



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**DISEÑAR UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO INTEGRAL PARA
LA PALA ELÉCTRICA P&H 4100XPC, CON EL PROPÓSITO DE MEJORAR SU
DISPONIBILIDAD POR PARTE DE LA EMPRESA GLOBAL SERVICES S.A. EN
COMPAÑÍA MINERA CASERONES**

Proyecto de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Ingeniero de Ejecución en Mantenimiento Industrial

Profesor guía: Sr. Osvaldo Durán Artigas

Johnny Andrés Ángel Pastenes

Copiapó, Chile 2023

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas y a la Universidad de Atacama que hicieron posible la realización de esta Tesis

En primer lugar, quiero agradecer a mi profesor guía de tesis, el Sr. Osvaldo Durán por su orientación, paciencia y valiosos consejos a lo largo de este proceso. Su conocimiento y apoyo fueron fundamentales para llevar a cabo la realización de este proyecto.

También quiero agradecer a mi familia por su inquebrantable apoyo emocional y su comprensión durante los momentos de estrés y dedicación que implicó este proyecto. Su amor y aliento fueron cruciales para mantenerme motivado.

Agradezco a mis amigos y compañeros de estudio por sus discusiones, debates y sugerencias que enriquecieron mi trabajo. Sus perspectivas y comentarios fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

Mi agradecimiento se extiende a la Universidad de Atacama, por brindarme los recursos y la infraestructura necesarios para llevar a cabo este proyecto.

Quiero expresar mi gratitud a todos los participantes de mi proyecto, cuya colaboración y voluntad de compartir sus experiencias fueron esenciales para la recolección de datos.

Finalmente, agradezco a todas las fuentes bibliográficas, autores y expertos cuyos trabajos contribuyeron significativamente al desarrollo de mi tesis.

Este proyecto no habría sido posible sin el apoyo de todas estas personas e instituciones. Gracias por creer en mí y en este proyecto.

Atte.

Johnny Andrés Ángel Pastenes

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a las personas que han sido mi fuente de inspiración y apoyo a lo largo de este viaje académico.

A mi familia, cuyo amor, paciencia y apoyo incondicional han sido la base de mi vida. A mis padres, quienes siempre creyeron en mí y me alentaron a perseguir mis sueños. A mis hermanos, por su constante ánimo y comprensión.

A mis amigos y amigas, por ser mi red de apoyo, mis confidentes y mis cómplices en los momentos buenos y malos. Vuestra amistad ha sido un regalo invaluable.

A todos los profesores y profesoras que me han inspirado y enseñado a lo largo de mi carrera, su conocimiento y pasión por la educación han dejado una huella imborrable en mi vida.

Esta tesis es un tributo a todos ustedes, y a cada uno de los que, de una forma u otra, han dejado su huella en mi vida. Gracias por ser parte de este logro.

Atte.

Johnny Andrés Ángel Pastenes

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes generales	1
1.2 Planteamiento y formulación del problema	2
1.3 Formulación del problema general.....	3
1.4 Formulación de problemas específicos	3
1.5 Objetivo general	3
1.6 Objetivos específicos	4
1.7 Justificación e importancia.....	4
1.7.1 Justificación técnica	4
1.7.2 Justificación económica	4
1.8 Variables e indicadores	5
1.8.1 Variable independiente.....	5
1.8.2 Variable dependiente.....	5
CAPÍTULO II	8
MARCO TEÓRICO	8
2.1 Antecedentes del problema	8
2.1.1 Antecedentes internacionales	8
2.1.2 Antecedentes generales	9
2.2 Bases teóricas	11
2.2.1 Pala eléctrica P&H 4100XPC	11
2.2.2 Plan de mantenimiento preventivo integral.....	15
2.2.3 Estrategias de un plan de mantenimiento preventivo integral	16
2.3. Indicadores de la gestión del mantenimiento	18
2.3.1. Disponibilidad	18
CAPÍTULO III	20
MARCO METODOLÓGICO	20
3.1 Métodos y alcance de la investigación.....	20
3.2 Diseño de la investigación	20

