

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Industrial

Tesis

**Diseño de un plan de mantenimiento predictivo para
incrementar la disponibilidad de los equipos en una
empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada**

Angie Steff Miranda Quispe
Maria Alejandra Puma Achahui

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Industrial

Arequipa, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Julio Cesar Alvarez Barreda
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 22 de Mayo de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

Diseño de un plan de mantenimiento predictivo para incrementar la disponibilidad de los equipos en una empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada

Autores:

1. Angie Steff Miranda Quispe – EAP. Ingeniería Industrial
2. Maria Alejandra Puma Achahui – EAP. Ingeniería Industrial

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 19 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- | | | |
|---|--|--|
| • Filtro de exclusión de bibliografía | SI ☒ | NO ☐ |
| • Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (PALABRAS): 10 palabras | SI ☒ | NO ☐ |
| • Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante | SI ☐ | NO ☒ |

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

La firma del asesor obra en el archivo original no se muestra en este documento por estar expuesto a publicación

ASESOR

Mg. Julio César Alvarez Barreda

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a Dios, quien nos brindó la fuerza, la salud y la sabiduría necesarias para superar cada obstáculo durante este proceso.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional, su paciencia y su constante motivación, quienes estuvieron siempre a nuestro lado, impulsándonos a dar lo mejor de nosotras mismas. Este logro también es suyo.

Asimismo, queremos destacar la colaboración y el compromiso mutuo que hemos tenido como compañeras de tesis. Este proyecto no solo representa un trabajo académico, sino también una experiencia de aprendizaje compartido, que nos permitió crecer tanto profesional como personalmente. Cada idea, esfuerzo y desafío superado juntas es un testimonio de nuestra dedicación y trabajo en equipo.

Finalmente, agradecemos a nuestros profesores y especialmente a nuestro asesor, Mg. Julio César Álvarez Barreda, por su guía, orientación y paciencia a lo largo de este proceso. Su conocimiento y experiencia fueron esenciales para materializar esta investigación.

A todos los que nos acompañaron en este camino, les extendemos nuestro más profundo agradecimiento.

DEDICATORIA

Con todo mi corazón, dedico esta tesis a mis padres, Christian y Noemí, quienes, con su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante han sido mi mayor inspiración para seguir adelante. Todo lo que he logrado es gracias a ustedes.

A Jymm, por ser una luz en mi vida y recordarme siempre que los sueños se alcanzan con esfuerzo y dedicación.

A Edwin, quien con sus palabras de aliento y confianza me demostró que soy capaz de superar cualquier obstáculo. Gracias por creer en mí incluso en los momentos en que yo dudaba de mí misma.

A Ares, Maki y Aria, mis fieles compañeros. Su presencia me recordó que incluso en los momentos más difíciles, un corazón lleno de amor y lealtad puede traer calma y fortaleza.

A todos ustedes, les dedico este logro con infinito amor y gratitud.

Angie Miranda.

Con mucho amor, dedico esta tesis a mi madre, por ser mi mayor fuente de inspiración y fortaleza. Gracias por tu amor incondicional, tu apoyo constante, tu ejemplo de dedicación y esfuerzo me han guiado en cada paso de este camino.

Mi hermano, mi cuñada y mi sobrina. Por llenar mi vida de alegría con tu energía, tus risas y dulzura. Dedico este trabajo a ti, con la esperanza de que, en el futuro, también encuentres la fuerza para perseguir tus metas y hacer realidad tus sueños. Que este logro sea un pequeño ejemplo de lo que se puede alcanzar con esfuerzo, dedicación y amor.

A toda mi familia y a mi novio por su amor, por acompañarme en este viaje. Esta tesis es un reflejo de nuestra complicidad, de nuestras metas compartidas y del amor que nos impulsa a ser mejores cada día, dedico este trabajo con todo mi corazón

M. Alejandra Puma.

ÍNDICE

ASESOR	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Formulación del problema	1
1.2.1 Pregunta general	2
1.2.2 Preguntas específicas	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Justificación.....	2
1.5 Importancia	3
1.6 Delimitación.....	3
1.6.1 Delimitación temporal.....	3
1.6.2 Delimitación espacial.....	3
1.7 Variables	3
1.7.1 Descripción de variables	3
1.7.2 Operacionalización de Variables	3
CAPÍTULO II.....	5

MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Antecedentes de la investigación.....	5
2.1.1 Antecedentes internacionales.....	5
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	5
2.2 Bases teóricas	10
2.2.1 Fundamento teórico de mantenimiento	10
2.2.2 Importancia de mantenimiento	10
2.2.3 Tipos de mantenimiento	10
2.2.4 Importancia del mantenimiento predictivo.....	11
2.2.5 Tecnologías aplicadas al mantenimiento predictivo	12
2.2.6 Relación entre las variables	12
2.2.7 Descripción del rubro de la empresa	14
2.2.8 Importancia del mantenimiento en rubro del alquiler de maquinaria pesada ..	15
2.2.9 Desafíos del sector	16
2.2.10 Tendencias del rubro	16
2.3 Definición de términos básicos	17
2.3.1 Disponibilidad operativa	17
2.3.2 Gestión de mantenimiento.....	17
2.3.3 Parada No Planificada	17
2.3.4 Sensores de monitoreo	18
2.3.5 Vida útil del equipo.....	18
2.3.6 Plan de mantenimiento predictivo.....	18
2.3.7 Disponibilidad de los equipos.....	19
2.3.8 Confiabilidad	19
2.3.9 Diagnóstico predictivo	20
2.3.10 Capacitación en mantenimiento.....	22
2.3.11 Programación del mantenimiento	22
2.3.12 MTBF (Mean Time Between Failures)	23
2.3.13 MTTR (Mean Time To Repair).....	24

CAPÍTULO III	26
METODOLOGÍA.....	26
3.1 Método y alcance de la investigación.....	26
3.2 Diseño de la investigación	26
3.3 Población y muestra.....	27
3.3.1 Población.....	27
3.3.2 Muestra.....	27
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	27
3.4.1 Técnicas de recolección de datos.....	27
3.4.2 Instrumentos de recolección de datos.....	27
3.5 Instrumentos de análisis de datos	27
3.5.1 Matriz de Análisis de frecuencia de fallas.....	28
3.5.2 Proceso de análisis de información.....	29
CAPÍTULO IV	31
DIAGNÓSTICO, ANÁLISIS Y RESULTADOS	31
4.1 Breve descripción de la empresa y sus procesos	31
4.1.1 Valores de la empresa	31
4.1.2 Misión y visión de la empresa	31
4.1.3 Servicio de la empresa.....	32
4.1.4 Organigrama de la empresa	32
4.1.5 Análisis FODA de la empresa	33
4.2 Diagnóstico de la situación actual	36
4.2.1 Análisis del estado actual del mantenimiento.....	36
4.2.2 Indicadores de desempeño operativo actuales	36
4.2.3 Mantenimiento y capacitación.....	39
4.3 Causas de los problemas encontrados en la disponibilidad de la maquinaria	39
4.3.1 Análisis de causa raíz.....	42
4.4 Propuesta de mejora.....	42
4.4.1 Propuesta de diseño de un plan de mantenimiento predictivo	42

4.4.2	Detalles del plan de mantenimiento predictivo.....	43
4.4.3	Plan de gestión del cambio organizacional.....	49
4.5	Medición de la propuesta	51
4.5.1	Cuadro comparativo de horas de mantenimiento correctivo antes y después..	51
4.5.2	Cuadro Comparativo de Indicadores Clave de Desempeño (KPIs)	51
4.5.3	Cuadro de programación estratégica de mantenimiento.....	52
4.5.4	Evaluación del impacto del Plan.....	53
4.5.5	Benchmarking sectorial.....	56
4.6	Análisis económico de la propuesta.....	57
4.6.1	Costos de implementación detallados	57
4.6.2	Costos recurrentes anuales	58
4.6.3	Ahorro proyectado de la propuesta	58
4.7	Evaluación ambiental.....	58
CAPÍTULO V		60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		60
5.1	Conclusiones	60
5.2	Recomendaciones	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		62
ANEXOS.....		65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Operacionalización de las variables.....	4
Tabla 2.	Tipo de mantenimiento.	11
Tabla 3.	Datos recopilados de las maquinarias.	28
Tabla 4.	Matriz FODA cruzado.	34
Tabla 5.	Indicadores clave de desempeño relacionados a disponibilidad y confiabilidad.	36
Tabla 6.	Etapas del plan.....	44
Tabla 7.	Cuadro de parámetros.	47
Tabla 8.	Tipo de equipos de mantenimiento.....	49
Tabla 9.	Mantenimiento correctivo	51
Tabla 10.	Cuadro de comparativo de indicadores.	52
Tabla 11.	Cuadro de programación de estrategias.....	53
Tabla 12.	Evaluación de costo.	54
Tabla 13.	Evaluación del impacto del plan.	54
Tabla 14.	Temporalidad mensual del ahorro y beneficio.....	55
Tabla 15.	Beneficios temporales.	56
Tabla 16.	Análisis comparativo con otras empresas.....	57
Tabla 17.	Los costos de implementación.	57
Tabla 18.	Los costos recurrentes anuales.....	58
Tabla 19.	El ahorro proyectado de la propuesta.....	58
Tabla 20.	Evaluación ambiental.	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Organigrama de la empresa.....	33
Figura 2.	Diagrama de Ishikawa de disponibilidad operativa de la maquinaria.....	41
Figura 3.	Diagrama de disponibilidad operativa.	55

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo diseñar un plan de mantenimiento predictivo que permita incrementar la disponibilidad de los equipos en una empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada, una industria clave para sectores como la minería, la construcción y la agroindustria. Ante la problemática detectada, se identificó que la falta de un plan estructurado genera un bajo rendimiento operativo, con una disponibilidad promedio del 86.88%, por debajo del estándar ideal del 90%. Además, se encontraron factores críticos como la alta frecuencia de fallas, la ausencia de tecnología de monitoreo en tiempo real, y la dependencia del mantenimiento correctivo, lo cual incrementa los costos operativos y disminuye la satisfacción del cliente.

Para abordar esta situación, se propuso implementar un plan de mantenimiento predictivo basado en tecnologías avanzadas, como el análisis de aceite SOS, sensores IoT y software de gestión (CMMS). Este plan incluye el diagnóstico inicial de las condiciones actuales, la capacitación del personal técnico, la programación estratégica de intervenciones y el uso de datos para tomar decisiones basadas en condiciones reales de los equipos. Los resultados proyectados del plan evidencian una mejora significativa en los indicadores clave de desempeño: un aumento de la disponibilidad operativa del 85% al 92%, una reducción del tiempo medio de reparación (MTTR) del 30%, y un incremento del 12% en la confiabilidad de los equipos.

Asimismo, la implementación del plan generará beneficios económicos al reducir los costos de reparaciones críticas y los tiempos de inactividad, estimándose un ahorro anual de \$30,000. En términos ambientales, se proyecta una disminución del consumo de recursos y una reducción en los residuos generados. Además, el plan impactará positivamente en el ámbito social, al mejorar la estabilidad laboral, la capacitación técnica del personal y la satisfacción del cliente. Esta propuesta posiciona a la empresa como una organización más competitiva, eficiente y sostenible dentro del sector.

Palabras clave: mantenimiento predictivo, disponibilidad operativa, análisis de aceite SOS, confiabilidad, maquinaria pesada.

ABSTRACT

This research aims to design a predictive maintenance plan to increase the availability of equipment in a heavy machinery rental company, a key industry for sectors such as mining, construction, and agribusiness. The identified problem is the lack of a structured plan, which results in low operational performance, with an average availability of 86.88%, below the ideal standard of 90%. Additionally, critical factors such as a high frequency of failures, the absence of real-time monitoring technology, and the reliance on corrective maintenance were found, increasing operational costs and decreasing customer satisfaction.

To address this situation, a predictive maintenance plan based on advanced technologies, such as SOS oil analysis, IoT sensors, and management software (CMMS), was proposed. This plan includes an initial diagnosis of current conditions, technical staff training, strategic scheduling of interventions, and data-driven decision-making regarding the actual condition of the equipment. The projected results show significant improvements in key performance indicators: an increase in operational availability from 85% to 92%, a 30% reduction in mean time to repair (MTTR), and a 12% increase in equipment reliability.

Additionally, implementing the plan will generate economic benefits by reducing the costs of critical repairs and downtime, with an estimated annual saving of \$30,000. Environmentally, resource consumption and waste generation are expected to decrease. The plan will also have a positive social impact by enhancing job stability, improving technical staff training, and increasing customer satisfaction. This proposal positions the company as a more competitive, efficient, and sustainable organization within the sector.

Keywords: predictive maintenance, operational availability, SOS oil analysis, reliability, heavy machinery.

INTRODUCCIÓN

En el competitivo mercado de alquiler de maquinaria pesada, la disponibilidad operativa de los equipos se ha convertido en un factor clave para garantizar el cumplimiento de contratos, mantener la satisfacción de los clientes y optimizar los ingresos. Este tipo de empresas, que desempeñan un papel fundamental en sectores estratégicos como la minería y la construcción, enfrentan constantes desafíos relacionados con fallas imprevistas, tiempos de inactividad prolongados y costos elevados de mantenimiento. Las referidas problemáticas no solo afectan la operatividad de la maquinaria, sino que también comprometen la reputación y competitividad de las empresas en un mercado altamente exigente.

El problema principal radica en la ausencia de un sistema adecuado de mantenimiento predictivo. Muchas empresas aún dependen del mantenimiento correctivo, el cual se realiza únicamente cuando los equipos presentan fallas, o del mantenimiento preventivo, que, aunque es más estructurado, puede generar intervenciones innecesarias. Este enfoque reactivo o parcialmente planificado limita la capacidad de anticipar fallas críticas y optimizar los recursos, lo que impacta negativamente en indicadores clave como la disponibilidad física de los equipos, el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR). Como resultado, las empresas enfrentan mayores costos operativos, menor eficiencia interna y dificultades para cumplir con los compromisos establecidos.

El objetivo de la investigación es diseñar un plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceite SOS y en tecnologías avanzadas de monitoreo en tiempo real. La propuesta no solo busca aumentar la disponibilidad operativa de los equipos, sino también mejorar la sostenibilidad y competitividad de la empresa. Para ello, se parte de un diagnóstico exhaustivo que identifica las principales causas de los problemas operativos, entre ellas: la falta de capacitación técnica del personal, el desgaste acelerado de componentes críticos y la ausencia de herramientas tecnológicas adecuadas para el monitoreo continuo de los equipos. La propuesta incluye estrategias orientadas a optimizar los recursos disponibles, reducir los costos operativos y garantizar la sostenibilidad del negocio.

El trabajo está estructurado en varias secciones que abordan de manera integral todos los aspectos relacionados con el problema y la solución propuesta. Inicialmente, se desarrolla el planteamiento del problema, donde se detallan las implicancias de la baja disponibilidad operativa de los equipos y se establecen los objetivos de la investigación. El análisis incluye tanto los objetivos generales como los específicos, los cuales buscan diagnosticar la situación actual, identificar las causas de las fallas y evaluar la efectividad de las estrategias propuestas.

Además, se justifica la relevancia de este estudio, destacando cómo su implementación puede beneficiar no solo a la empresa objeto de estudio, sino también a otras organizaciones con problemas similares en el sector.

En el marco teórico, se revisan antecedentes nacionales e internacionales que han documentado el impacto del mantenimiento predictivo en la mejora de la eficiencia operativa de equipos industriales. Estos antecedentes permiten identificar buenas prácticas y lecciones aprendidas que sirven como base para la propuesta. Asimismo, se desarrollan conceptos fundamentales como los tipos de mantenimiento existentes (correctivo, preventivo y predictivo) y las tecnologías aplicadas al mantenimiento predictivo, incluyendo sensores IoT, análisis de aceite SOS y software de gestión (CMMS). También se resalta la importancia del mantenimiento en el sector de maquinaria pesada, donde la alta demanda y los entornos de trabajo extremos exigen estrategias de mantenimiento más eficientes.

La metodología adoptada en esta investigación combina enfoques descriptivos y aplicados, lo que permite diagnosticar de manera precisa la situación actual de la empresa y proponer soluciones concretas. Se detalla el diseño de investigación, las técnicas de recolección de datos y los instrumentos utilizados, como fichas de revisión documentaria y matrices de análisis de fallas. Además, se describen los indicadores clave de desempeño (KPIs) empleados para medir la efectividad del mantenimiento, tales como el MTBF, el MTTR y la disponibilidad operativa. La muestra seleccionada incluye equipos representativos de la flota de la empresa, lo que garantiza la validez de los resultados obtenidos.

El diagnóstico y análisis de resultados presentan una visión detallada del estado actual de la empresa, evidenciando problemas relacionados con la falta de planificación en las actividades de mantenimiento, el uso limitado de tecnologías predictivas y la falta de capacitación técnica del personal. También se identifican factores externos que afectan la disponibilidad de los equipos, como las condiciones adversas del terreno y la demora en la adquisición de piezas críticas. Sobre esta base, se diseña un plan de mantenimiento predictivo que incorpora el uso de sensores IoT y análisis de aceite SOS, junto con un programa de capacitación técnica para el personal. Este plan está orientado a reducir las paradas no planificadas, optimizar el tiempo de uso de los equipos y garantizar la continuidad operativa de la empresa.

Además, se evalúan los impactos económicos, sociales y ambientales de la propuesta. En términos económicos, se proyecta una significativa reducción en los costos operativos y un retorno de inversión positivo gracias al aumento de la disponibilidad operativa. En el ámbito social, se espera fortalecer las competencias del personal técnico y mejorar la percepción de los clientes sobre la calidad del servicio ofrecido. Finalmente, en el aspecto ambiental, se prevé

una disminución en el consumo de recursos y en la generación de residuos, posicionando a la empresa como una organización más sostenible.

