica de una flota de camiones grúa.		Metodología RCM.	Costo de mantenimiento. Reducción de fallas críticas.	