3.3 Población y muestra	20
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	20
3.4.1 Técnicas	20
3.4.2 Instrumentos	21
3.5 Operacionalización de las variables	23
CAPÍTULO IV	25
DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	25
4.1 Antecedentes plan de mantenimiento preventivo	25
4.2 Descripción general.....	26
4.3 Especificaciones	26
4.4 Tecnología.....	28
4.5 Descripción de la pala P&H 4100XPC	30
4.5.1 Principales secciones y sistemas de la Pala eléctrica P&H 4100XPC	31
4.5.2 Ciclo de trabajo de la pala eléctrica P&H 4100XPC	35
4.6 Tiempo de ejecución y pautas de mantenimiento	36
4.7 Programación de pautas de mantenimiento.....	39
4.8 Ejecución de pautas de mantenimiento	43
4.9 Optimización del Paso 2 y Paso 4	47
4.10 Nuevo formato en las Pautas de Mantenimiento.....	49
CAPÍTULO V.....	50
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	50
5.1 Antecedentes generales	50
5.2 Análisis de los Resultados.....	51
5.2.1 Diagrama de Causa y Efecto actual del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo	51
5.2.2 Identificación de causas mediante datos obtenidos antes del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo	51
5.2.3 Diagrama de Pareto	53
5.2.4 Cálculo de las Disponibilidades antes de realizar el Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo	55
5.2.5 Comportamiento de la Disponibilidad antes de realizar los Cambios	57

5.2.6 Diagrama de Causa y Efecto después del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo	59
5.2.7 Identificación de causas mediante datos obtenidos después del Diseño del Plan de Mantenimiento	59
5.2.8 Diagrama de Pareto después de realizar los Cambios.....	60
5.2.9 Cálculo de las Disponibilidades después de realizar el diseño del Plan de Mantenimiento	62
5.2.10 Comportamiento de la disponibilidad después de realizar los Cambios.....	64
5.3 Análisis estadístico de resultados.....	66
5.4 Diseño del nuevo Plan de Mantenimiento Preventivo	68
5.5 Estimación de las consecuencias.....	70
5.5.1 Consecuencias económicas	70
5.5.1.1 Costos directos de mantenimiento (CDM).....	72
5.5.1.2 Costos de parada de equipo (CPE).....	72
5.5.2 Consecuencias No - económicas	73
CAPÍTULO VI.....	75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
6.1 Conclusiones	75
6.2 Recomendaciones.....	76
BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXOS.....	79
Anexo A: Especificaciones generales de la pala eléctrica P&H 4100XPC	79
Anexo B: Tiempos de ejecución Pautas de Mantenimiento.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1. Ubicación de sistema de levante.	12
Figura N° 2.2. Ubicación de sistema de empuje.	12
Figura N° 2.3. Ubicación sistema de giro.	13
Figura N° 2.4. Ubicación de sistema de propulsión.	13
Figura N° 2.5. Secciones principales de la pala eléctrica P&H 4100XPC.	15
Figura N° 4.1. Principales secciones de la pala eléctrica P&H 4100XPC.	32
Figura N° 4.2. Componentes de los sistemas de levante y empuje de la pala eléctrica P&H 4100XPC.	33
Figura N° 4.3. Chasis Inferior – Sistema de Propulsión.	34
Figura N° 4.4. Chasis Inferior – Sistema de Propulsión.	35
Figura N° 4.5. Secuencia de realización de Pautas de Mantenimiento.	37
Figura N° 4.6. Tiempo programado para los pasos.	40
Figura N° 4.7. Dotación de mantenedores para los pasos.	41
Figura N° 4.8. Tiempo programado para Pauta de 250 (hrs).	41
Figura N° 4.9. Dotación de mantenedores para Pauta de 250 (hrs).	42
Figura N° 5.1. Diagrama de causa y efecto actual del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.	51
Figura N° 5.2. Diagrama de Causa y Efecto después del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.	59
Figura N° 5.3. Esquema de costos de mantención.	71