Este trabajo no solo busca responder a una problemática específica, sino que también tiene un alcance más amplio al contribuir al conocimiento en el campo de la ingeniería industrial. La metodología y las estrategias desarrolladas son aplicables a otras empresas del sector con desafíos similares, lo que refuerza el valor de la investigación como una herramienta práctica y replicable.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento del problema

En el contexto actual, las empresas de alquiler de maquinaria pesada enfrentan un desafío constante relacionado con la disponibilidad de sus equipos. La alta demanda por parte de sectores como la minería, la construcción y otras industrias pesadas requieren que las máquinas estén operativas durante la mayor cantidad de tiempo posible. Sin embargo, en muchas ocasiones, la falta de un sistema adecuado de mantenimiento predictivo provoca fallos inesperados, tiempos de inactividad prolongados y un aumento en los costos operativos. Los citados problemas no solo afectan la eficiencia interna de la empresa, sino que también tienen un impacto directo en la prestación del servicio a los clientes, lo que puede traducirse en incumplimientos contractuales, penalidades económicas y una disminución de la competitividad en el mercado (Galarza, 2017).

El principal problema identificado es que muchas empresas de alquiler de maquinaria pesada carecen de un plan de mantenimiento predictivo adecuado, lo que genera paradas inesperadas y una menor disponibilidad de los equipos. Esta situación se ve agravada por la falta de capacitación del personal, la ausencia de protocolos de seguridad efectivos y la limitada supervisión del estado de las máquinas. Al no contar con un plan preventivo estructurado, las empresas corren el riesgo de incurrir en mayores costos operativos, tiempos de inactividad prolongados y, en última instancia, la insatisfacción de los clientes.

Por tanto, se requiere diseñar un plan de mantenimiento predictivo que incremente la disponibilidad de los equipos, minimizando las fallas inesperadas y maximizando la eficiencia operativa. Esta investigación se centra en diseñar e implementar dicho plan para una empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada, con el fin de mejorar su capacidad operativa y competitividad en el mercado.

1.2 Formulación del problema

La falta de un sistema de mantenimiento predictivo adecuado en las empresas de servicio de alquiler de maquinaria pesada genera una baja disponibilidad de los equipos, lo que afecta directamente la operatividad y los tiempos de respuesta. Esto puede derivar en paradas imprevistas y un incremento en los costos operativos debido a la necesidad de reparaciones correctivas, así como en una disminución en la capacidad de cumplir con los contratos y atender

la demanda de los clientes. Implementar un plan de mantenimiento predictivo es clave para aumentar la disponibilidad de los equipos, reduciendo los tiempos de inactividad no planificados y mejorando la eficiencia operativa (Rabines, 2020).

1.2.1 Pregunta general

¿El diseño de un plan de mantenimiento predictivo incrementará la disponibilidad de los equipos en una empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada?

1.2.2 Preguntas específicas

- a) ¿Cuál es la situación actual de la disponibilidad de la maquinaria?
- b) ¿Cuáles son las causas de los problemas encontrados en la disponibilidad de la maquinaria?
- c) ¿Qué indicadores y métricas deben utilizarse para evaluar la efectividad del plan de mantenimiento predictivo propuesto?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un plan de mantenimiento predictivo para incrementar la disponibilidad de los equipos en una empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Diagnosticar la situación actual de la disponibilidad de la maquinaria.
- b) Identificar las causas de los problemas encontrados en la disponibilidad de la maquinaria.
- c) Evaluar la efectividad del plan del mantenimiento predictivo propuesto.

1.4 Justificación

La presente investigación tiene como finalidad mejorar la disponibilidad de los equipos en una empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada, mediante la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo. El sistema permitirá reducir significativamente las paradas inesperadas, incrementando la operatividad de los equipos y asegurando un servicio continuo a los clientes. Al implementar un mantenimiento predictivo, se espera minimizar los tiempos de inactividad no planificados, lo que evitará penalidades o multas derivadas de fallos

en el servicio, y mejorará la capacidad de la empresa para cumplir con sus compromisos contractuales y operativos (Rabines, 2020). Además, un sistema de mantenimiento predictivo bien diseñado contribuirá a una gestión más eficiente de los recursos, optimizando el uso de la maquinaria y prolongando su vida útil, lo que resulta en una operación más sostenible y confiable.

1.5 Importancia

La implementación de un plan de mantenimiento predictivo es crucial para garantizar la disponibilidad y operatividad de los equipos en empresas de alquiler de maquinaria pesada. Este enfoque permite prever fallas potenciales y programar intervenciones antes de que los equipos sufran daños significativos, asegurando así la continuidad operativa y reduciendo los costos asociados a reparaciones correctivas y tiempos de inactividad no planificados. Según lo expuesto por Rabines (2020), un mantenimiento predictivo eficaz no solo optimiza la eficiencia y competitividad de la empresa, sino que también promueve la sostenibilidad mediante una gestión eficiente de los recursos.

1.6 Delimitación

1.6.1 Delimitación temporal

La investigación se llevará a cabo durante un período de seis meses, desde julio de 2023 hasta diciembre de 2023.

1.6.2 Delimitación espacial

La investigación se llevará a cabo en una empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada, que opera en el distrito de Cerro Colorado en la ciudad de Arequipa, Perú.

1.7 Variables

1.7.1 Descripción de variables

Variable independiente: plan de mantenimiento predictivo.

Variable dependiente: disponibilidad de los equipos.

1.7.2 Operacionalización de Variables

A continuación, se presenta la tabla con la operacionalización de las variables:

Tabla 1. Operacionalización de las variables.

VARIABLES	D. CONCEPTUALES	DIMENSIONES	INDICADORES
VARIABLE INDEPENDIENTE			
Plan de mantenimiento predictivo	Según Razuri (2020), el mantenimiento predictivo se basa en la aplicación de técnicas avanzadas de diagnóstico, como análisis de vibraciones, termografía, ultrasonido y monitoreo de lubricantes, para detectar anomalías y programar intervenciones en el momento óptimo, evitando paradas imprevistas.	Diagnóstico	Tasa de errores actuales Porcentaje de equipos con análisis de aceite SOS implementado
		Capacitación	Porcentaje de cumplimiento de plan de capacitaciones.
		Programación	Porcentaje de cumplimiento de la programación.
VARIABLE DEPENDIENTE			
Disponibilidad de equipos	Según Centeno (2023), la disponibilidad es un indicador clave en la gestión de activos, ya que permite medir la eficiencia del mantenimiento y la eficiencia de los equipos.	Disponibilidad	Disponibilidad (A)= $\frac{MTBF+MTTR}{MTBF}$
		Confiabilidad	Confiabilidad (R) = $e^{(-\lambda t)}$

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Roso, D. Mantenimiento predictivo en máquinas amarillas de Obrecol SAS, (2022). El objetivo principal del estudio fue implementar un sistema de mantenimiento predictivo en las máquinas amarillas de la empresa estudiada, con el fin de reducir los tiempos de inactividad y mejorar el rendimiento operativo de la flota. Para alcanzar este propósito, la investigación utilizó herramientas como la observación directa en las operaciones y el análisis de registros históricos relacionados con las fallas de los equipos. Este enfoque permitió identificar patrones de fallos y oportunidades de mejora en los procesos de mantenimiento. La propuesta incluyó la implementación de un enfoque de mantenimiento predictivo que combinaba tecnologías de monitoreo avanzado y técnicas de análisis proactivo para anticiparse a posibles fallas. El estudio demostró que la implementación del sistema de mantenimiento predictivo generó una mejora significativa en la disponibilidad de las máquinas y en la eficiencia general de las operaciones.

Martínez, L. Implementación de mantenimiento predictivo en la industria minera, (2021). El objetivo de su estudio fue analizar cómo el mantenimiento predictivo puede mejorar la eficiencia de la maquinaria en una empresa minera. Se empleó un enfoque aplicado, utilizando el análisis de datos históricos de fallas y el monitoreo en tiempo real para identificar patrones y anticipar posibles averías. La población consistió en equipos críticos de una empresa minera, mientras que la muestra se centró en maquinarias con mayor impacto operativo. La propuesta incluyó la implementación de tecnologías predictivas avanzadas y la capacitación del personal en su uso. Los resultados evidenciaron una reducción del 15% en los tiempos de inactividad, destacando que el mantenimiento predictivo optimiza recursos y reduce costos operativos.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Minchan Huaccha y Vásquez Bardales, 2021. Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para mejorar la disponibilidad de maquinaria pesada de la empresa Multiservicios Leo's. El objetivo principal de esta investigación fue diseñar un plan de mantenimiento preventivo para incrementar la disponibilidad de la maquinaria pesada en la empresa. El estudio utilizó como herramientas la revisión documental y el análisis de registros de fallas, enfocándose en los equipos con mayor frecuencia de averías. La propuesta contempló un programa estructurado de

mantenimiento preventivo que incluía cronogramas específicos de intervención y capacitación técnica. Se concluyó que la implementación del plan mejoró significativamente la disponibilidad operativa de los equipos, reduciendo tiempos de inactividad y optimizando el rendimiento general de la maquinaria.

Gavilán Guillen, 2023. Plan de mantenimiento preventivo empleando análisis de fallas, para aumentar disponibilidad de la excavadora John Deere 350G empresa Ecosem. El objetivo de la tesis fue implementar un plan de mantenimiento preventivo para incrementar la disponibilidad de la excavadora John Deere 350G en la compañía. La investigación se centró en el análisis de fallas históricas y la evaluación de los componentes críticos del equipo. La muestra incluyó la excavadora con mayor impacto en las operaciones. La propuesta incorporó un cronograma detallado de actividades preventivas y la capacitación técnica del personal. Como resultado, se observó una mejora en la disponibilidad operativa de la excavadora, destacándose la importancia de prevenir fallas mediante el análisis sistemático de datos.

Campos Salinas, D. M., y Escalante Soria, 2023. Plan de Mantenimiento Preventivo para incrementar la disponibilidad de las maquinarias pesadas de la empresa Vachavez Contratistas Generales SRL TDA. La investigación tuvo como objetivo proponer un plan de mantenimiento preventivo (PMP) para incrementar la disponibilidad de las maquinarias pesadas de la organización. Utilizó herramientas como el análisis de registros operativos y entrevistas con el personal técnico, enfocándose en los equipos con mayores tiempos de inactividad. La propuesta incluyó la elaboración de un programa preventivo basado en cronogramas estratégicos y el diseño de procedimientos de inspección regular. Los resultados evidenciaron una mejora notable en la disponibilidad operativa de las maquinarias, lo que permitió reducir costos de reparación y optimizar los recursos.

Rabines, 2020. Mantenimiento predictivo y disponibilidad de flota de maquinaria pesada. El estudio tuvo como objetivo desarrollar un sistema de gestión de mantenimiento predictivo para incrementar la disponibilidad mecánica de la flota de equipos. Fue de tipo explicativo, empleando herramientas como entrevistas, encuestas y análisis de indicadores clave de desempeño. La muestra incluyó equipos con mayor frecuencia de fallas, priorizando los más críticos. La propuesta consistió en implementar un sistema de mantenimiento predictivo apoyado en tecnologías de monitoreo continuo y análisis de datos. Como resultado, la disponibilidad de la flota aumentó del 84% al 91%, demostrando que este enfoque también contribuye a reducir los costos operativos.

Benavides, 2019. Plan de Mantenimiento Preventivo para maquinaria pesada en la Municipalidad Distrital de Cajaruro. El objetivo fue desarrollar un plan de mantenimiento

preventivo enfocado en asegurar la mantenibilidad, confiabilidad y disponibilidad de los equipos. La investigación fue descriptiva, utilizando análisis documental y entrevistas para recolectar información sobre el estado actual de la maquinaria. La población consistió en la flota municipal de equipos pesados, y se seleccionaron las unidades con mayor impacto operativo como muestra. La propuesta incluyó la elaboración de cronogramas preventivos y la capacitación del personal encargado del mantenimiento. Los resultados destacaron la importancia de aplicar indicadores MCD para optimizar las actividades preventivas y garantizar su efectividad.

Vega Centeno Lima, 2024. Diseño de un plan de mantenimiento predictivo basado en la tribología de lubricante en motores diésel Mitsubishi modelo 4M50 de 174 hp para una altitud de 4100 msnm. El trabajo tuvo como objetivo diseñar un plan de mantenimiento predictivo fundamentado en la tribología de lubricantes aplicada a motores diésel Mitsubishi 4M50 de 174 hp. La investigación utilizó análisis de laboratorio para evaluar el desgaste y la fricción en componentes críticos bajo condiciones de alta altitud. La población incluyó motores operando en entornos exigentes, con énfasis en aquellos que presentaban mayor deterioro. La propuesta integró un monitoreo continuo del lubricante y un programa predictivo basado en los resultados del análisis tribológico. Se concluyó que este enfoque mejora la durabilidad de los motores y reduce fallas operativas.

Dávalos Manrique, 2024. Implementación de un plan de mantenimiento predictivo en la gestión del mantenimiento de equipos críticos en el área de molienda de la mina Tajus Perú 2021. El objetivo de esta investigación fue diseñar e implementar un plan de mantenimiento predictivo para mejorar la gestión de equipos críticos en el área de molienda de una operación minera. Se empleó un enfoque aplicado con herramientas como monitoreo en tiempo real, análisis de registros históricos y entrevistas al personal técnico. La población incluyó equipos del área de molienda, seleccionando aquellos con mayor impacto en la producción como muestra. La propuesta integró el uso de tecnologías predictivas y un programa de mantenimiento basado en la condición de los equipos. Los resultados mostraron mejoras significativas en la disponibilidad y la eficiencia operativa.

Valverde Obregón, 2021. Plan de mantenimiento preventivo para maquinaria pesada en minera Chinalco Perú SA. El estudio presentó un plan de mantenimiento preventivo dirigido a maquinaria pesada, enfocado en la operación del Taller de Equipos Pesados N°2. El objetivo fue optimizar el desempeño de los equipos mediante un análisis de las fallas y demoras registradas en el taller. Se utilizó un enfoque basado en el análisis de datos históricos y la identificación de patrones de fallas. La población estuvo conformada por equipos del taller, y

se seleccionaron los de mayor incidencia de averías como muestra. La propuesta incluyó un cronograma de actividades preventivas y estrategias de inspección periódica. Los resultados demostraron una disminución en las fallas y una mejora en la disponibilidad operativa.

Galarza Flores, K. J., 2024. Implementación de un plan de mantenimiento de las maquinarias pesadas, aplicando la metodología AMEF para medir la disponibilidad en la empresa Inteqmin. El trabajo tuvo como objetivo principal implementar un plan de mantenimiento preventivo para medir y mejorar la disponibilidad operativa de maquinarias pesadas mediante la aplicación de la metodología AMEF (Análisis de Modo y Efecto de Falla). Este enfoque sistemático permitió identificar fallas críticas y sus impactos en la confiabilidad de los equipos. La población estuvo constituida por la flota operativa de la empresa, y se seleccionaron los equipos con mayor incidencia de fallos. La propuesta incluyó un programa preventivo enfocado en la mitigación de riesgos, logrando aumentar la confiabilidad y eficiencia operativa de la maquinaria.

Canaza Charca, V. Y., 2024. Implementación de un plan de mantenimiento preventivo en cargador frontal Volvo L120F para incrementar la disponibilidad en la Municipalidad de Azángaro. El estudio se desarrolló con el objetivo de implementar un plan de mantenimiento preventivo para incrementar la disponibilidad del cargador frontal Volvo L120F en la Municipalidad Provincial de Azángaro. Se utilizó un enfoque descriptivo, con herramientas como el análisis de registros históricos de fallas y observaciones directas del desempeño del equipo. La población incluyó los equipos pesados utilizados en obras de construcción y mantenimiento vial. La propuesta integró un cronograma preventivo estructurado y estrategias de capacitación técnica. Como resultado, se logró una reducción en el tiempo de inactividad y una mayor eficiencia en las operaciones municipales.

Sovero Hidalgo, E. F., y Caro Contreras, E. A., 2024. Proyecto de una propuesta de implementación de las buenas prácticas del PMBOK en el plan de mantenimiento preventivo para mejorar la disponibilidad de motores diésel en camiones de acarreo de una mina ubicada en el sur del Perú. El objetivo de este trabajo fue implementar las buenas prácticas del PMBOK en un plan de mantenimiento preventivo para incrementar la disponibilidad de motores diésel en camiones de acarreo. Se utilizó un enfoque basado en la gestión de riesgos y el conocimiento, complementado con la medición del valor del negocio. La población estuvo conformada por camiones de acarreo de una mina en el sur del Perú, y la muestra incluyó aquellos con mayor incidencia de averías no programadas. La propuesta planteó estrategias para optimizar la programación y reducir los tiempos de inactividad. Se espera lograr una mayor disponibilidad operativa, optimización de recursos y disminución de costos operativos.

Laura Unchupaico, Josly., (2024). Plan de mantenimiento preventivo para mejorar la disponibilidad mecánica de los equipos trackless de la contrata minera Cristóbal SAC. La investigación tuvo como objetivo diseñar un plan de mantenimiento preventivo para mejorar la disponibilidad mecánica de los equipos trackless, cuya disponibilidad promedio era de 68%, muy por debajo del 85% exigido. La población estuvo constituida por los equipos trackless de la empresa, seleccionando como muestra aquellos más críticos para las operaciones mineras subterráneas. Se utilizó un enfoque descriptivo para recopilar y analizar información sobre fallas recurrentes. La propuesta incluyó la planificación estructurada de mantenimientos y la capacitación técnica del personal. Como resultado, se proyecta un aumento significativo en la disponibilidad y en el cumplimiento de los estándares de operación.

Gómez Fernández, Ana María., (2023). Diseño de un sistema de mantenimiento predictivo basado en monitoreo de vibraciones para optimizar la disponibilidad de equipos industriales en el sector energético. El estudio tuvo como objetivo diseñar un sistema de mantenimiento predictivo utilizando monitoreo de vibraciones para mejorar la disponibilidad operativa de equipos en una planta del sector energético. La investigación adoptó un enfoque aplicado, empleando sensores IoT para la recolección de datos en tiempo real y análisis espectral para identificar anomalías. La población incluyó equipos críticos de generación energética, seleccionando como muestra aquellos con mayor incidencia de fallas. La propuesta incorporó un sistema automatizado de monitoreo continuo y un programa de intervención basado en las condiciones del equipo. Los resultados mostraron una reducción significativa en los tiempos de inactividad y una mayor confiabilidad en las operaciones.

Villalta Manchego, Edgar Alvaro, (2024). Propuesta de plan de mantenimiento proactivo para la flota de camiones de acarreo en la unidad minera Constancia. Esta investigación abordó el problema de una baja disponibilidad promedio (80.36%) en los camiones de acarreo modelo 793F de la unidad minera Constancia. El objetivo fue diseñar un plan de mantenimiento proactivo para incrementar la eficiencia operativa. Se empleó un enfoque mixto, con análisis cualitativo y cuantitativo de registros históricos y entrevistas al personal técnico. La población incluyó la flota completa de camiones, priorizando aquellos con mayor frecuencia de fallas. La propuesta integró la planificación preventiva y la implementación de sistemas de monitoreo. Se espera mejorar significativamente la disponibilidad operativa y optimizar los costos de mantenimiento.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Fundamento teórico de mantenimiento

Según Centeno (2023) en su plan de mantenimiento preventivo, se ha descrito como el conjunto de actividades destinadas a asegurar que los equipos funcionen durante el mayor tiempo posible de su vida útil. Con el avance tecnológico, las instalaciones han evolucionado hacia sistemas más complejos y especializados, incluyendo grandes líneas de producción. La interrupción de tales sistemas puede resultar en pérdidas económicas significativas. Por lo tanto, la relevancia del mantenimiento radica en la necesidad de contar con una estructura que permite restaurar rápidamente las condiciones óptimas de funcionamiento, con el propósito de minimizar las pérdidas de producción.

Desde la perspectiva de la gestión del mantenimiento, su objetivo principal es asegurar que el equipo mantenga su capacidad de servicio. En otras palabras, el mantenimiento se lleva a cabo para garantizar que el equipo cumpla eficazmente su función en el sistema de producción.

2.2.2 Importancia de mantenimiento

Según Centeno (2023) en su plan de mantenimiento preventivo, el mantenimiento se percibe como una actividad esencial para garantizar la disponibilidad de equipos, edificaciones e instalaciones. El estado adecuado de las herramientas físicas depende en gran medida de estas operaciones. El mantenimiento se debe considerar como una parte fundamental y esencial de la organización encargada de una fase operativa. De igual manera, el personal encargado de estas labores es de vital importancia. Si buscamos optimizar esta área, significa que tratamos de reducir los gastos mientras logramos mantener o mejorar el rendimiento. En la actualidad, el factor humano es el elemento más significativo a tener en cuenta, y debemos centrar nuestros esfuerzos en encontrar maneras de ahorrar, que hagan que la empresa sea más competitiva.

2.2.3 Tipos de mantenimiento

Según Razuri. (2020), existen varios tipos de mantenimiento, cada uno de los cuales se adapta a diferentes necesidades y situaciones. A continuación, se presenta una descripción de los tipos más comunes de mantenimiento:

Tabla 2. Tipo de mantenimiento.

Tipo de Mantenimiento	Descripción	Ejemplo de Aplicación	Ventajas	Desventajas
Correctivo	Reparar o reemplazar equipos o componentes después de una falla.	Reparar un motor quemado o sustituir un fusible fundido.	- Bajo costo inicial. - Simplicidad en su ejecución.	- Incrementa tiempos muertos. - Costos inesperados.
Preventivo	Inspecciones y tareas regulares para evitar fallas y extender la vida útil del equipo.	Cambiar el aceite de un motor periódicamente.	- Previene fallas inesperadas. - Mejora la confiabilidad.	- Requiere tiempo y planificación. - Costos periódicos.
Predictivo	Uso de datos y tecnologías para anticipar fallas antes de que ocurran.	Monitorear vibraciones en motores para detectar desgaste.	- Minimiza el tiempo de inactividad. - Mayor precisión en reparaciones.	- Requiere tecnología avanzada y personal capacitado.

2.2.4 Importancia del mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es una estrategia de gestión clave para las empresas que dependen de equipos críticos, como las de alquiler de maquinaria pesada. Este enfoque se basa en la detección temprana de fallas mediante el monitoreo continuo de parámetros operativos, permitiendo que las intervenciones se realicen sólo cuando son necesarias. Según Centeno (2023), su importancia radica en la capacidad de reducir los tiempos de inactividad no planificados, disminuir los costos operativos asociados con reparaciones correctivas y prolongar la vida útil de los equipos.

En el contexto de la maquinaria pesada, el mantenimiento predictivo contribuye directamente a la sostenibilidad empresarial al optimizar los recursos, reducir los residuos y garantizar la continuidad del servicio a los clientes. Además, es una herramienta clave para mejorar la competitividad, ya que incrementa la disponibilidad operativa, un indicador esencial en el sector.

2.2.5 Tecnologías aplicadas al mantenimiento predictivo

El avance de las tecnologías ha revolucionado la gestión del mantenimiento. A continuación, se menciona una herramienta importante:

2.2.5.1 Análisis de aceite SOS (Scheduled Oil Sampling)

El análisis de aceite SOS (Scheduled Oil Sampling) es una técnica de diagnóstico predictivo que permite evaluar el estado interno de los componentes de un equipo mediante el estudio de su lubricante. Esta técnica consiste en tomar muestras periódicas de aceite para su análisis en laboratorio, identificando elementos de desgaste, contaminación y degradación del lubricante.

Según Caterpillar (2021), esta técnica permite detectar partículas metálicas que revelan desgaste de componentes internos, así como la presencia de agua, combustibles o contaminantes que comprometen el funcionamiento del motor o del sistema hidráulico.

a) Principales parámetros evaluados:

- Viscosidad del aceite
- Presencia de metales (hierro, cobre, plomo, etc.)
- Niveles de hollín y azufre
- Contaminación por agua o combustible
- Índice de acidez (TAN) y alcalinidad (TBN)

b) Ventajas del análisis SOS:

- Detección temprana de fallas internas
- Prevención de fallas catastróficas
- Programación precisa de mantenimiento
- Extensión de la vida útil del lubricante y del equipo

2.2.6 Relación entre las variables

El Plan de mantenimiento predictivo y la disponibilidad de los equipos están estrechamente relacionados, ya que las intervenciones basadas en el monitoreo continuo permiten detectar fallas antes de que ocurran, evitando paradas no planificadas. Este enfoque, basado en datos reales de operación, optimiza el tiempo útil de los equipos, mejorando los indicadores de disponibilidad y confiabilidad, sin necesidad de intervenir en ciclos de trabajo innecesarios.

2.2.6.1 Relación directa entre las variables

a) Reducción de tiempos de inactividad no planificados:

La implementación del mantenimiento predictivo —a través de tecnologías como el análisis de aceite SOS y sensores IoT— permite identificar fallas incipientes, lo que reduce significativamente los tiempos de parada y, por tanto, incrementa la disponibilidad operativa de la maquinaria.

b) Mejora del rendimiento operativo:

A mayor disponibilidad y confiabilidad de los equipos, mayor es la capacidad de la empresa para cumplir con sus compromisos contractuales. Esto se traduce en una mejor respuesta a la demanda, optimizando el uso efectivo de los recursos disponibles, lo cual contribuye indirectamente al rendimiento global del servicio, sin entrar a definir una variable de eficiencia.

c) Impacto en la confiabilidad de los equipos:

Al mantener un monitoreo constante, se reduce la frecuencia de fallas inesperadas, elevando así la confiabilidad. Esto permite mantener la operación continua de los equipos, reduciendo imprevistos y reforzando la calidad del servicio.

2.2.6.2 Relación con indicadores clave

Los indicadores clave de desempeño (KPIs) como el MTBF (Mean Time Between Failures) y el MTTR (Mean Time to Repair) son esenciales para medir la efectividad de esta relación:

a) Incremento del MTBF:

Con el mantenimiento predictivo, el tiempo promedio entre fallas tiende a aumentar, ya que las intervenciones se realizan antes de que ocurran fallas mayores. Esto eleva la disponibilidad de los equipos y reduce la frecuencia de reparaciones.

b) Reducción del MTTR:

Al identificar problemas en sus etapas iniciales, las reparaciones necesarias suelen ser menos complejas y, por ende, más rápidas. Esto acorta los tiempos promedio de reparación, impactando positivamente la disponibilidad.

2.2.6.3 Impactos adicionales

a) Impacto económico:

La reducción de tiempos de inactividad no solo evita pérdidas asociadas a proyectos detenidos, sino que también disminuye los costos relacionados con reparaciones correctivas. Según Galarza (2017), la implementación de un plan de mantenimiento predictivo puede generar ahorros de hasta un 30% en costos operativos anuales.

b) Satisfacción del cliente:

Una alta disponibilidad de equipos asegura el cumplimiento de los plazos establecidos con los clientes, reduciendo las probabilidades de penalidades contractuales. Esto refuerza la relación comercial y mejora la reputación de la empresa en el mercado.

c) Impacto en la sostenibilidad:

Al evitar fallas críticas, se minimiza el desperdicio de recursos, como repuestos y lubricantes, y se reducen los residuos generados por reparaciones mayores. Esto posiciona a la empresa como una organización responsable y comprometida con el medio ambiente.

2.2.7 Descripción del rubro de la empresa

Las empresas dedicadas al alquiler de maquinaria pesada desempeñan un papel esencial en sectores estratégicos como la minería, la construcción, la agroindustria y otros proyectos de infraestructura. Estas organizaciones ofrecen equipos especializados, como excavadoras, cargadores frontales, grúas, camiones de acarreo y otros activos, que son fundamentales para la ejecución de tareas de alta complejidad técnica, como el movimiento de tierras, excavaciones profundas, transporte de materiales y levantamiento de estructuras pesadas.

2.2.7.1. Características del rubro:

a) Alta dependencia de la disponibilidad operativa:

Las empresas de este sector dependen de la capacidad de sus equipos para estar operativos durante la mayor parte del tiempo, ya que cualquier interrupción impacta directamente en los plazos de los proyectos y, por ende, en la rentabilidad. Según Galarza (2017), una baja disponibilidad puede generar incumplimientos contractuales, penalidades económicas y pérdida de confianza de los clientes.

b) Variedad de equipos:

La flota de maquinaria pesada incluye equipos de diferentes capacidades y características, diseñados para responder a las diversas necesidades de sus clientes. Esto requiere una gestión eficiente del mantenimiento, ya que las condiciones de trabajo (como el terreno, la carga y la frecuencia de uso) varían significativamente entre un proyecto y otro.

c) Naturaleza intensiva del capital:

El sector requiere una inversión inicial alta para adquirir y mantener la flota de equipos, por lo que optimizar el tiempo de actividad de cada máquina es crucial para maximizar el retorno sobre la inversión (ROI). Además, la renovación constante de equipos para mantenerlos competitivos tecnológicamente representa un desafío financiero y estratégico.

d) Entornos de trabajo extremos:

Las máquinas suelen operar en condiciones adversas, como altas temperaturas, polvo, humedad y terrenos irregulares. Estas condiciones incrementan el desgaste y la probabilidad de fallas, lo que refuerza la importancia de implementar estrategias de mantenimiento predictivo.

e) Dependencia de la demanda estacional:

En sectores como la construcción o la minería, la demanda de equipos de alquiler puede fluctuar dependiendo de las estaciones, los ciclos económicos o el avance de los proyectos. Esto hace que la planificación de mantenimiento deba adaptarse a estos periodos, maximizando la disponibilidad en épocas de alta demanda.

2.2.8 Importancia del mantenimiento en el rubro del alquiler de maquinaria pesada

El mantenimiento, especialmente el predictivo, es un pilar fundamental en las empresas de maquinaria pesada, ya que permite:

- a) Garantizar la continuidad operativa: reduciendo las paradas imprevistas y optimizando el tiempo de uso de cada máquina.
- b) Aumentar la satisfacción del cliente: cumpliendo con los plazos de los proyectos y asegurando la disponibilidad de los equipos cuando se necesiten.
- c) Reducir costos operativos: evitando reparaciones correctivas costosas y maximizando la vida útil de los equipos.

- d) Mejorar la sostenibilidad: minimizar el consumo de recursos y la generación de residuos mediante intervenciones planificadas y precisas.

2.2.9 Desafíos del sector

- a) Gestión de flotas:

Coordinar una flota diversa y extensa requiere herramientas tecnológicas avanzadas, como software de gestión de mantenimiento (CMMS) y sistemas de rastreo GPS, para garantizar una supervisión constante del estado y la ubicación de los equipos.

- b) Obsolescencia tecnológica:

La maquinaria debe estar actualizada con las últimas innovaciones tecnológicas para cumplir con las normativas ambientales, mejorar la eficiencia energética y satisfacer las exigencias de los clientes.

- c) Capacitación del personal:

El personal técnico y operativo debe estar constantemente capacitado en el uso de nuevas tecnologías, técnicas de diagnóstico y mantenimiento avanzado, especialmente en análisis de aceite, monitoreo de vibraciones y sistemas IoT.

- d) Cumplimiento normativo:

Las regulaciones ambientales y de seguridad son estrictas en sectores como la minería y la construcción. Las empresas deben asegurarse de que sus equipos cumplan con los estándares vigentes, lo que incluye mantener controles adecuados de emisiones y gestionar de manera responsable los desechos generados por el mantenimiento.

2.2.10 Tendencias del rubro

- a) Digitalización del mantenimiento:

La adopción de tecnologías digitales, como sensores IoT y análisis predictivo basado en big data, está transformando la forma en que las empresas gestionan su flota, permitiendo diagnósticos más precisos y decisiones basadas en datos en tiempo real.

b) Alquiler especializado:

Las empresas están diversificando su flota para incluir maquinaria altamente especializada y adaptada a proyectos específicos, como excavadoras para terrenos extremos o grúas de gran capacidad para infraestructura urbana.

c) Sostenibilidad:

Los clientes están demandando equipos más eficientes energéticamente y menos contaminantes. Esto ha impulsado a las empresas a invertir en maquinaria híbrida o eléctrica, así como a adoptar prácticas de mantenimiento más responsables con el medio ambiente.

2.3 Definición de términos básicos

2.3.1 Disponibilidad operativa

La disponibilidad de los equipos representa la capacidad de la maquinaria para estar operativa y cumplir con sus funciones según lo requerido. Este indicador es crucial para empresas de alquiler de maquinaria pesada, ya que asegura la continuidad del servicio ofrecido a los clientes y el cumplimiento de los compromisos contractuales (Centeno, 2023).

La disponibilidad se calcula como el porcentaje de tiempo durante el cual los equipos están disponibles para operar, considerando tanto el tiempo de inactividad planificado (mantenimiento) como no planificado (fallas).

2.3.2 Gestión de mantenimiento

Es el proceso que permite planificar, organizar y supervisar las actividades de mantenimiento en una empresa. En el caso de empresas de alquiler de maquinaria pesada, la gestión adecuada implica asegurar la disponibilidad de equipos, optimizar recursos y minimizar los costos asociados a reparaciones inesperadas (Centeno, 2023).

2.3.3 Parada No Planificada

Se refiere al tiempo de inactividad de un equipo debido a fallas imprevistas. Este tipo de interrupciones afecta la eficiencia y genera costos adicionales, especialmente en industrias que requieren el uso constante de maquinaria, como la construcción o la minería (Galarza, 2017).

2.3.4 Sensores de monitoreo

Son dispositivos electrónicos utilizados para recopilar datos sobre el estado de los equipos en tiempo real. Estos sensores permiten detectar anomalías como vibraciones excesivas, temperaturas elevadas o presiones inadecuadas, ayudando a identificar problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas graves (Razuri, 2020).

2.3.5 Vida útil del equipo

Es el período durante el cual un equipo puede operar eficientemente antes de que su rendimiento comience a deteriorarse de manera significativa. Implementar un mantenimiento predictivo puede extender esta vida útil al prevenir fallas mayores y mantener las condiciones óptimas de funcionamiento (Galarza, 2017).

2.3.6 Plan de mantenimiento predictivo

El Plan de mantenimiento predictivo se refiere al conjunto de actividades y estrategias organizadas que buscan monitorear el estado de los equipos de manera continua, utilizando herramientas tecnológicas para detectar posibles fallas antes de que estas ocurran. Este enfoque permite realizar intervenciones planificadas en el momento óptimo, evitando fallos críticos que impacten negativamente en la operatividad de la maquinaria (Razuri, 2020).

El diseño de un plan de mantenimiento predictivo incluye:

- a) Uso de tecnologías avanzadas: sensores, software de análisis y sistemas IoT (Internet de las Cosas) para recopilar datos en tiempo real.
- b) Diagnóstico continuo: monitoreo de indicadores clave como temperatura, vibraciones y presión.
- c) Planificación estratégica: determinación de tiempos ideales para las intervenciones, minimizando las interrupciones en el servicio.
- d) Capacitación del personal: formación de técnicos y operadores para interpretar los datos y ejecutar las actividades correspondientes.