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 5.1. Diagrama de Pareto antes del Diseño del Plan de Mantenimiento.....	54
Gráfico N° 5.2. Disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC antes del Plan de Mantenimiento.	58
Gráfico N° 5.3. Diagrama de Pareto después del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.	62
Gráfico N° 5.4. Disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC después del Plan de Mantenimiento.	66
Gráfico N° 5.5. Disponibilidad Actual y Nueva de la pala eléctrica P&H 4100XPC.	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1.1. Operacionalización de variable independiente.	5
Tabla N° 1.2. Operacionalización de variable dependiente.	6
Tabla N° 4.1. Tipos de pautas de mantenimiento para palas P&H de Minera Caserones.	37
Tabla N° 5.1. Datos antes del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.	52
Tabla N° 5.2. Datos para realizar el Diagrama de Pareto antes del Diseño del Plan de Mantenimiento.	53
Tabla N° 5.3. Disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC antes del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.	57
Tabla N° 5.4. Datos después del diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.	60
Tabla N° 5.5. Datos para realizar el diagrama de Pareto después del diseño del Plan de Mantenimiento.	61
Tabla N° 5.6. Disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC después del diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.	65
Tabla N° 5.7. Comparación de Disponibilidades.	66
Tabla N° 5.8. Realización de Pasos en el tiempo.	71
Tabla N° 5.9. Comparación de dotaciones para la ejecución de Pautas de Mantenimiento.	72

RESUMEN

La tesis titulada "Diseño de un Plan de Mantenimiento Preventivo Integral para la Pala Eléctrica P&H 4100XPC con el Propósito de Mejorar su Disponibilidad por Parte de la Empresa Global Services S.A. en Compañía Minera Caserones" se enfoca en la necesidad de optimizar la disponibilidad y eficiencia de la pala eléctrica P&H 4100XPC, un equipo crítico en las operaciones mineras de Compañía Minera Caserones. El proyecto de título se inicia con un análisis detallado de la pala eléctrica, identificando sus componentes clave y requisitos de mantenimiento. Se priorizan los puntos críticos de mantenimiento, aquellos elementos cuyo adecuado funcionamiento impacta directamente en el rendimiento global de la máquina. Posteriormente, se ejecuta un plan de mantenimiento preventivo diseñado específicamente para la pala eléctrica, con el objetivo de mejorar su disponibilidad. La aplicación de este plan ha demostrado un incremento significativo en la disponibilidad de la máquina, acercándose al target correspondiente a un 98%, lo que redundará en una mejora en la eficiencia operativa y la reducción de costos relacionados con el tiempo de inactividad. Además, se utiliza un diagrama de causa y efecto para identificar las posibles causas que afectan la disponibilidad de la pala eléctrica, tanto antes como después de la implementación del plan de mantenimiento preventivo. Esto proporciona una base sólida para tomar decisiones informadas y realizar ajustes continuos en el mantenimiento. Como resultado, se ofrecen recomendaciones clave que incluyen un seguimiento constante, la capacitación del personal, la implementación de tecnología de monitoreo avanzado, un plan de contingencia y un riguroso registro de actividades de mantenimiento. En resumen, este proyecto de tesis tiene como objetivo mejorar la disponibilidad y eficiencia de la pala eléctrica P&H 4100XPC en Compañía Minera Caserones a través de un plan de mantenimiento preventivo integral. Los resultados obtenidos proporcionan un enfoque práctico y científico para abordar los desafíos de mantenimiento en la industria minera, con impacto positivo en la eficiencia operativa y la rentabilidad de la empresa.

Palabras claves: Disponibilidad, Target, diagrama de causa y efecto, plan de mantenimiento preventivo, pautas de mantenimiento.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes generales

En la actualidad, tanto a nivel nacional como internacional en la industria minera, se emplean diversos equipos y maquinarias que optimizan significativamente las etapas de perforación, voladura, excavación, carga y transporte de minerales. Estos equipos principales comprenden palas eléctricas, perforadoras, camiones mineros y maquinaria auxiliar. Sin embargo, la pala eléctrica ubicada en Compañía Minera Caserones, se enfrenta la problemática de contar con equipos que funcionan en condiciones desfavorables, lo cual repercute negativamente en la producción. Esto se traduce en un impacto económico considerable debido a detenciones no programadas, demoras en los procesos debido a cambios de componentes, la falta de piezas principales y la escasez de mano de obra disponible, especialmente durante el turno nocturno.