Un mantenimiento predictivo efectivo no solo mejora la disponibilidad de los equipos, sino que también optimiza el uso de recursos, reduce los costos operativos y prolonga la vida útil de los activos.

Indicadores clave para medir el Plan de mantenimiento predictivo:

- a) Número de intervenciones planificadas frente a no planificadas.
- b) Porcentaje de equipos monitoreados con sensores.
- c) Reducción de costos asociados a fallas no previstas.

2.3.7 Disponibilidad de los equipos

La disponibilidad de los equipos representa la capacidad de la maquinaria para estar operativa y cumplir con sus funciones según lo requerido. Este indicador es crucial para empresas de alquiler de maquinaria pesada, ya que asegura la continuidad del servicio ofrecido a los clientes y el cumplimiento de los compromisos contractuales (Centeno, 2023).

La disponibilidad se calcula como el porcentaje de tiempo durante el cual los equipos están disponibles para operar, considerando tanto el tiempo de inactividad planificado (mantenimiento) como no planificado (fallas).

Factores que afectan la disponibilidad:

- a) Fallas no planificadas: daños repentinos que detienen el funcionamiento de los equipos.
- b) Eficiencia del mantenimiento: capacidad para realizar intervenciones rápidas y efectivas.
- c) Capacitación del personal técnico: nivel de preparación para identificar y resolver problemas de manera eficiente.

Fórmula de disponibilidad operativa:

$$\text{disponibilidad (A)} = \frac{MTBF + MTTR}{MTBF} \quad (1)$$

Indicadores clave para medir la disponibilidad de los equipos:

- a) Tiempo promedio entre fallos (MTBF, por sus siglas en inglés).
- b) Tiempo promedio de reparación (MTTR, por sus siglas en inglés).
- c) Porcentaje de disponibilidad mensual o anual.

2.3.8 Confiabilidad

Mide la capacidad del equipo de operar sin fallas durante un período de tiempo.

a) Fórmula:

$$Confiabilidad = e^{MTBF - t} \quad (2)$$

b) Indicadores clave:

- Tiempo medio entre fallas (MTBF)
- Frecuencia de fallas por periodo
- Reducción de eventos de fallas inesperadas

c) Métodos para evaluar la confiabilidad:

- Análisis de Weibull: estima la vida útil y tasa de fallos de los equipos.
- Modelos probabilísticos: como la función de confiabilidad $R(t)=e^{-\lambda t}$.
- Análisis de modos y efectos de falla (FMEA): identifica y clasifica fallas potenciales.

2.3.9 Diagnóstico predictivo

El diagnóstico predictivo es el conjunto de técnicas utilizadas para evaluar la condición de los equipos en tiempo real, con el fin de anticipar fallas y minimizar el tiempo de inactividad. Su propósito es detectar anomalías antes de que se conviertan en fallas críticas, optimizando así la disponibilidad y confiabilidad de los activos.

2.3.9.1 Técnicas de diagnóstico predictivo:

a) Análisis de vibraciones

Se basa en la medición de las vibraciones mecánicas de un equipo para detectar desajustes, desalineaciones y fallas en rodamientos.

Métodos empleados:

- Espectro de vibraciones FFT (Fast Fourier Transform).
- Análisis de envolvente para detección de fallas en rodamientos.
- Análisis de fase y órbitas en maquinaria rotativa.

b) Termografía infrarroja

Evalúa la temperatura de componentes mecánicos y eléctricos mediante cámaras infrarrojas.

Aplicaciones:

- Identificación de sobrecalentamientos en motores y sistemas eléctricos.
- Inspección de fugas térmicas en sistemas hidráulicos.

c) Análisis de lubricantes

Permite identificar contaminación, degradación del lubricante y desgaste de componentes internos.

Parámetros analizados:

- Viscosidad.
- Contenido de partículas metálicas.
- Índice de acidez y agua.

d) Ultrasonido acústico

Se utiliza para detectar fugas de aire comprimido, desgaste en cojinetes y fallas en válvulas.

Ventajas:

- Permite identificar problemas antes de que sean perceptibles mediante otros métodos.
- Se puede aplicar en equipos eléctricos sin contacto directo.

e) Análisis de corriente eléctrica

Permite diagnosticar anomalías en motores eléctricos monitoreando el consumo de corriente.

Aplicaciones:

- Detección de fallas en devanados y desequilibrios de fases.
- Identificación de variaciones en la carga del motor.

2.3.9.2 Beneficios del diagnóstico predictivo

- a) Reducción de costos de mantenimiento correctivo.
- b) Aumento de la vida útil de los equipos.
- c) Mayor seguridad operativa al prevenir fallas catastróficas.
- d) Optimización de la planificación del mantenimiento.

2.3.10 Capacitación en mantenimiento

La capacitación en mantenimiento es un proceso esencial para mejorar la gestión del mantenimiento predictivo. Consiste en la formación del personal técnico en el uso de herramientas de monitoreo, interpretación de datos y toma de decisiones basada en análisis predictivos.

2.3.10.1 Áreas clave de capacitación

- a) Uso de tecnologías predictivas
 - Capacitación en el uso de sensores IoT y software de monitoreo.
 - Manejo de equipos de diagnóstico como analizadores de vibraciones y termógrafos.
- b) Interpretación de datos y análisis predictivo
 - Formación en estadística aplicada al mantenimiento.
 - Aplicación de modelos de inteligencia artificial para detección de patrones de fallas.
- c) Estrategias de toma de decisiones
 - Implementación de metodologías como FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) para priorización de fallas.
 - Uso de herramientas de Business Intelligence para la gestión de mantenimiento.

2.3.10.2 Beneficios de la capacitación en mantenimiento

- a) Reducción de errores en la toma de decisiones.
- b) Mejora en la eficiencia del equipo de mantenimiento.
- c) Mayor capacidad de respuesta ante fallas incipientes.

2.3.11 Programación del mantenimiento

La programación del mantenimiento es el proceso de planificación y ejecución de actividades de mantenimiento predictivo para optimizar los recursos y minimizar los tiempos de inactividad.

2.3.11.1 Componentes de la programación del mantenimiento

- a) Priorización de equipos y actividades
 - Uso del análisis de criticidad para determinar qué equipos requieren mayor atención.
 - Priorización basada en costos de falla y riesgo operativo.
- b) Determinación de la frecuencia óptima de inspección
 - Aplicación de modelos de confiabilidad para definir intervalos de mantenimiento.
 - Uso de herramientas como el análisis de Weibull para predecir la vida útil restante.
- c) Coordinación de recursos y repuestos
 - Gestión del inventario de repuestos basada en pronósticos de fallas.
 - Uso de sistemas CMMS para programar órdenes de trabajo.
- d) Integración con Sistemas de Gestión Empresarial (ERP)
 - Conexión con módulos financieros y logísticos para una planificación más eficiente.
 - Sincronización con compras y almacenes para evitar demoras por falta de repuestos.

2.3.11.2 Beneficios de una programación eficiente

- Reducción de tiempos de inactividad.
- Disminución de costos operativos.
- Mayor eficiencia en la asignación de recursos.

2.3.12 MTBF (Mean Time Between Failures)

El MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas) es un indicador clave de confiabilidad que mide el tiempo promedio que transcurre entre una falla y la siguiente en un equipo en operación.

- a) Cálculo del MTBF

Se calcula con la fórmula:

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total de operación}}{\text{Número de fallas}} \quad (3)$$

Donde:

- Tiempo total de operación es el tiempo acumulado en que el equipo ha estado funcionando sin fallas.
- Número de fallas representa la cantidad de fallas registradas en ese período.

b) Importancia del MTBF

- Permite evaluar la confiabilidad de los equipos.
- Ayuda en la planificación del mantenimiento preventivo y predictivo.
- Es clave para mejorar la eficiencia operativa de los activos.

c) Factores que Afectan el MTBF

- Diseño del equipo.
- Condiciones operativas.
- Calidad del mantenimiento.

d) Estrategias para Mejorar el MTBF

- Implementación de mantenimiento predictivo.
- Uso de materiales y componentes de mayor calidad.
- Reducción del estrés operativo en los equipos.

2.3.13 MTTR (Mean Time To Repair)

El MTTR (Tiempo Medio de Reparación) mide el tiempo promedio necesario para reparar un equipo después de una falla. Es un indicador clave de la eficiencia del mantenimiento correctivo.

a) Cálculo del MTTR

Se calcula con la fórmula:

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de reparación}}{\text{Número de fallas}} \quad (4)$$

Donde:

- Tiempo total de reparación es el tiempo acumulado invertido en reparaciones.
- Número de fallas es la cantidad de fallas ocurridas en ese período.

b) Importancia del MTTR

- Permite medir la rapidez del equipo de mantenimiento.
- Es clave para reducir los tiempos de inactividad.
- Ayuda a optimizar los procesos de reparación y disponibilidad de repuestos.

c) Factores que Afectan el MTTR

- Disponibilidad de técnicos capacitados.
- Accesibilidad a repuestos y herramientas.
- Complejidad de la reparación.

d) Estrategias para reducir el MTTR

- Implementación de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).
- Optimización de almacenes de repuestos.
- Capacitación del personal en técnicas de diagnóstico rápido.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Método y alcance de la investigación

La presente investigación sigue un enfoque lógico deductivo, lo que implica partir de teorías y principios generales para llegar a conclusiones específicas relacionadas con el diseño de un plan de mantenimiento predictivo. Este método permite establecer una base teórica sólida que sustenta la hipótesis de que la implementación de un plan de mantenimiento predictivo incrementa la disponibilidad de los equipos en una empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada. A través del razonamiento lógico, se analizan y aplican conceptos generales al contexto específico de la empresa, facilitando la identificación de patrones y relaciones causales que respaldan la eficacia del plan propuesto (Hernández Sampieri et al., 2014).

El tipo de investigación adoptado es descriptivo, ya que tiene como objetivo principal describir detalladamente el estado actual del mantenimiento predictivo y la disponibilidad de los equipos en una empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada. Este tipo de investigación permite caracterizar el fenómeno de estudio, identificando y detallando los factores que influyen en la disponibilidad de la maquinaria pesada. Además, facilita la recopilación de información precisa y exhaustiva que sirve como base para el diseño e implementación del plan de mantenimiento predictivo, proporcionando una visión clara de las necesidades y desafíos existentes (Hernández Sampieri et al., 2014).

3.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental, lo que significa que no se manipularán variables independientes ni se controlarán condiciones externas durante el estudio. En lugar de ello, se observarán y analizarán los fenómenos tal como ocurren de manera natural en el entorno de la empresa de alquiler de maquinaria pesada. Este diseño es adecuado para estudios descriptivos donde el objetivo es comprender y describir las características y relaciones existentes entre variables sin intervenir en el proceso (Hernández Sampieri et al., 2014). La elección de un diseño no experimental permite una mayor flexibilidad en la recopilación de datos y asegura que los hallazgos reflejen fielmente la realidad operativa de la empresa.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población de esta investigación está compuesta por 10 maquinarias pertenecientes a una empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada en Arequipa.

3.3.2 Muestra

Se seleccionarán 5 maquinarias mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, ya que son las maquinarias a las que se tuvo acceso.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Técnicas de recolección de datos

La técnica de recolección de datos utilizada en esta investigación será la revisión documentaria. Esta técnica implica el análisis exhaustivo de documentos existentes relacionados con el mantenimiento de las maquinarias, como registros de mantenimiento, informes de fallas, cronogramas de mantenimiento y manuales de operación. La revisión documentaria permite obtener información detallada y precisa sobre el estado actual de las maquinarias, los procedimientos de mantenimiento existentes y los desafíos enfrentados en la gestión de la disponibilidad de los equipos (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio, 2014).

3.4.2 Instrumentos de recolección de datos

El instrumento de recolección de datos empleado será la Ficha de revisión documentaria. Esta ficha está diseñada para sistematizar y organizar la información obtenida durante la revisión de documentos, permitiendo una comparación y análisis eficiente de los datos recopilados. La ficha incluye campos específicos para registrar detalles como el tipo de maquinaria, historial de mantenimiento, frecuencia de fallas, tiempos de inactividad, y cualquier otra información relevante que contribuya a evaluar la efectividad del plan de mantenimiento predictivo (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio, 2014).

3.5 Instrumentos de análisis de datos

Para analizar los datos recopilados, se empleó un Excel de indicadores de las maquinarias que permiten interpretar y evaluar la información de manera sistemática, asegurando que los hallazgos sean relevantes y útiles para el diseño del plan de mantenimiento predictivo.

Tabla 3. Datos recopilados de las maquinarias.

MES	ITEM	EQUIPO	HORAS MANTTO	DISP. FÍSICA	DISP. CONTRAC	UTLZ.	MTBF (Hrs)	MTTR (Hrs)	Confiab (Hrs)
JULIO	1	VQT-84	34	82,50%	95,50%	38,70%	34	17	66%
	2	VQT-80	72	85,50%	90,40%	39,10%	47	8	85%
	3	988F-3	85	88,50%	88,50%	26,10%	29	4	89%
	4	324DL-1	99	86,70%	86,70%	31,60%	54	11	83%
	5	324DL-2	92	87,70%	87,70%	4,10%	4	9	34%
AGOSTO	1	VQT-84	72	87,80%	89,90%	36,20%	46	6	89%
	2	VQT-80	132	81,70%	81,70%	46,80%	59	3	95%
	3	988F-3	87	88,00%	88,00%	61,30%	57	3	96%
	4	324DL-1	77	89,30%	89,30%	52,60%	84	3	97%
	5	324DL-2	0	100,00%	100,00%	6,20%	45	-	100%
SETIEMBRE	1	VQT-84	42	94,40%	94,40%	51,80%	53	2	96%
	2	VQT-80	32	95,60%	95,60%	45,50%	168	6	97%
	3	988F-3	96	87,10%	87,10%	13,30%	73	60	55%
	4	324DL-1	108	85,40%	85,40%	46,90%	51	11	82%
	5	324DL-2	2	99,70%	99,70%	0,90%	7	2	77%
OCTUBRE	1	VQT-84	110	84,70%	84,70%	58,90%	90	1	99%
	2	VQT-80	15	97,90%	97,90%	60,40%	143	1	99%
	3	988F-3	98	86,40%	86,40%	44,50%	74	13	85%
	4	324DL-1	19	96,90%	97,30%	16,80%	20	2	90%
	5	324DL-2	132	73,40%	81,60%	18,00%	20	25	45%
NOVIEMBRE	1	VQT-84	164	77,20%	77,20%	52,00%	39	2	94%
	2	VQT-80	210	70,90%	70,90%	50,90%	37	3	92%
	3	988F-3	126	82,50%	82,50%	61,90%	64	2	97%
	4	324DL-1	57	89,20%	92,00%	32,60%	74	6	93%
	5	324DL-2	35	95,10%	95,10%	59,40%	422	17	96%
DICIEMBRE	1	VQT-84	154	79,30%	79,30%	47,00%	57	2	96%
	2	VQT-80	120	83,90%	83,90%	78,60%	38	3	93%
	3	988F-3	44	84,90%	94,10%	46,20%	33	12	73%
	4	324DL-1	75	89,90%	89,90%	49,40%	87	2	97%
	5	324DL-2	192	74,20%	74,20%	38,80%	11	10	50%

3.5.1 Matriz de Análisis de frecuencia de fallas

Según Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio (2014), la organización y sistematización de datos en matrices facilita el análisis de información cualitativa y cuantitativa. Por ello, se diseñará una matriz que relacione el historial de fallas de cada maquinaria con la frecuencia y el tipo de averías reportadas. Este instrumento permitirá identificar patrones

recurrentes en las fallas y planificar intervenciones predictivas. La matriz incluirá campos como:

- a) Tipo de maquinaria.
- b) Tipo de falla.
- c) Frecuencia mensual/anual.
- d) Duración promedio del tiempo de inactividad.

3.5.2 Proceso de análisis de información

El proceso de análisis de información dentro de un sistema de mantenimiento predictivo para maquinaria pesada se basa en una metodología estructurada que facilita la conversión de datos en información útil y accionable. Este enfoque permite detectar posibles fallas con anticipación, mejorar la eficiencia operativa y minimizar costos innecesarios.

Para lograrlo, se inicia con la recopilación y organización de datos provenientes de diversas fuentes, incluyendo registros históricos de mantenimiento, sensores IoT que monitorean variables clave como vibración, temperatura y presión, análisis de lubricantes para detectar desgaste prematuro, y encuestas o entrevistas con el personal técnico encargado del mantenimiento diario de los equipos. La adecuada clasificación y limpieza de estos datos garantiza su confiabilidad y utilidad en las siguientes fases del análisis.

Una vez estructurada la información, se aplican modelos y técnicas de análisis que permiten evaluar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos. Se emplean indicadores clave de desempeño (KPI), como el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), que mide la confiabilidad del equipo; el Tiempo Medio de Reparación (MTTR), que indica la velocidad con la que se resuelven fallas; y la Disponibilidad Operativa, que muestra el porcentaje de tiempo en que la maquinaria está en funcionamiento. Estos datos permiten identificar tendencias y establecer estrategias para mejorar la planificación del mantenimiento.

Además, se utilizan herramientas avanzadas como la matriz AMEF (Análisis de Modo y Efecto de Falla) para clasificar y priorizar fallas según su impacto y probabilidad de ocurrencia. También se aplican análisis estadísticos, como gráficos de tendencias, para visualizar las causas más frecuentes de fallas y tomar decisiones informadas sobre la asignación de recursos. Tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático permiten desarrollar modelos predictivos capaces de anticipar averías antes de que sucedan, mejorando la eficiencia del mantenimiento.

El siguiente paso es la comparación de resultados antes y después de la implementación del mantenimiento predictivo. Se analizan mejoras en indicadores clave, reducción en tiempos de inactividad y disminución de costos operativos. Además, se evalúan los beneficios desde una perspectiva económica (ahorro en reparaciones y repuestos), ambiental (optimización del consumo de energía y reducción del desperdicio de materiales) y social (mayor seguridad laboral y mejor desempeño del personal técnico).

Finalmente, con base en los resultados obtenidos, se elaboran informes detallados que incluyen gráficos, estadísticas y recomendaciones específicas para optimizar la gestión del mantenimiento. Se ajustan estrategias, se mejoran los programas de mantenimiento y se implementan nuevas tecnologías para garantizar un funcionamiento eficiente y confiable de la maquinaria, minimizando fallas imprevistas y maximizando la eficiencia.

CAPÍTULO IV

DIAGNÓSTICO, ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 Breve descripción de la empresa y sus procesos

La empresa se ha consolidado como un proveedor confiable y líder en la industria de la construcción y la minería en el sur del Perú, gestiona una amplia flota de maquinaria pesada que abarca excavadoras, cargadores frontales, grúas y otros equipos esenciales es una organización especializada en ejecución de obras de movimiento de tierras y alquiler de maquinaria pesada comprometida con sus clientes en el fiel cumplimiento de los contratos adjudicados, así como el cumplimiento con todos los estándares de seguridad y medio ambiente.

4.1.1 Valores de la empresa

- a) Integridad: mantener un estándar de conducta honesta y transparente en todas las actividades y elecciones comerciales.
- b) Respeto: mostrar consideración y cortesía hacia los empleados, clientes, proveedores y todas las partes involucradas en la empresa.
- c) Responsabilidad: asumir la responsabilidad por las acciones y los logros de la organización.
- d) Calidad: compromiso con la excelencia y el suministro de productos o servicios de alto nivel.
- e) Innovación: estimular la creatividad y persistir en la búsqueda constante de nuevas ideas y soluciones innovadoras.

4.1.2 Misión y visión de la empresa

- a) Misión

Consolidarse como una empresa especializada en ejecución de obras de tierras y alquiler de maquinaria pesada, comprometida con sus clientes en el fiel cumplimiento de los contratos adjudicados en el plazo contratado, el precio convenido y en cumplimiento de los contratos adjudicados en el plazo contratado, al precio convenido y en cumplimiento de todos los estándares de seguridad y medio ambiente.

b) Visión

Ser una organización especializada que mantiene el liderazgo en ejecución de obras que mantiene el liderazgo en el mercado de equipos y servicios en todos los sectores de maquinaria pesada y ejecución de obras de movimiento de tierras. Ser una empresa líder en el mercado peruano, conocida a nivel nacional e internacional por su capacidad, calidad, seguridad y cumplimiento.

4.1.3 Servicio de la empresa

Es una empresa que se dedica a proporcionar servicios de alquiler y leasing de maquinaria, equipos y bienes tangibles, así como servicios de transporte de carga por carretera y actividades de apoyo para la explotación de minas, ofrece una amplia gama de servicios esenciales para diversos sectores industriales. A continuación, se detallan estos servicios de manera más precisa:

a) Alquiler y Leasing de maquinaria y equipos:

La empresa brinda a sus clientes la posibilidad de arrendar o alquilar una amplia variedad de maquinaria y equipos, que incluyen maquinaria pesada, vehículos industriales, herramientas especializadas y otros activos físicos. Los clientes tienen la flexibilidad de elegir arrendamientos de corto o largo plazo.

b) Transporte de carga por carretera:

La empresa ofrece servicios de transporte de la maquinaria a diversos yacimientos mineros con el propósito de trasladar la maquinaria y equipos según el cliente lo requiera. Esto involucra el uso de cama baja para el transporte de mercancías, que pueden abarcar entregas locales, nacionales.

c) Administración de flota y mantenimiento:

La empresa, además de ofrecer maquinaria y equipo en alquiler, hace seguimiento constante para la gestión de flota de sus propios equipos de maquinaria pesada. Esto implica programar mantenimientos y garantizar que los equipos se mantengan en óptimas condiciones operativas.

4.1.4 Organigrama de la empresa

A continuación, se presenta el organigrama funcional de la empresa.

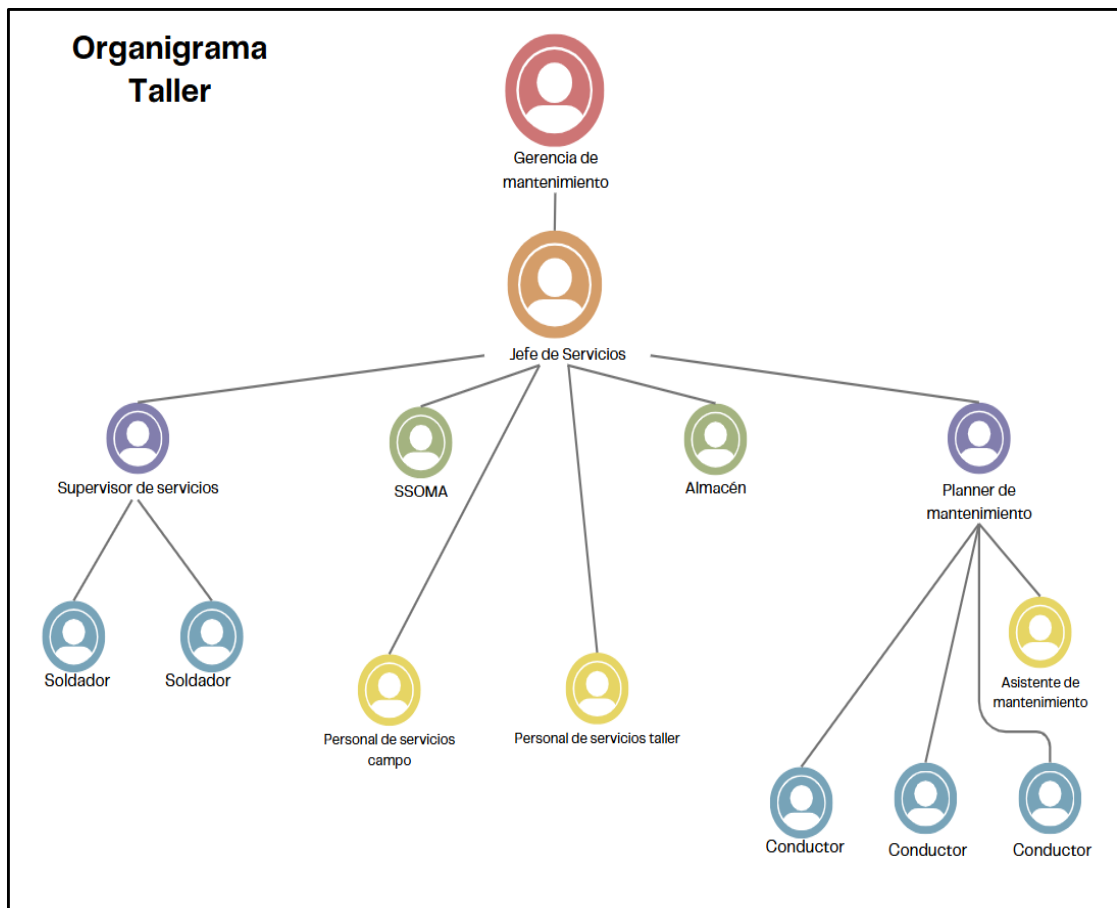


Figura 1. *Organigrama de la empresa.*

4.1.5 Análisis FODA de la empresa

Tabla 4. Matriz FODA cruzado.

MATRIZ FODA CRUZADO	OPORTUNIDADES (*)	AMENAZAS (/)
	O1. Crecimiento en la construcción y la minería: Participar en proyectos de construcción en crecimiento y en la expansión de la industria minera. O2. Demanda de equipos especializados: Satisfacer la creciente demanda de maquinaria pesada especializada en proyectos específicos. O3. Sostenibilidad ambiental: Ofrecer equipos más eficientes desde el punto de vista energético y respetuosos con el medio ambiente para atraer a clientes preocupados por la sostenibilidad. O4. Alianzas estratégicas: Colaborar con empresas de construcción y otros socios para aumentar la base de clientes y desarrollar proyectos conjuntos.	A1. Cambios normativos: Cambios en las regulaciones ambientales y de seguridad pueden afectar la operación y los costos de cumplimiento. A2. Ciclos económicos: La vulnerabilidad a la recesión económica podría reducir la demanda de alquiler de maquinaria pesada. A3. Nuevos competidores: la incorporación de nuevos rivales en el mercado podría intensificarse la competencia y disminuir los márgenes de ganancia. A4. Maquinaria obsoleta: La obsolescencia de la maquinaria puede disminuir la demanda de alquiler de modelos más antiguos podría reducir la demanda de alquiler de maquinaria pesada.
	FORTALEZAS (+)	
	FO (FORTALEZAS - OPORTUNIDADES) (max-min)	FA (FORTALEZAS - AMENAZAS) (max-min)
F1. Variedad de equipos: Se cuenta con una amplia gama de maquinaria pesada que satisface diferentes necesidades de los clientes.	(F1, O1, O3): Se aprovecha la amplia variedad de equipos disponibles para participar activamente en proyectos de construcción y minería, adaptándose a las necesidades específicas de cada sector y fortaleciendo la presencia en mercados clave.	(F1, A1): Se explota la diversidad de maquinaria pesada para adaptarse ágilmente a los cambios normativos, asegurando que los equipos cumplan con las regulaciones ambientales y de seguridad, lo que reduce el impacto en las operaciones y minimiza riesgos frente a posibles sanciones.
F2. Mantenimiento de alta calidad: Se realiza mantenimiento preventivo regular para garantizar el rendimiento y la seguridad de los equipos.	(F2, O2): Se emplea un mantenimiento preventivo de excelencia como elemento diferenciador para garantizar el óptimo desempeño y la disponibilidad constante de equipos especializados, respondiendo a la creciente demanda de maquinaria confiable en el sector.	(F2, A2): Se aplica un mantenimiento preventivo de alta calidad para garantizar la confiabilidad y el rendimiento constante de los equipos, asegurando que los clientes sigan confiando en la maquinaria pesada incluso durante períodos de recesión económica, manteniendo la disponibilidad y reduciendo costos imprevistos.
F3. Personal capacitado: Se dispone de un equipo altamente capacitado en la operación y el mantenimiento de la maquinaria.	(F4, O3): Se utiliza la destacada reputación de la empresa como plataforma para posicionarse como un referente en sostenibilidad, promoviendo el uso de maquinaria eficiente en consumo energético y respetuosa con el medio ambiente, en línea con las expectativas de clientes comprometidos con la sostenibilidad.	(F3, A3): Se aprovecha la formación avanzada del personal para ofrecer un servicio único y destacado, garantizando que los equipos sean operados y mantenidos eficientemente, lo que permite a la empresa mantenerse competitiva ante nuevos competidores y enfrentar desafíos del mercado.
F4. Buena reputación: Se goza de una sólida reputación en el mercado gracias a la calidad de los equipos y al servicio al cliente.	(F4, O4): Se explota la sólida reputación empresarial para consolidar el liderazgo en sostenibilidad, impulsando soluciones de maquinaria que optimizan el uso de energía y minimizan el impacto ambiental, cumpliendo así con las exigencias de responsabilidad ecológica del mercado actual.	(F4, A4): Se explota la sólida reputación de la empresa para impulsar la actualización continua de la flota de maquinaria, destacando la calidad y el excelente servicio al cliente, lo que asegura que los clientes sigan confiando en la empresa sin verse afectados por la obsolescencia de algunos modelos.
F5. Ubicación estratégica: Se está ubicado en áreas geográficas estratégicas que permiten atender diversos proyectos.		

DEBILIDADES (-)	DO (DEBILIDADES - OPORTUNIDADES) (min- max)	DA (DEBILIDADES - AMENAZAS) (min-min)
D1. Dependencia de la economía local: Ser sensible a las fluctuaciones económicas locales y a la incertidumbre del mercado. D2. Competencia intensa: Enfrentar una fuerte competencia en el mercado de alquiler de maquinaria pesada. D3. Costos de mantenimiento elevados: Los costos de mantenimiento significativos pueden afectar la rentabilidad de la empresa. D4. Tecnología desactualizada: La falta de inversión en sistemas de seguimiento y gestión de flotas puede obstaculizar la optimización de las operaciones. D5. Desarrollar tecnologías en maquinaria pesada para mantener la eficiencia y funcionalidad. Ofertas personalizadas adaptadas a necesidades específicas de clientes. Inversión en I+D para innovar y anticipar demandas del mercado. Servicios de mantenimiento predictivo mediante tecnologías avanzadas para prevenir fallas y maximizar el tiempo de actividad.	D1, O1 Ampliar las operaciones y enfocarse en proyectos en expansión dentro de los sectores de construcción y minería, con el fin de disminuir la dependencia de las fluctuaciones económicas locales, aprovechando el crecimiento de estas industrias para estabilizar y potenciar la demanda de maquinaria pesada. D2,02 Destacar frente a la competencia ofreciendo maquinaria pesada especializada, diseñada para proyectos específicos, cubriendo las necesidades particulares de los clientes y consolidándose como líder en el alquiler de equipos. D3,03 Adoptar tecnologías y prácticas sostenibles para disminuir los costos de mantenimiento, centrándose en equipos que sean eficientes en el uso de energía y respetuosos con el medio ambiente, lo que no solo optimiza los costos operativos, sino que también atrae a clientes interesados en opciones sostenibles. D4,O4 Establecer alianzas estratégicas para obtener recursos y tecnologías de vanguardia que actualizan los sistemas de seguimiento y gestión de flotas, optimizando la eficiencia operativa.	D2,A2 Mejorar la eficiencia de los costos operativos y ampliar la variedad de servicios para destacarse de la competencia, mientras se mitiga la caída de la demanda en tiempos de recesión económica, brindando soluciones atractivas y adaptables a las necesidades. D3,A3 Adoptar un enfoque de mantenimiento eficiente apoyado en tecnologías avanzadas y métodos innovadores, con el objetivo de reducir los costos operativos y salvar los márgenes de ganancia ante el aumento de la competencia en el mercado. D4, A4 Actualizar los sistemas de gestión de flotas y renovar la maquinaria para optimizar la eficiencia operativa, preservar la competitividad y cumplir con la demanda de equipos modernos, reduciendo la obsolescencia y mejorando la imagen de la empresa.

4.2 Diagnóstico de la situación actual

La evaluación de la situación actual de la empresa, que opera en el rubro de alquiler de maquinaria pesada, se enfocó en los indicadores clave de desempeño operativo de su flota. Este análisis permitió identificar los principales desafíos relacionados con la disponibilidad, utilización, confiabilidad y mantenimiento de los equipos, los cuales representan el punto de partida para el diseño del plan de mantenimiento predictivo propuesto.

4.2.1 Análisis del estado actual del mantenimiento

El mantenimiento en la empresa actualmente se realiza mediante un enfoque predominantemente preventivo, pero con limitaciones en la implementación de tecnologías predictivas avanzadas. Según Hernández Sampieri et al. (2014), las empresas que dependen de maquinaria pesada requieren estrategias de mantenimiento bien estructuradas para evitar interrupciones en los servicios. Sin embargo, la empresa enfrenta desafíos para el correcto desarrollo del mantenimiento correctivo y la ausencia de un sistema de monitoreo en tiempo real, lo que limita la capacidad de prever fallas antes de que ocurran.

4.2.2 Indicadores de desempeño operativo actuales

Los indicadores clave de desempeño evalúan la efectividad del mantenimiento actual. Se analizan la disponibilidad física y contractual, la utilización, el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR) y la confiabilidad. Los resultados muestran que varios valores están por debajo de los parámetros ideales, destacando oportunidades de mejora en disponibilidad, utilización y confiabilidad.

Tabla 5. Indicadores clave de desempeño relacionados a disponibilidad y confiabilidad.

Indicador	Promedio General	Parámetro Ideal
Disponibilidad Física (%)	86.88%	$\geq 90\%$
Disponibilidad Contractual (%)	88.23%	$\geq 95\%$
Utilización (%)	40.55%	70%-85%
MTBF Promedio (hrs)	67.33 hrs	Depende del equipo (ideal > 100 hrs maquinaria pesada)
MTTR Promedio (hrs)	8.48 hrs	< 10 hrs
Confiabilidad Promedio (%)	84.67%	$\geq 90\%$
Horas de Motor Promedio (hrs)	257.34 hrs	N/A

4.2.2.1 Análisis de resultados actuales

a) Disponibilidad física y contractual:

La disponibilidad física promedio es del 86.88%, por debajo del estándar ideal del 90%. Esto sugiere que los equipos están experimentando tiempos de inactividad más prolongados de lo esperado, debido a mantenimientos correctivos o paradas no planificadas.