En este contexto, se presenta un proyecto de título que tiene como objetivo diseñar un plan de mantenimiento preventivo integral específicamente para una pala eléctrica P&H 4100XPC en la mencionada Compañía Minera Caserones. El propósito principal de este plan es prevenir pérdidas debidas a paradas no planificadas, centrándose en el análisis y la identificación de la técnica más adecuada para implementar el plan de mantenimiento preventivo integral en los sistemas de potencia de la pala eléctrica.

Este proyecto de título se estructura en cinco capítulos. En el primer capítulo, se presenta la formulación del problema detectado en la pala eléctrica P&H 4100XPC perteneciente a la Compañía Minera Caserones, junto con la descripción de los objetivos, la justificación y las hipótesis planteadas. El segundo capítulo aborda el marco teórico, incluyendo antecedentes y fundamentos teóricos pertinentes. El tercer capítulo explica la metodología empleada, haciendo hincapié en las técnicas e instrumentos utilizados para evaluar el estado de la pala eléctrica P&H 4100XPC. El cuarto capítulo se enfoca en el análisis y diseño de la solución, identificando requisitos, especificaciones y la secuencia

de operaciones, además de describir el diseño del equipo que está relacionado con la problemática y su posible resolución.

Finalmente, en el quinto capítulo, se aborda la construcción, prueba y presentación de los resultados. El proyecto se centra en proporcionar un diseño de plan de mantenimiento preventivo integral en la condición dirigido a sistemas mecánicos que involucran componentes principales con alta tasa de fallas, como los sistemas de transmisión de potencia de una pala eléctrica, debido a su papel crítico en el proceso de extracción de minerales.

1.2 Planteamiento y formulación del problema

En la actualidad, en el ámbito nacional e internacional de la minería a gran escala, se utilizan una variedad de equipos y maquinaria para agilizar y optimizar el proceso de perforación, explosión, excavación, carga y transporte de minerales. Entre los equipos fundamentales se encuentran las palas eléctricas, perforadoras, camiones mineros y otros equipos auxiliares.

La pala eléctrica P&H 4100XPC perteneciente a la compañía Minera Caserones también forma parte de este proceso y dispone de numerosas máquinas para llevar a cabo la extracción de minerales.

Sin embargo, algunas de estas máquinas tienen un impacto negativo en la producción debido a paradas inesperadas, retrasos en los procesos debido al reemplazo de componentes, la falta de piezas clave y la disponibilidad limitada de mano de obra en situaciones específicas, como durante el turno nocturno.

Este proyecto de título presenta un plan de mantenimiento preventivo integral en el estado de los sistemas mecánicos, centrándose en los componentes principales que tienden a fallar con mayor frecuencia, específicamente en los sistemas de transmisión de potencia

de las palas eléctricas. Estas palas son equipos críticos en el proceso de extracción de minerales.

1.3 Formulación del problema general

¿La elaboración de un plan de mantenimiento preventivo integral de la pala eléctrica P&H 4100XPC contribuirá a prevenir las pérdidas económicas derivadas de interrupciones no planificadas en los sistemas de potencia?

1.4 Formulación de problemas específicos

- La formulación de un plan de mantenimiento preventivo integral busca analizar y determinar la técnica más adecuada, basada en el estado, para supervisar los sistemas de potencia de una pala eléctrica P&H 4100XPC.
- El diseño de dicho plan pretende evaluar la factibilidad de supervisar la frecuencia basada en el estado de los sistemas de la pala eléctrica P&H 4100XPC.
- El desarrollo de un plan de mantenimiento preventivo integral tiene como objetivo contribuir a mejorar las habilidades de los colaboradores encargados de llevar a cabo el monitoreo basado en el estado de la pala eléctrica P&H 4100XPC.
- La implementación de un plan de mantenimiento preventivo integral busca, además, permitir la estimación de la inversión necesaria para llevar a cabo un programa de monitoreo basado en el estado en una pala eléctrica P&H 4100XPC.

1.5 Objetivo general

Diseñar un plan de mantenimiento preventivo integral para la pala eléctrica P&H 4100 XPC, con el propósito de mejorar el indicador de disponibilidad, prolongar su vida útil y reducir los costos asociados a reparaciones no planificadas.