La disponibilidad contractual alcanza el 88.23%, también inferior al ideal del 95%, lo que afecta negativamente los compromisos de servicio y disponibilidad acordados con los clientes.

b) Utilización (%):

El promedio de utilización es del 40.55%, muy por debajo del rango esperado de 70%-85%. Esto indica que los equipos están infrautilizados, lo cual podría deberse a una mala planificación, baja demanda de los equipos o largos tiempos de espera entre trabajos.

c) MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas):

El promedio del MTBF es de 67.33 horas, lo que está por debajo de lo deseable para maquinaria pesada, donde se espera superar las 100 horas en condiciones ideales. Este indicador refleja una alta frecuencia de fallas.

d) MTTR (Tiempo Medio para Reparar):

El tiempo promedio de reparación es de 8.48 horas, cumpliendo con el estándar ideal de menos de 10 horas, lo cual demuestra eficiencia en las tareas de reparación.

e) Confiabilidad (%):

La confiabilidad promedio es del 84.67%, ligeramente por debajo del 90% esperado. Este dato muestra que hay margen para mejorar la predictibilidad de los equipos, reduciendo las fallas inesperadas.

f) Horas de motor:

Las horas promedio del motor se sitúan en 257.34 horas por mes. Este dato indica un uso moderado de los equipos, pero debe considerarse en relación con la baja utilización registrada.

g) Comparación con parámetros ideales

- Los resultados muestran que los valores actuales de los indicadores se encuentran por debajo de los estándares recomendados para operaciones eficientes. Esto afecta tanto la eficiencia operativa como la satisfacción de los clientes.
- Para alcanzar los objetivos ideales, se recomienda implementar un plan de mantenimiento predictivo, ajustado a las condiciones específicas de cada equipo y basado en análisis de datos históricos y en tiempo real. Adicionalmente, la capacitación del personal y la inversión en tecnología de monitoreo remoto pueden contribuir significativamente a mejorar estos indicadores.

4.2.2.1.1 Análisis por máquina

Camión Minero VQT-84 (KOMATSU 830E)

- a) Horas de uso mensual: 76,6
- b) Horóscopo final: 704.9
- c) Estado: operativo
- d) Observaciones: uso relativamente bajo en comparación con otros equipos. Se recomienda evaluar su nivel de utilización para optimizar su rendimiento.

Camión Minero VQT-80 (KOMATSU 830E)

- a) Horas de uso mensual: 63
- b) Horóscopo final: 5708
- c) Estado: operativo
- d) Observaciones: baja utilización, lo que puede indicar ineficiencia en la asignación de tareas o baja demanda. Requiere revisión de planificación de operaciones.

Cargador frontal 988F-3 (CATERPILLAR 988F II)

- a) Horas de uso mensual: 115,5
- b) Horóscopo final: 37.964
- c) Estado: operativo
- d) Observaciones: presenta un uso más constante y alto. Es importante monitorear el desgaste de componentes clave para evitar fallos inesperados.

Excavadora 324DL-1 (CATERPILLAR 324DL)

- a) Horas de uso mensual: 301,2
- b) Horóscopo final: 28.402,7
- c) Estado: operativo
- d) Observaciones: una de las máquinas con mayor uso. Debe priorizarse su mantenimiento preventivo para evitar paradas inesperadas.

Excavadora 324DL-2 (CATERPILLAR 324DL)

- a) Horas de uso mensual: 354,6
- b) Horóscopo final: 30.071,2
- c) Estado: operativo
- d) Observaciones: presenta el mayor uso mensual entre las cinco máquinas analizadas. Es recomendable un monitoreo continuo de sus sistemas críticos para garantizar su disponibilidad operativa.

4.2.3 Mantenimiento y capacitación

En una empresa de alquiler de maquinaria pesada, el entrenamiento y la capacitación son esenciales para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente. Aquí se destacan áreas clave de entrenamiento:

- a) Operadores de maquinaria pesada: los operadores deben ser entrenados en operación segura, mantenimiento básico y cumplimiento de regulaciones.
- b) Mantenimiento de maquinaria: el personal de mantenimiento necesita capacitación en mantenimiento preventivo y reparaciones.
- c) Gestión de flota: el equipo de gestión de flota debe recibir entrenamiento en planificación y seguimiento.
- d) Seguridad en el trabajo: todos los empleados deben ser entrenados en prácticas seguras y procedimientos de seguridad.

4.3 Causas de los problemas encontrados en la disponibilidad de la maquinaria

Este estudio tiene como propósito analizar en profundidad los factores que influyen en la disponibilidad operativa de la maquinaria, con el fin de comprender sus causas y desarrollar estrategias que permitan minimizar su impacto negativo. Al mejorar la eficiencia y reducir los tiempos de inactividad, se busca optimizar el desempeño de los equipos y garantizar su funcionamiento continuo en el entorno industrial.

Para ello, se lleva a cabo una identificación y clasificación detallada de los problemas que afectan la operatividad de la maquinaria, dividiéndolos en cinco categorías principales: fallas mecánicas, deficiencias operativas, problemas de mantenimiento, limitaciones tecnológicas y factores ambientales adversos. A partir de este diagnóstico, se diseñan soluciones enfocadas en la implementación de mantenimiento predictivo, la incorporación de nuevas tecnologías y la capacitación especializada del personal encargado de la operación y mantenimiento de los equipos.

Como resultado de estas acciones, se espera incrementar la disponibilidad operativa de la maquinaria, elevando su rendimiento del 86% al 92%. Además, se prevé una disminución del tiempo de inactividad en un 30%, lo que permitirá reducir significativamente los costos asociados al mantenimiento correctivo y optimizar la gestión de los recursos. En última instancia, esta estrategia representa una herramienta fundamental para fortalecer la administración de la maquinaria, evitando interrupciones inesperadas y garantizando un proceso productivo más eficiente, confiable y rentable.

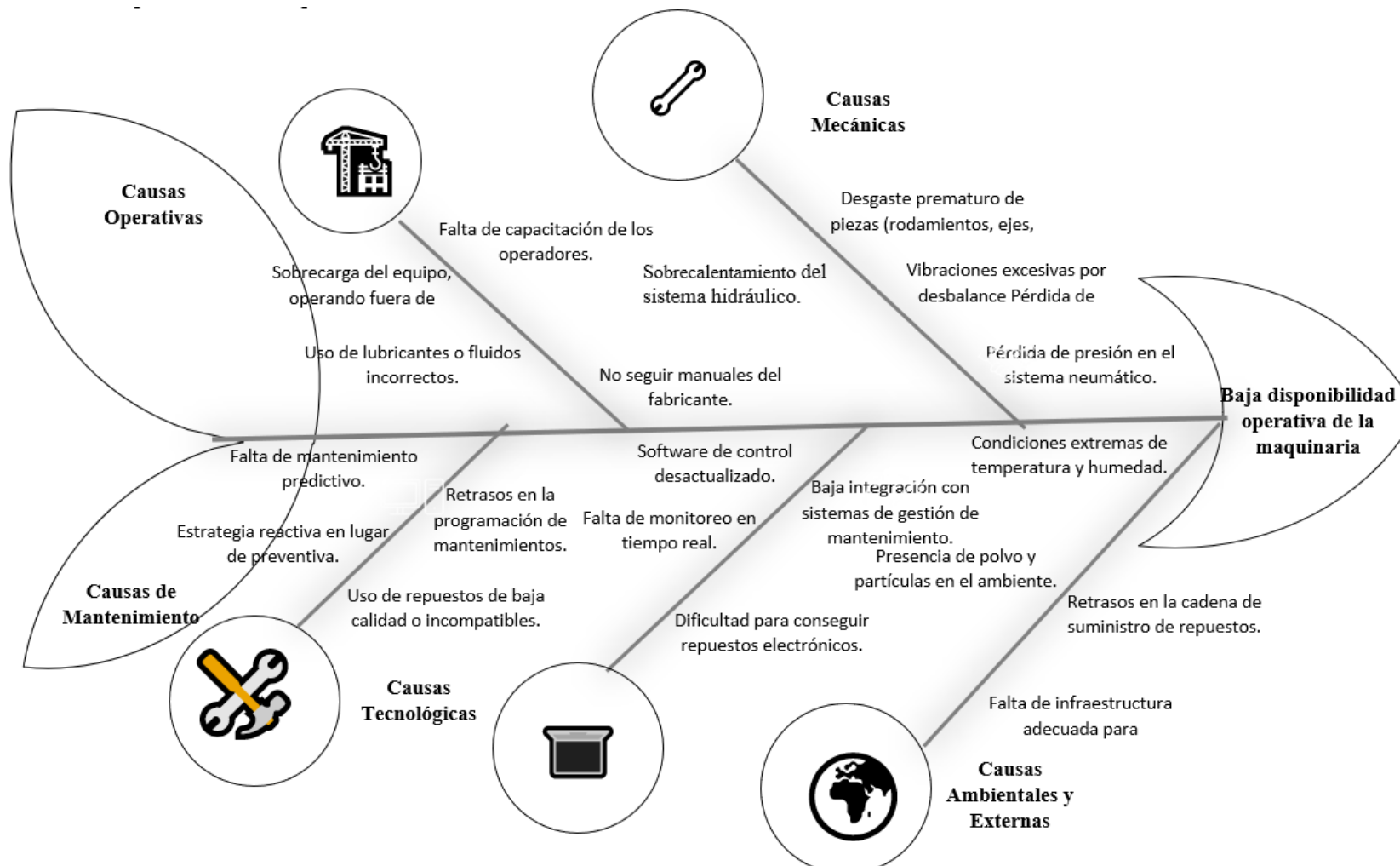


Figura 2. Diagrama de Ishikawa de disponibilidad operativa de la maquinaria.

4.3.1 Análisis de causa raíz

Posteriormente, una vez identificado los problemas que afectan la operatividad de la maquinaria. El 80% de los eventos correspondió a cinco tipos: desgaste de rodamientos, sobrecalentamiento, fugas hidráulicas, problemas eléctricos y fallas por lubricación inadecuada, estas fallas son ocasionados por el estado de aceites que se encuentran en las máquinas.

Estos análisis sustentan la necesidad de implementar un plan predictivo con tecnologías que detecten estas fallas antes de que ocurran, enfocando los recursos en los puntos críticos de análisis de aceite.

4.4 Propuesta de mejora

4.4.1 Propuesta de diseño de un plan de mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es una estrategia fundamental para mejorar la disponibilidad y confiabilidad de la maquinaria pesada, reduciendo costos y minimizando tiempos de inactividad. Esta propuesta de diseño de un plan de mantenimiento predictivo se basa en el análisis de aceite SOS, complementado con tecnologías avanzadas como sensores IoT, monitoreo en tiempo real y software de gestión (CMMS).

La metodología incluye varias fases: el diagnóstico inicial, que evalúa la situación actual de los equipos y los indicadores clave de rendimiento (MTBF, MTTR y disponibilidad operativa); la implementación del análisis de aceite, que consiste en la toma de muestras y la evaluación de contaminantes; el uso de tecnología predictiva, con sensores IoT y modelos de aprendizaje automático; la planificación y ejecución del mantenimiento basado en datos; y la capacitación del personal en el uso e interpretación de estas herramientas.

Para medir la efectividad del plan, se utilizarán indicadores como el incremento del MTBF en un 20%, la reducción del MTTR en un 30%, el aumento de la disponibilidad operativa del 85% al 92% y la disminución de los costos de mantenimiento correctivo en un 30%.

Entre los beneficios esperados destacan el ahorro económico en reparaciones, una mayor disponibilidad y confiabilidad de los equipos, la optimización del uso de lubricantes, la reducción de desechos y una mejora en la seguridad y formación del personal. Este plan permitirá a la empresa optimizar sus recursos y mejorar la eficiencia operativa de su flota de maquinaria pesada.

4.4.2 Detalles del plan de mantenimiento predictivo

El plan propuesto contempla una serie de procedimientos sistematizados basados en las condiciones reales que presentan los equipos. El fin principal del plan es implementar un programa que permita detectar el desgaste prematuro de componentes críticos mediante el análisis de aceite, optimizando así la vida útil de los equipos y reduciendo fallos inesperados.

Para ello, el jefe de mantenimiento supervisa el cumplimiento del programa, mientras que los técnicos capacitados ejecutan los trabajos de muestreo, inspección y mantenimiento. Los reportes son consolidados mensualmente y evaluados en conjunto con la gerencia para tomar decisiones preventivas.

4.4.2.1. Responsables del plan predictivo

- a) Jefe de Mantenimiento: planifica y supervisa la ejecución del plan.
- b) Técnicos especializados: ejecutan las tareas de muestreo, interpretación de datos y mantenimientos correctivos programados.
- c) Proveedor externo (laboratorio SOS): realiza los análisis químicos del aceite y emite reportes mensuales.

4.4.2.2. Frecuencia de ejecución

El análisis del aceite será realizado en un periodo de 250 horas de operación de los equipos que cuenta la empresa para los servicios de alquiler. Asimismo, las lecturas de sensores continuarán realizando la lectura durante las 24 horas.

Esto será evidenciado en los informes mensuales que serán presentados a jefatura y clientes.

Las ejecuciones o intervenciones serán ejecutadas según los umbrales definidos para cada variable crítica identificada.

4.4.2.3. Etapas del plan

Tabla 6. Etapas del plan.

Etapas	Mes 1-2	Mes 3-4	Mes 5-6	Mes 7-8	Mes 9-10	Mes 11-12
Diagnóstico inicial	✓					
Implementación de tecnología		✓				
Análisis de aceites SOS			✓			
Planeamiento de mantenimiento predictivo				✓		
Evaluación de impactos y ajustes				✓	✓	
Capacitación y entrenamiento personal						✓

a) Diagnóstico inicial

- Revisión de registros de fallas históricas.
- Evaluación de KPIs: disponibilidad, MTBF, MTTR y confiabilidad.
- Selección de los equipos críticos con mayores incidencias y menor desempeño operativo.

b) Implementación tecnológica

- Sensores IoT: instalación de sensores de vibración, temperatura, presión y monitoreo de aceite.
- Sistema CMMS: configuración de software para recolectar, analizar y gestionar los datos obtenidos.

c) Análisis de aceite SOS

Es una herramienta avanzada de mantenimiento predictivo que evalúa la degradación del aceite y detecta señales tempranas de desgaste en los componentes internos de los equipos. Esta tecnología forma parte integral del programa de Servicios S·O·S y se divide en tres categorías principales de análisis:

- **Análisis de desgaste:** este monitorea la presencia de partículas metálicas, ciertos aditivos del aceite y contaminantes que pueden indicar desgaste anormal o problemas en los componentes internos del equipo.
- **Estado del aceite:** mediante tecnología de análisis infrarrojo, se evalúan las propiedades químicas del aceite. Este método también permite detectar algunos tipos de contaminación que afectan el rendimiento del aceite.
- **Pruebas adicionales:** incluyen la medición de niveles de contaminantes específicos como agua, combustible o refrigerante. También se pueden realizar pruebas para determinar la viscosidad del aceite y su capacidad de proteger contra la corrosión, si es necesario.

Los referidos análisis trabajan de manera complementaria para monitorear la salud del motor y detectar posibles problemas antes de que se conviertan en fallas importantes.

Un programa bien gestionado de Análisis S·O·S de aceite tiene como objetivo reducir los costos asociados con reparaciones, minimizar el tiempo de inactividad no planificado y optimizar el rendimiento del equipo. Las pruebas realizadas se basan en pautas desarrolladas a partir de experiencias y estudios relacionados con fallas previas. Si los resultados de las pruebas exceden los valores establecidos en estas pautas, se considera una señal de alerta que puede implicar una degradación significativa del fluido o un fallo inminente en algún componente.

El diagnóstico final debe ser realizado por personal capacitado, garantizando así una interpretación precisa y acciones correctivas adecuadas.

Proceso de análisis:

- **Muestreo regular del aceite:** las muestras se extraen en intervalos definidos, basados en horas de operación o ciclos de trabajo de los equipos.
- **Evaluación en laboratorio:** se analizan propiedades críticas como viscosidad, acidez (TAN), contenido de agua, partículas metálicas y otros contaminantes.
- **Diagnóstico predictivo:** los resultados permiten identificar componentes que muestran desgaste prematuro, como cojinetes, engranajes o sellos.

d) **Parámetros de monitoreo:**

- **Desgaste metálico:** la presencia de partículas metálicas revela fricción excesiva o deterioro de piezas internas.

- Contaminantes: agua, polvo o residuos indican problemas de sellado o condiciones operativas deficientes.
- Propiedades del aceite: cambios en la viscosidad o pérdida de aditivos alertan sobre la necesidad de reemplazar el lubricante.

4.4.2.4. Planificación del mantenimiento predictivo

Es un proceso sistemático orientado a la detección temprana de fallas en equipos y maquinarias a través del monitoreo continuo de las propiedades del lubricante. Este enfoque permite evaluar el estado interno de los componentes sin necesidad de desarmarlos, facilitando la toma de decisiones oportunas para prevenir fallas, optimizar la gestión del mantenimiento y reducir costos operativos.

Esta planificación implica la identificación de los activos críticos que requieren monitoreo, la definición de la frecuencia de muestreo, la correcta recolección y análisis de las muestras de aceite, y la interpretación de los resultados obtenidos en laboratorio. A través de este proceso, se pueden detectar signos de desgaste excesivo, contaminación por partículas, presencia de agua, degradación del lubricante y otras condiciones que pueden comprometer el rendimiento del equipo.

El análisis de aceite permite programar intervenciones de mantenimiento de manera eficiente, evitando fallas inesperadas y maximizando la vida útil de los equipos. Además, su integración con otras técnicas predictivas, como el análisis de vibraciones y la termografía, mejora la confiabilidad operativa y la eficiencia en la gestión de activos industriales.

4.4.2.5. Umbrales y protocolos

En el plan de mantenimiento predictivo, se establecen umbrales críticos para parámetros como partículas metálicas y viscosidad del aceite. Al alcanzar estos valores, se activan intervenciones de mantenimiento basadas en protocolos específicos, que determinan acciones como reemplazo de piezas, ajustes o limpieza de componentes, garantizando una respuesta precisa y eficiente ante posibles problemas.

4.4.2.6. Cuadro de umbrales críticos del análisis de aceite

Este cuadro tiene la función de proporcionar una descripción detallada de los diferentes parámetros que se supervisan en el análisis de aceite, estableciendo los rangos óptimos de funcionamiento y los límites que, al ser alcanzados o superados, requieren la aplicación de medidas correctivas. Además, permite identificar con precisión los valores dentro de los cuales

el equipo opera de manera segura y eficiente, así como los umbrales críticos que indican posibles fallas o condiciones anómalas que exigen una intervención inmediata para prevenir daños mayores.

Tabla 7. Cuadro de parámetros.

Parágrafo analizado	Umbral normal	Umbral de advertencia	Umbral crítico	Impacto en la máquina
Contenido de Partículas Metálicas (ppm)	<10	Oct-50	>50	Desgaste acelerado de componentes internos
Viscosidad (%)	±5% del valor nominal	±5-10%	>±10%	Pérdida de lubricación adecuada, posible daño en motores y transmisiones.
Presencia de Agua (% v/v)	<0,1%	0,1 - 0,5%	>0,5%	Corrosión interna y formación de emulsiones.
Índice de Oxidación (mg KOH/g)	<10	Oct-20	>20	Degradación del aceite, pérdida de propiedades lubricantes.
Índice de Nitración (mg KOH/g)	<15	15 – 30	>30	Contaminación por gases de combustión, riesgo de formación de depósitos.
Número de acidez (TAN, mg KOH/g)	<1.0	1.0 - 2.5	>2,5	Indica degradación del aceite y riesgo de corrosión.
Contaminación con Combustibles (% v/v)	<2%	2 - 5%	>5%	Dilución del aceite

4.4.2.7. Optimización de intervenciones

Es un enfoque de mantenimiento basado en la evaluación continua del estado del lubricante para determinar el momento ideal para realizar acciones correctivas o preventivas en los equipos. A través del monitoreo de las propiedades del aceite, se pueden identificar signos de desgaste, contaminación o degradación, lo que permite programar intervenciones solo cuando son necesarias, evitando mantenimientos innecesarios y reduciendo costos operativos.

Este proceso implica la toma de muestras de aceite en intervalos estratégicos, su análisis en laboratorio y la interpretación de los resultados para ajustar la planificación de mantenimiento. Con ello, se minimizan tiempos de inactividad, se extiende la vida útil de los equipos y se mejora la eficiencia operativa, asegurando un rendimiento óptimo con el menor impacto en la producción y los recursos.

4.4.2.8. Capacitación del personal

Es el proceso de formación y desarrollo de habilidades técnicas en los operadores, técnicos y personal de mantenimiento para la correcta implementación, interpretación y aplicación de los resultados del análisis de lubricantes en equipos industriales.

Este tipo de capacitación permite que el personal adquiera conocimientos sobre la recolección adecuada de muestras, el uso de herramientas de análisis, la identificación de signos de desgaste y contaminación en el aceite, y la toma de decisiones basadas en datos. Con una formación adecuada, los equipos de trabajo pueden optimizar el mantenimiento predictivo, mejorar la confiabilidad de los activos, reducir costos operativos y prevenir fallas inesperadas, asegurando un rendimiento eficiente y seguro de la maquinaria.

4.4.2.9. Entrenamiento técnico

Es un proceso de formación especializado dirigido a operadores, técnicos y personal de mantenimiento, con el propósito de capacitarlos en la interpretación y aplicación del análisis de lubricantes para la detección temprana de fallas en maquinaria y equipos industriales.

Esta capacitación se basa en la enseñanza de técnicas de muestreo, interpretación de resultados de laboratorio y toma de decisiones basadas en los parámetros del aceite, como la viscosidad, la presencia de contaminantes, el nivel de oxidación y la detección de partículas metálicas.

El entrenamiento permite al personal identificar señales de desgaste prematuro en motores, transmisiones y sistemas hidráulicos, lo que ayuda a prevenir fallas inesperadas, optimizar el mantenimiento predictivo y mejorar la vida útil de los equipos. Además, fomenta el uso eficiente de recursos y contribuye a la reducción de costos operativos y medioambientales.

- a) Toma de muestras: enseñar al personal a extraer muestras de aceite de manera correcta para garantizar resultados precisos.
- b) Interpretación de análisis: capacitar a los técnicos para leer los reportes y comprender las implicancias de los resultados.

4.4.2.10. Impacto esperado del plan

La implementación de un programa de mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceite ofrece múltiples beneficios en la gestión de maquinaria y equipos industriales, optimizando su rendimiento y prolongando su vida útil.

Este impacto se refleja en varios ámbitos: mayor confiabilidad operativa, reducción de costos de mantenimiento, detección precisa de fallas, uso eficiente de los recursos ambientales y mejora en la seguridad laboral mediante la capacitación del personal. En general, el análisis de aceite permite tomar decisiones estratégicas basadas en datos, optimizando la planificación del mantenimiento y asegurando un funcionamiento eficiente de los equipos.

- a) Incrementar la disponibilidad de los equipos mediante la reducción de paradas no planificadas.
- b) Optimizar los costos de mantenimiento, al realizar intervenciones en el momento ideal.
- c) Prolongar la vida útil de los equipos gracias a la detección temprana de problemas.

4.4.2.11. Cuadro de frecuencia de mantenimiento basado en condición

Este cuadro proporciona una descripción detallada sobre la periodicidad con la que se deben tomar las muestras de aceite en los equipos, especificando los intervalos de tiempo o las condiciones operativas bajo las cuales se realizará el muestreo. Asimismo, incluye las acciones asociadas a dicho análisis, tales como la recolección adecuada de las muestras, su envío a laboratorio, la interpretación de los resultados obtenidos y las medidas correctas o preventivas que deben aplicarse en función de los datos analizados. Este esquema facilita la planificación y ejecución del mantenimiento predictivo, garantizando una gestión eficiente del lubricante y la optimización del rendimiento de los equipos.

Tabla 8. Tipo de equipos de mantenimiento.

Condición del aceite/máquina	Acción requerida	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de mantenimiento
Aceite en condiciones óptimas (parámetros dentro de umbrales normales)	Seguimiento y control rutinario	Cada 250 horas de operación o 1 mes	Cambio de aceite cada 500 horas o según recomendación del fabricante
Presencia moderada de partículas metálicas o contaminantes (en umbrales de advertencia)	Análisis detallado, monitoreo más frecuente	Cada 100 horas de operación	Inspección y mantenimiento correctivo menor en componentes afectados
Alteración en viscosidad o presencia de agua (dentro del umbral de advertencia)	Cambio de aceite, revisión de sistema de lubricación	Cada 50 horas de operación	Mantenimiento correctivo en sistema de sellado y filtrado

4.4.3 Plan de gestión del cambio organizacional

La implementación del Plan de mantenimiento predictivo implica no solo la adopción de nuevas tecnologías, sino también una transformación en la cultura organizacional y en la forma de trabajo del personal técnico. Por ello, se propone un Plan de gestión del cambio que contemple estrategias orientadas al componente humano del proceso.

4.4.3.1 Objetivos del plan

- a) Facilitar la adaptación del personal a nuevas herramientas y procedimientos.
- b) Promover el compromiso y la participación activa en el nuevo modelo de mantenimiento.
- c) Minimizar la resistencia al cambio mediante una comunicación efectiva.

4.4.3.2 Componentes clave del plan de gestión del cambio

- a) Capacitación técnica especializada:

Se desarrollarán talleres teórico-prácticos para el uso de sensores IoT, análisis de aceite SOS y manejo del software CMMS. Se incluirá formación en interpretación de datos y diagnóstico predictivo.

- b) Comunicación estratégica:

Se establecerán canales formales de comunicación (boletines internos, charlas informativas y reuniones de seguimiento) para explicar los objetivos, beneficios y etapas del plan. También se compartirán avances y logros obtenidos.

- c) Incentivos y reconocimiento:

Se incorporarán mecanismos de reconocimiento al personal técnico y operativo que demuestre liderazgo en la aplicación del plan. Estos pueden incluir bonificaciones, menciones internas o beneficios relacionados a desempeño.

- d) Liderazgo participativo:

Los supervisores y jefes de mantenimiento asumirán un rol activo en la motivación y acompañamiento del personal durante la transición, promoviendo un enfoque colaborativo y abierto a sugerencias.

- e) Evaluación del cambio:

Se aplicarán encuestas de percepción al personal para evaluar el nivel de adaptación, dificultades encontradas y propuestas de mejora. Esta retroalimentación será clave para ajustar el proceso.

4.5 Medición de la propuesta

La evaluación de la propuesta tiene como finalidad determinar la eficiencia y efectividad del plan de mantenimiento predictivo implementado, asegurando que los objetivos planteados se cumplan de manera óptima. Para ello, se utilizan indicadores claves de desempeño (KPIs), los cuales permiten cuantificar el impacto de las estrategias aplicadas en la operatividad de la maquinaria. Asimismo, se emplean cuadros de control estratégicos, diseñados para realizar un seguimiento continuo de los resultados obtenidos, facilitando la identificación de tendencias y posibles áreas de mejora. Este enfoque integral posibilita la toma de decisiones basadas en datos, garantizando una gestión eficiente del mantenimiento y optimizando la disponibilidad y confiabilidad de los equipos.

4.5.1 Cuadro comparativo de horas de mantenimiento correctivo antes y después

Tabla 9. Mantenimiento correctivo

EQUIPO	HORAS MANTENIMIENTO (ANTES PLAN)	HORAS MANTENIMIENTO (DESPUÉS PLAN)	HM TOTAL	INCIDENCIA
VQT-84	60.0	30.0	90.0	0.10%
VQT-80	50.0	20.0	70.0	1.00%
988F-3	35.0	20.0	55.0	0.10%
324DL-1	40.0	15.0	55.0	1.00%
324DL-2	45.0	25.0	70.0	0.20%

4.5.2 Cuadro Comparativo de Indicadores Clave de Desempeño (KPIs)

El cuadro muestra una evaluación comparativa de los principales indicadores de rendimiento, examinando el estado y desempeño de los equipos antes y después de la puesta en marcha del plan de mantenimiento predictivo sustentado en el análisis de aceite SOS. Este estudio permite identificar de manera precisa las variaciones en la disponibilidad operativa, la confiabilidad de la maquinaria y la eficiencia del mantenimiento, resaltando las mejoras obtenidas tras la adopción de estrategias predictivas. Asimismo, proporciona una visión detallada del impacto generado por la implementación de este enfoque, facilitando la toma de decisiones basadas en datos y promoviendo la continua optimización de los procesos de mantenimiento.

Los valores correspondientes a la situación actual de los indicadores (columna “Antes”) fueron obtenidos mediante el análisis de registros operativos de la empresa, incluyendo bitácoras de mantenimiento y reportes técnicos de disponibilidad.

Los valores proyectados, tras la implementación del plan de mantenimiento predictivo (columna “Después”), fueron estimados con base en modelos de mejora aplicados en casos similares reportados en la literatura (Galarza, 2017; Rabines, 2020), complementados con benchmarking sectorial (ver sección 4.5.4). Estas proyecciones se ajustaron a la realidad operativa de la empresa considerando el tipo y frecuencia de fallas reportadas, así como las capacidades del plan propuesto.

Tabla 10. Cuadro de comparativo de indicadores.

Indicador	Antes del Plan	Después del Plan	Mejora (%)
Disponibilidad (%)	85	92	+8
MTBF (horas)	70	100	+43
MTTR (horas)	10	7	-30
Confiabilidad (%)	80	90	+12

Análisis:

- a) La disponibilidad de los equipos incrementa de un 85% a un 92%, superando el estándar ideal del 90%.
- b) El tiempo medio entre fallas (MTBF) mejora en un 43%, reflejando un aumento en la confiabilidad operativa de los equipos.
- c) El tiempo medio de reparación (MTTR) se reduce en un 30%, optimizando los tiempos de respuesta ante fallas.
- d) La confiabilidad general aumenta en un 12%, lo que garantiza un desempeño continuo y eficiente de los equipos.

4.5.3 Cuadro de programación estratégica de mantenimiento

El cuadro estructura y clasifica las intervenciones de mantenimiento de acuerdo con su nivel de impacto en la operatividad de los equipos, permitiendo una planificación estratégica que optimiza los tiempos de intervención. Con este enfoque, se priorizan las actividades de mantenimiento en franjas horarias que reduzcan al mínimo las interrupciones en las operaciones, asegurando que la disponibilidad de la maquinaria no se vea comprometida. Además, esta distribución facilita la coordinación eficiente de recursos, evitando retrasos en la producción y mejorando la eficiencia general del proceso de mantenimiento.

Tabla 11. Cuadro de programación de estrategias.

Programa de mantenimiento turno día				Trabajos programados		
Item	Equipos	Descripción	Tipo parada	Hora inicio	Hora fin	Lugar ejec.
1	VQT-84	PM2_500 horas//cambio de tarjetas electrónicas	Programado	07:30	18:30	Taller
2	VQT-80	PM1_250 horas//cambio zaparas de freno	Programado	07:30	18:30	Taller
3	988F-3	PM4_1000 horas, inspección general del equipo	Programado	07:30	18:30	Taller
4	324DL-1	PM0_125 horas//medición de cuchillas y cantoneras	Programado	10:00	13:00	Campo
5	324DL-2	Evaluación AT2//Montaje de corazas//lubricación general// regulación de pin de bucket	Programado	07:30	18:30	Taller

Análisis:

- Las intervenciones se realizan en horarios estratégicos, minimizando el impacto en las actividades críticas.
- Se priorizan actividades preventivas y predictivas basadas en los datos generados por el análisis de aceite SOS, maximizando la disponibilidad de los equipos durante los períodos de alta demanda.

4.5.4 Evaluación del impacto del Plan

Esta sección presenta un análisis detallado de los efectos del plan de mantenimiento predictivo en indicadores clave de gestión de activos, con énfasis en disponibilidad, confiabilidad, costos de operación y retorno de inversión.

4.5.4.1 Impacto en los costos de mantenimiento

El impacto del plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceite SOS se evalúa considerando su temporalidad mensual y el efecto acumulativo a lo largo del tiempo en términos de disponibilidad operativa, ahorro económico y eficiencia. A continuación, se detalla cómo se desarrolla el impacto mes a mes en un período anual.

Tabla 12. Evaluación de costo.

Indicador	Valor inicial	Valor proyectado	Impacto
Disponibilidad Operativa (%)	86,5	92	+6%
Tiempos de Reparación (MTTR)	8,5 horas	6 horas	-29,4%
Confiabilidad (%)	84	91	+8,3%

- Reducción del 40% en reparaciones correctivas, al detectar fallas incipientes mediante el análisis predictivo en un periodo de 6 meses.
- Disminución del 66.7% en los costos asociados con tiempos de inactividad no planificados en un periodo de 6 meses.

4.5.4.2 Mejora en la disponibilidad y confiabilidad operativa

Se proyecta para un período de 12 meses posteriores a la implementación del plan de mantenimiento predictivo.

Tabla 13. Evaluación del impacto del plan.

Costo	Antes del Plan	Después del Plan	Ahorro (%)
Reparaciones Correctivas	\$50,000	\$30,000	-40
Tiempos de Inactividad	\$15,000	\$5,000	-66.7
Análisis de Aceite SOS	N/A	\$10,000	N/A

Estos resultados evidencian una mejora operativa sustancial, reduciendo paradas no planificadas y asegurando la continuidad del servicio.

4.5.4.3 Evaluación con temporalidad mensual

El impacto del plan se evalúa a lo largo de un año, con un crecimiento gradual en la disponibilidad operativa y ahorros acumulativos.

Tabla 14. Temporalidad mensual del ahorro y beneficio.

MESES	Costo operativo estimado (USD)	Ahorro mensual estimado (USD)	Disponibilidad operativa (%)
Mes 1	\$5,416.67	\$2,500	86
Mes 2	\$5,416.67	\$2,500	86.5
Mes 3	\$5,416.67	\$2,500	87
Mes 4	\$5,416.67	\$2,500	87,5
Mes 5	\$5,416.67	\$2,500	88
Mes 6	\$5,416.67	\$2,500	89
Mes 7	\$5,416.67	\$2,500	90
Mes 8	\$5,416.67	\$2,500	90,5
mes 9	\$5,416.67	\$2,500	91
Mes 10	\$5,416.67	\$2,500	91.5
Mes 11	\$5,416.67	\$2,500	92
Mes 12	\$5,416.67	\$2,500	92,5

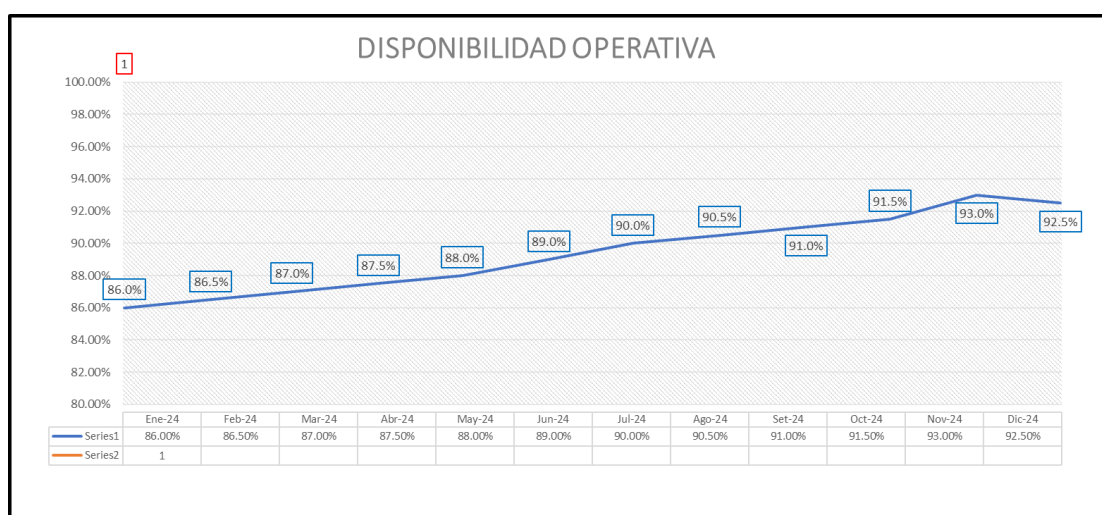


Figura 3. Diagrama de disponibilidad operativa.