1.6 Objetivos específicos

- Realizar un análisis detallado de la pala eléctrica P&H 4100XPC, incluyendo la identificación de componentes clave, características técnicas y requisitos de mantenimiento.
- Identificar los puntos críticos de mantenimiento en la pala eléctrica P&H 4100XPC, priorizando aquellos componentes o sistemas esenciales para el rendimiento general de la máquina.
- Calcular y comparar la disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC antes y después de implementar el Plan de Mantenimiento Preventivo.
- Incrementar la disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC de un 90% a un 95%, alineándose con el Target establecido por Compañía Minera Caserones correspondiente a un 98%.

1.7 Justificación e importancia

1.7.1 Justificación técnica

El propósito del plan de mantenimiento preventivo integral es aumentar la disponibilidad del equipo y mejorar la eficiencia de las tareas de mantenimiento, al detectar posibles fallas en una etapa temprana, anticipándose a fallas funcionales y prolongando la vida útil de los componentes bajo observación. Cabe destacar que la implementación de un plan de mantenimiento preventivo integral en palas eléctricas es un tema que aún no ha sido investigado en detalle.

1.7.2 Justificación económica

El plan de mantenimiento preventivo integral tiene como objetivo prevenir gastos inesperados, tanto en términos de pérdida de producción como de desperdicio de componentes con poco uso. También busca minimizar el costo adicional relacionado con

el trabajo en horas extras. Además, este enfoque de mantenimiento ayuda a prevenir fallas en cadena que podrían afectar negativamente la vida útil de otros componentes interconectados.

Es importante tener en cuenta que el costo de una parada de producción no programada para una pala es, en promedio, de 6.000 USD. Además, el rango de costos de los componentes varía desde 5.400 USD para piezas como el freno del sistema de izado, hasta 500.000 USD para componentes críticos como la caja de transmisión de engranajes.

Además, es importante mencionar que algunos componentes no pueden mantenerse en stock debido a los costos de almacenamiento, las condiciones de garantía y el tiempo de adquisición promedio de 8 meses.

1.8 Variables e indicadores

1.8.1 Variable independiente

- Plan de mantenimiento preventivo integral

1.8.2 Variable dependiente

- Mejorar la disponibilidad y confiabilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC.

La operacionalización de una variable independiente que se muestra a continuación en la Tabla N° 1.1 implica definir cómo se medirá o cuantificará esa variable en un estudio o experimento. Esto implica convertir una variable abstracta en un conjunto de medidas o indicadores concretos que se pueden recopilar y analizar. Aquí hay pasos generales para operacionalizar una variable independiente:

Tabla N° 1.1. Operacionalización de variable independiente.

Variable Independiente	Sub Variable	Indicadores	Instrumentos
Plan de	Análisis de	• Frecuencia de	• ERP SAP del

Mantenimiento Preventivo Integral	criticidad de sistemas	falla de componentes <ul style="list-style-type: none"> • Costos por reparación • Tiempo promedio para reparar • Tiempo medio entre falla 	módulo de mantenimiento
	AMEF (Análisis de modos y efectos de falla)	<ul style="list-style-type: none"> • Falla funcional • Modos de falla • Efecto de falla • Consecuencias de falla 	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz AMEF de la pala eléctrica P&H 4100XPC

Fuente: Elaboración propia.

La operacionalización de una variable dependiente que se muestra a continuación en la Tabla N° 1.2 implica definir y medir de manera precisa y concreta la variable que está siendo estudiada en una investigación. Esto implica transformar la variable dependiente en una forma que pueda ser observada y medida en la realidad.

Tabla N° 1.2. Operacionalización de variable dependiente.