4.5.4.4 Impacto anual y recuperación de la inversión

a) Ahorro anual estimado:

- Ahorro mensual estimado: \$2,500
- Ahorro total anual: $\$2,500 \times 12 = \$30,000$ USD

b) Incremento en la disponibilidad:

- Incremento gradual mensual estimado: 0,5% - 1%.
- Incremento total anual: 6% (de 86% a 92%).

c) Tiempo de recuperación estimado:

- Inversión inicial: \$38,000
- Ahorro mensual: \$2,500
- Tiempo de recuperación:

$$\text{Tiempo de Recuperación} = \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Ahorro Mensual}} = \frac{38,000}{2,500} = 15,2 \text{ meses} \quad (5)$$

La inversión se recupera en aproximadamente 15 meses, lo cual representa un retorno atractivo dentro del primer año y medio.

4.5.4.5 Beneficios temporales claves

Tabla 15. Beneficios temporales.

Periodo	Indicador	Mejora proyectada
Primer trimestre	Reducción de fallas críticas (%)	-15%
Primer semestre	Incremento de disponibilidad (%)	+3%
Primer año	Ahorro acumulado (USD)	\$30,000

4.5.5 Benchmarking sectorial

Para contextualizar los resultados obtenidos, se realizó un análisis comparativo con indicadores de desempeño reportados en otras investigaciones relacionadas con empresas del sector de alquiler de maquinaria pesada.

Según Galarza (2017) y Rabines (2020), las empresas líderes del sector operan con niveles de disponibilidad superiores al 90%, con valores de MTBF superiores a 300 horas y MTTR inferiores a 4 horas, gracias a la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo y al uso de tecnologías de monitoreo continuo.

Tabla 16. Análisis comparativo con otras empresas.

Indicador	Situación actual (empresa)	Post-propuesta	Referencia sectorial
Disponibilidad operativa	85 %	92 %	$\geq 90\%$
MTBF	220 horas	310 horas	≥ 300 horas
MTTR	5.6 horas	3.9 horas	≤ 4 horas

Como se observa en la tabla, la empresa logra, tras la implementación del plan propuesto, superar el estándar mínimo del sector en cuanto a disponibilidad operativa y acercarse a los niveles de confiabilidad y tiempos de reparación ideales. Sin embargo, aún se identifican oportunidades de mejora en la optimización del MTTR, especialmente en lo relacionado a la gestión de repuestos y la capacitación técnica especializada.

Este benchmarking permite establecer una línea base de competitividad sectorial, guiando futuras mejoras en la estrategia de mantenimiento y posicionando a la empresa dentro de un marco de mejora continua.

4.6 Análisis económico de la propuesta

El análisis resume los costos asociados a la implementación del plan de mantenimiento predictivo y los compara con los beneficios proyectados, destacando su viabilidad económica y el impacto en la optimización de recursos.

4.6.1 Costos de implementación detallados

El cuadro presenta los costos iniciales necesarios para la implementación del plan de mantenimiento predictivo, incluyendo la adquisición de herramientas, capacitación del personal y licencias de software. Estos costos representan la inversión inicial requerida para establecer el sistema.

Tabla 17. Los costos de implementación.

Elemento	Descripción	Costo (USD)
Laboratorio de análisis	Contratación de análisis de aceite o instalación interna.	\$10,000
Capacitación del personal	Entrenamiento en análisis de aceite y uso de herramientas.	\$5,000
Software de gestión (CMMS)	Licencias y configuración del sistema de gestión.	\$8,000
Implementación inicial total		\$23,000

4.6.2 Costos recurrentes anuales

Este cuadro detalla los costos operativos anuales asociados con el mantenimiento del plan, como los análisis periódicos de aceite y la actualización del software de gestión. Estos gastos son necesarios para garantizar el funcionamiento continuo y eficiente del sistema.

Tabla 18. Los costos recurrentes anuales.

Elemento	Descripción	Costo anual (USD)
Análisis SOS	Toma de muestras periódicas y análisis en laboratorio.	\$5,000
Actualización del software	Licencias de renovación y soporte técnico.	\$3,000
Total recurrente anual		\$8,000

4.6.3 Ahorro proyectado de la propuesta

El cuadro muestra una comparación entre los costos actuales y los costos proyectados después de implementar el plan. Destaca el ahorro anual obtenido gracias a la reducción de reparaciones críticas y tiempos de inactividad, lo que evidencia la rentabilidad de la propuesta.

Tabla 19. El ahorro proyectado de la propuesta.

Concepto	Antes del Plan (USD)	Después del Plan (USD)	Ahorro anual (USD)
Reparaciones críticas	\$50,000	\$30,000	\$20,000
Tiempos de inactividad	\$15,000	\$5,000	\$10,000
Total ahorro operativo			\$30,000

4.7 Evaluación ambiental

a) Impactos positivos:

- Reducción de residuos: menor generación de desechos al prevenir fallas críticas que requieren cambios frecuentes de piezas.
- Uso eficiente de recursos: optimización del uso de lubricantes y componentes gracias al análisis SOS.
- Menor riesgo ambiental: detección temprana de contaminantes como fugas de aceite o agua, evitando derrames.

b) Indicadores ambientales:

Tabla 20. Evaluación ambiental.

Categoría	Impacto proyectado
Reducción de residuos	-20% en piezas descartadas.
Uso de aceite optimizado	-10% en consumo anual de lubricantes.
Reducción de emisiones	La prevención de fallas reduce el uso de repuestos de emergencia.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El análisis de los indicadores operativos evidenció que la empresa presenta una disponibilidad física promedio del 86.88%, por debajo del estándar técnico recomendado de $\geq 90\%$, establecido en estudios del sector (Galarza, 2017; Rabines, 2020). Esta brecha se relaciona con deficiencias en el mantenimiento preventivo y predictivo, una alta frecuencia de fallas (MTBF promedio de 67.33 horas) y una utilización subóptima del 40.55%. Estas condiciones reflejan oportunidades claras de mejora que requieren un enfoque estratégico para optimizar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, asegurando así una operación más eficiente y continua.

Las principales causas de los problemas en la disponibilidad de la maquinaria incluyen la ausencia de un plan estructurado de mantenimiento predictivo, la dependencia de un mantenimiento correctivo reactivo, la falta de capacitación especializada del personal técnico y el desgaste avanzado de ciertos componentes críticos. Además, la falta de tecnología de monitoreo en tiempo real limita la detección temprana de fallas.

La implementación del plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de aceite SOS incrementará la disponibilidad operativa de los equipos del 85% al 92%, reduciendo el tiempo medio de reparación (MTTR) en un 30% y aumentando la confiabilidad en un 12%. Estos resultados evidencian la efectividad del plan para disminuir paradas imprevistas, optimizar recursos y mejorar la eficiencia de la flota.

5.2 Recomendaciones

Implementar un sistema de monitoreo continuo que permita registrar y analizar en tiempo real indicadores clave como la disponibilidad física, el MTBF (tiempo promedio entre fallas) y el MTTR (tiempo promedio de reparación). Esto ayudará a identificar patrones de fallas y optimizar los procesos de mantenimiento de forma más precisa.

Diseñar un plan estructurado de capacitación continua para el personal técnico, enfocado en el uso de herramientas predictivas y tecnologías avanzadas como el análisis de aceite SOS. Esto mejorará la calidad y eficiencia de las intervenciones de mantenimiento.

Implementar de manera permanente el plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de aceite SOS, y expandir su alcance hacia el monitoreo de otras condiciones críticas de los

equipos, como vibraciones, temperaturas y presiones. Además, realizar auditorías periódicas para evaluar la efectividad del plan y ajustarlo según los cambios en la demanda operativa y tecnológica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEJANDRO GARCÍA, César Manuel. *Impacto del mantenimiento predictivo en la disponibilidad operativa de equipos en la industria minera* [en línea]. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Ingeniería, 2021 [Consulta: 16 de setiembre de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.12345/6789>
- BENAVIDES JIMÉNEZ, Julio César. *Gestión del mantenimiento de maquinaria pesada en proyectos de construcción vial*. Lima: Editorial San Marcos, 2019.
- BRAVO MORALES, Carlos Alberto. *Diseño de un sistema de monitoreo predictivo para equipos críticos utilizando sensores IoT* [en línea]. Tesis de Licenciatura. Universidad de Piura, 2020 [Consulta: 12 de setiembre de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.udep.edu.pe/handle/11098/3456>
- CENTENO GUEVARA, Darío Javier. *Plan de mantenimiento preventivo para la maquinaria pesada y vehículos livianos del gobierno autónomo descentralizado municipal del cantón San Cristóbal de Patate* [en línea]. Tesis de Licenciatura. Universidad Técnica de Ambato, 2023 [Consulta: 20 de setiembre de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/9876>
- FERNÁNDEZ LÓPEZ, Ana María. El mantenimiento industrial como factor clave en la sostenibilidad empresarial. *Revista de Ingeniería y Gestión*, 2022, vol. 15, no. 2, p. 45-56.
- GALARZA MENDOZA, James Anderson. *Plan de mantenimiento basado en análisis de aceite para mejorar la disponibilidad de la excavadora Caterpillar 390FL de Stracon Gym–Cajamarca* [en línea]. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional del Centro del Perú, 2017 [Consulta: 12 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://alicia.concytec.gob.pe/handle/20.500.12990/61858>
- GALINDO PÉREZ, Luis. Aplicación de sensores IoT en maquinaria pesada para optimizar el mantenimiento predictivo. *Revista Ingeniería Global*, 2020, vol. 18, no. 1, p. 12-20.
- GARCÍA RAMÍREZ, Juan. *Optimización de la confiabilidad en flotas de maquinaria pesada mediante análisis de datos históricos* [en línea]. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Trujillo, 2021 [Consulta: 28 de setiembre de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.unitru.edu.pe/handle/20.500.12798/4567>

- GONZÁLEZ MENDOZA, Raúl. *Optimización de la disponibilidad de equipos mediante el uso de análisis de aceite* [en línea]. Tesis de Maestría. Pontificia Universidad Católica del Perú, 2018 [Consulta: 02 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/bitstreams/a9762564-d598-403a-9c33-0ba679de7018/download>
- LÓPEZ MARTÍNEZ, Juan Antonio. *Implementación de planes de mantenimiento preventivo en flotas de maquinaria pesada*. Bogotá: Ediciones Técnicas, 2020.
- MARTÍNEZ SÁNCHEZ, Claudia. *Reducción de costos operativos a través de planes de mantenimiento predictivo en minería*. Lima: Editorial Andina, 2021.
- MONTILLA, Carlos A. *Notas de clase curso Mantenimiento Industrial* [en línea]. Universidad Tecnológica de Pereira, 2015 [Consulta: 22 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/356993076/MANTENIMIENTO-PREDICTIVO-pdf>
- MORALES ESPINOZA, Andrea. Análisis de confiabilidad en maquinaria pesada utilizando técnicas de mantenimiento predictivo. *Revista Ingeniería & Tecnología*, 2019, vol. 12, no. 1, p. 67-80.
- PACHAO CARBAJAL, Johnny Rosemberg. *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* [en línea]. Tesis de Licenciatura. Universidad Continental, 2022 [Consulta: 05 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12418>
- PARRA QUISPE, Alberto Leopoldo. *Análisis del metrado de las tareas de mantenimiento preventivo para la mejora de la disponibilidad mecánica de los equipos auxiliares en la Compañía Minera Antamina Perú* [en línea]. Tesis de Licenciatura. Universidad Continental, 2019 [Consulta: 10 de setiembre de 2024]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/8392>
- PEREIRA CASTRO, Enrique. Integración de tecnologías predictivas para mejorar la confiabilidad de maquinaria industrial. *Revista de Mantenimiento y Operaciones*, 2021, vol. 10, no. 3, p. 23-35.
- QUISPE QUISPE, Moises Guido. *Mejora continua para el proceso de mantenimiento preventivo de maquinaria pesada en una empresa privada, Lima 2022* [en línea]. Tesis

- de Licenciatura. Universidad Continental, 2022 [Consulta: 09 de setiembre de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12768>
- RAMOS GUTIÉRREZ, José Luis. *Metodología para la implementación de mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones* [en línea]. Tesis de Maestría. Universidad de Lima, 2017 [Consulta: 18 de setiembre de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/12345>
- RAVINES ABANTO, Sheila Karina. *Diseño de un sistema de gestión de mantenimiento predictivo para incrementar la disponibilidad mecánica de una flota de maquinaria pesada de una empresa de servicios de maquinaria* [en línea]. Tesis de Licenciatura. Universidad Privada del Norte, 2020 [Consulta: 22 de octubre de 2024]. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUPN_6c34e7eedb365510acb0ef2fd8544f7a
- RAZURI GUANILO, Juan Carlos; VENTURA LLANOS, Eduardo. *El mantenimiento en el siglo XXI* [en línea]. Universidad Privada del Norte, 2020 [Consulta: 16 de octubre de 2024]. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUPN_ff1ec68dfa0e9881651d860c5089d58
- RODRÍGUEZ TORRES, Emiliano. Análisis de confiabilidad en sistemas de mantenimiento predictivo aplicado a maquinaria pesada. *Revista Ingeniería Aplicada*, 2019, vol. 14, no. 2, p. 45-60.
- SÁNCHEZ-GÓMEZ, Ana María. *Técnicas de mantenimiento predictivo: metodología de aplicación en las organizaciones* [en línea]. Universidad Católica de Colombia, 2017 [Consulta: 12 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/15585>
- SILVA ZAMBRANO, Ricardo. *El papel del mantenimiento predictivo en la reducción de costos operativos en empresas mineras*. Lima: Editorial Industrial, 2022.
- TAPIA, Ramón Alberto Huapaya; GUZMÁN, Oscar Alejos. *El régimen desequilibrado del incumplimiento en los contratos del Estado* [en línea]. *Advocatus*, 2021, no. 041, p. 103-115 [Consulta: 10 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Advocatus/article/view/5654>
- VILLANUEVA, Eduardo. Estrategias de mantenimiento predictivo en flotas de equipos para la industria minera. *Revista Tecnología e Ingeniería*, 2022, vol. 20, no. 1, p. 33-40.

ANEXOS

Anexo 01. Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e indicadores	Método, Alcance y diseño	Muestra	Técnicas e Instrumentos
Problema general ¿En qué porcentaje el plan de mantenimiento predictivo incrementará la disponibilidad de los equipos en una empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada?	Objetivo general Diseñar un plan de mantenimiento predictivo para incrementar la disponibilidad de los equipos en una empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada.	Hipótesis general La implementación de un plan de mantenimiento predictivo basado en análisis de datos operativos y monitoreo de condiciones permitirá incrementar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, reduciendo tiempos de inactividad no programados y optimizando los costos operativos.	VARIABLE INDEPENDIENTE Plan de mantenimiento predictivo Dimensiones: • Diagnostico • Capacitación • Programación	Método General: La presente investigación sigue un enfoque lógico deductivo Alcance descriptivo Diseño No experimental.	Población La población de esta investigación está compuesta por 10 maquinarias pertenecientes a una empresa de servicio de alquiler de maquinaria pesada en Arequipa. Muestra Se seleccionarán 5 maquinarias mediante un muestreo aleatorio simple, representando el 50% de la población total, garantizando una selección imparcial y representativa	Técnicas: La técnica de recolección de datos utilizada en esta investigación será la revisión documentaria.
Problemas Específicos a. ¿Cuál es la situación actual de la disponibilidad de la maquinaria? b. ¿Cuáles son las causas de los problemas encontrados en la disponibilidad de la maquinaria? c. ¿Qué indicadores y métricas deben utilizarse para evaluar la efectividad del plan de mantenimiento predictivo propuesto?	Objetivos específicos a. Diagnosticar la situación actual de la disponibilidad de la maquinaria. b. Identificar las causas de los problemas encontrados en la disponibilidad de la maquinaria. c. Evaluar la efectividad del plan del mantenimiento predictivo propuesto.	Hipótesis Específicas • Existen los pronósticos actuales de la disponibilidad de la maquinaria • Dar soluciones las causas de los problemas encontrados en la disponibilidad de la maquinaria. • Determinar la efectividad de plan del mantenimiento predictivo propuesto.	VARIABLE DEPENDIENTE Incremento de equipos. Dimensiones: • Disponibilidad • Confiabilidad			Instrumentos: El instrumento de recolección de datos empleado será la Ficha de Revisión Documentaria.

Anexo 02. Ficha de revisión documentaria.

FICHA DE REVISIÓN DOCUMENTARIA
1. Categoría de análisis:
Situación actual de los equipos.
2. Fuente consultada:
Informe mensual de mantenimiento de los equipos de maquinaria pesada (Julio a Diciembre 2023).
3. Descripción de la información obtenida:
El informe detalla la disponibilidad física promedio de la flota, los tipos de fallas más frecuentes y el porcentaje de intervenciones de mantenimiento por tipo (correctivo, preventivo, predictivo).
4. Datos relevantes:
• Disponibilidad física promedio: 86.88%. • Intervenciones correctivas: 65% del total. • Fallas principales: desgaste de componentes y problemas en sistemas hidráulicos.
5. Aplicación en la investigación:
La información fue utilizada para diagnosticar el estado actual de los equipos y justificar la necesidad de implementar un plan de mantenimiento predictivo para reducir fallas y mejorar la disponibilidad operativa.