Variable Dependiente	Sub Variable	Indicadores	Instrumentos
Incremento de disponibilidad y confiabilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC	Disponibilidad	<ul style="list-style-type: none"> • % Disponibilidad • % Utilización 	<ul style="list-style-type: none"> • Indicador mensual de planeamiento, de pala eléctrica P&H 4100XPC
	Confiabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • % Productividad 	<ul style="list-style-type: none"> • Indicador

		<ul style="list-style-type: none"> • % Eficiencia global • Costo de mantenimiento 	<p>mensual de planeamiento, de pala eléctrica P&H 4100XPC</p>
		<ul style="list-style-type: none"> • Seguridad y medio ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Reporte mensual de accidentes de la pala eléctrica P&H 4100XPC

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

En los análisis previos relacionados con la temática del plan de mantenimiento preventivo integral de una pala eléctrica, se han documentado los siguientes hallazgos:

2.1.1 Antecedentes internacionales

Los antecedentes internacionales de un plan de mantenimiento preventivo integral se encuentran en diversas industrias y sectores en todo el mundo. Estos planes se desarrollan para mantener equipos y sistemas en funcionamiento óptimo y evitar costosas fallas no planificadas. A continuación, se mencionan algunos antecedentes y ejemplos:

1. **Industria Automotriz:** En la industria automotriz, las empresas han implementado planes de mantenimiento preventivo integral para garantizar la confiabilidad de los vehículos. Estos planes incluyen inspecciones regulares, cambios de aceite, reemplazo de piezas desgastadas y mantenimiento programado para evitar averías en carretera.
2. **Aeronáutica:** Las compañías aéreas y fabricantes de aeronaves utilizan planes de mantenimiento preventivo integral para garantizar la seguridad y confiabilidad de las aeronaves. Estos planes incluyen inspecciones exhaustivas, mantenimiento programado y reemplazo de componentes críticos para evitar accidentes.
3. **Industria Energética:** En plantas de energía, la implementación de planes de mantenimiento preventivo es esencial para mantener la producción de energía constante. Esto incluye la inspección y el mantenimiento de generadores, turbinas y sistemas de transmisión de energía.

4. **Industria Manufacturera:** En la fabricación, las empresas utilizan planes de mantenimiento preventivo para garantizar la eficiencia de las líneas de producción. Esto incluye la limpieza y el mantenimiento de maquinaria, así como la calibración regular de equipos de medición.
5. **Sector de Tecnología de la Información (TI):** En TI, las organizaciones implementan planes de mantenimiento preventivo para garantizar el rendimiento continuo de los sistemas informáticos y redes. Esto involucra actualizaciones de software, copias de seguridad regulares y mantenimiento de hardware.
6. **Sector de la Construcción:** En la construcción, especialmente en proyectos de gran envergadura como puentes y edificios, se emplean planes de mantenimiento preventivo para garantizar la seguridad y la durabilidad de las estructuras. Esto puede incluir inspecciones regulares y reparaciones programadas.
7. **Sector de Salud:** En hospitales y centros de atención médica, se implementan planes de mantenimiento preventivo para equipos médicos críticos, como escáneres, máquinas de rayos X y sistemas de monitorización de pacientes, para garantizar que estén en óptimas condiciones de funcionamiento.
8. **Sector Ferroviario:** En el transporte ferroviario, las compañías ferroviarias emplean planes de mantenimiento preventivo para garantizar la seguridad y la eficiencia de las locomotoras y vías férreas. Esto incluye inspecciones, lubricación y reemplazo de componentes desgastados.

Estos son solo algunos ejemplos de cómo se han implementado planes de mantenimiento preventivo integral en diversas industrias a nivel internacional. Estos planes se basan en las mejores prácticas y lecciones aprendidas a lo largo del tiempo para garantizar la confiabilidad operativa y reducir los costos asociados con reparaciones no planificadas.

2.1.2 Antecedentes generales

Los antecedentes nacionales en Chile respecto a la implementación de planes de mantenimiento preventivo integral en el ámbito de la minería y otras industrias pesadas son significativos. Chile, como uno de los principales productores de minerales en el mundo, ha desarrollado una amplia experiencia en la gestión de activos industriales y la implementación de estrategias de mantenimiento para garantizar la continuidad de las operaciones. Aquí te presento algunos aspectos relevantes:

1. **Industria Minera:** La minería es una parte fundamental de la economía chilena. Empresas mineras líderes, tanto nacionales como internacionales, operan en el país. Estas compañías han invertido en planes de mantenimiento preventivo integral para sus equipos y maquinaria, incluyendo palas eléctricas, camiones mineros y sistemas de procesamiento. El objetivo es maximizar la producción y reducir los tiempos de inactividad no planificados.
2. **Regulaciones y Normativas:** En Chile, existen regulaciones y normativas que establecen requisitos específicos para el mantenimiento de equipos industriales. Estas regulaciones se enfocan en aspectos de seguridad, medio ambiente y operatividad. Las empresas deben cumplir con estas normativas y adaptar sus planes de mantenimiento en consecuencia.
3. **Desarrollo Tecnológico:** Chile ha estado adoptando tecnologías avanzadas para el monitoreo de equipos y maquinaria. Esto incluye el uso de sensores de condición, sistemas de gestión de activos, análisis de datos y mantenimiento predictivo. Estas tecnologías ayudan a prevenir fallas y optimizar el mantenimiento.
4. **Investigación y Desarrollo:** Universidades y centros de investigación en Chile han llevado a cabo investigaciones relacionadas con el mantenimiento preventivo integral. Esto incluye estudios sobre la vida útil de los componentes, la confiabilidad de los equipos y la eficiencia de las estrategias de mantenimiento.

5. **Casos de Éxito:** Se pueden encontrar casos exitosos de implementación de planes de mantenimiento preventivo integral en la industria minera chilena. Estos casos demuestran cómo estas estrategias pueden mejorar la confiabilidad operativa y reducir los costos.

6. **Formación y Capacitación:** Se han desarrollado programas de formación y capacitación en Chile para el personal involucrado en el mantenimiento de equipos. Estos programas buscan asegurar que el personal esté altamente capacitado para llevar a cabo tareas de mantenimiento de manera efectiva y segura.

En resumen, Chile cuenta con una sólida base de antecedentes en la implementación de planes de mantenimiento preventivo integral, especialmente en la industria minera. La experiencia acumulada, las regulaciones vigentes y la adopción de tecnologías avanzadas han contribuido al éxito de estas estrategias en el país. Esto puede servir como referencia y guía para la implementación de planes similares en otras industrias y regiones.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Pala eléctrica P&H 4100XPC

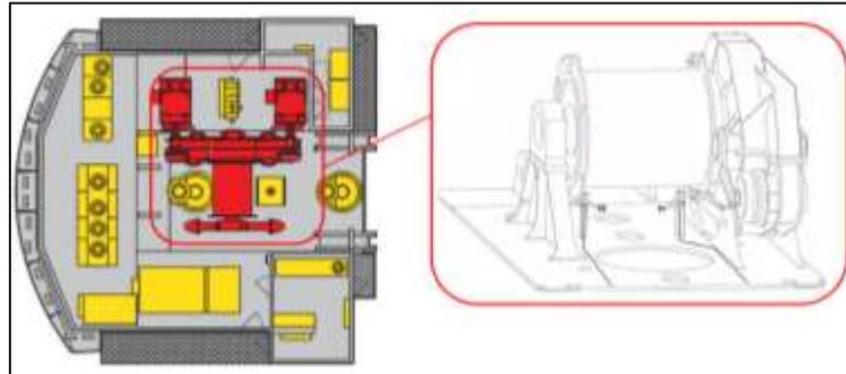
La pala electromecánica, también conocida como pala eléctrica de cables, es una variante de excavadora frontal que se impulsa mediante motores eléctricos y se mueve sobre orugas para su desplazamiento. Además, emplea sistemas de cables metálicos para controlar el movimiento de su cucharón.

Para llevar a cabo las operaciones de carga de material desde los bancos de mineral hacia los equipos de extracción (como los camiones mineros de gran capacidad), se emplean diversas transmisiones en la pala P&H 4100XPC (ver anexo A).

Entre las principales transmisiones se incluyen:

- **Transmisión de levante:** Eleva el cucharón hacia arriba a lo largo del banco durante la fase de excavación y facilita el control tanto del levantamiento como del descenso controlado del cucharón en otras etapas de la operación (ver Figura N° 2.1).

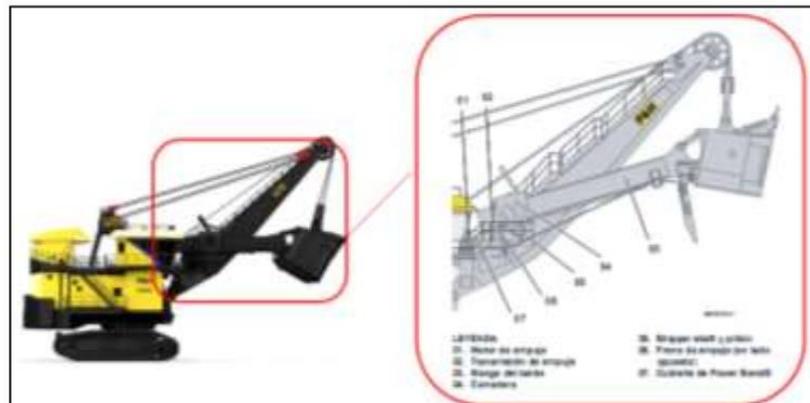
Figura N° 2.1. Ubicación de sistema de levante.



Fuente: Manual de mantención mecánica P&H 4100XPC.

- **Transmisión de empuje:** Ajusta la posición del mango del cucharón moviéndolo hacia afuera o hacia adentro para controlar la profundidad de corte, y coloca el cucharón sobre el camión para descargar la carga (ver Figura N° 2.2).

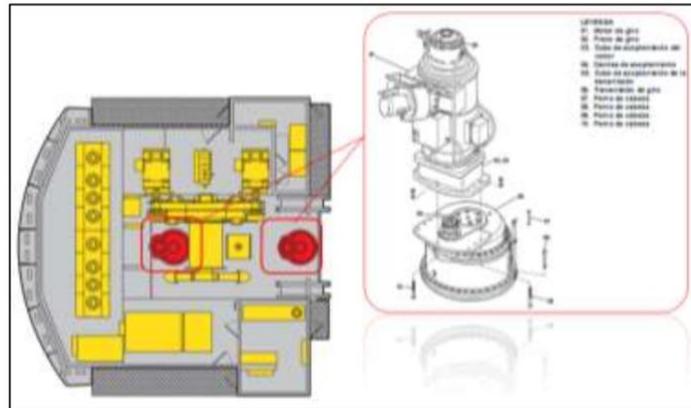
Figura N° 2.2. Ubicación de sistema de empuje.



Fuente: Manual de mantención mecánica P&H 4100XPC.

- **Transmisión de giro:** Gira la pala desde la posición de excavación a la posición de vaciado (ver Figura N° 2.3).

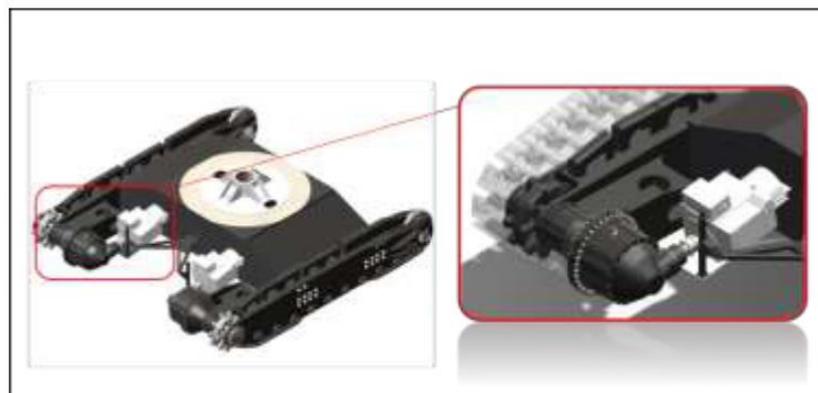
Figura N° 2.3. Ubicación sistema de giro.



Fuente: Manual de mantención mecánica P&H 4100XPC.

- **Propulsión:** Cambiar la pala de una posición de excavación a otra (ver Figura N° 2.4).

Figura N° 2.4. Ubicación de sistema de propulsión.



Fuente: Manual de mantención mecánica P&H 4100XPC.

La pala P&H 4100XPC se compone de dos secciones principales y una sección de accesorios. A continuación, enumeraremos cada una de ellas.

- **Sección superior**

- Tornamesa.
- Sala de máquina.
- Cabina del operador
- Mecanismos dentro de la sala de máquina.

- **Sección inferior**

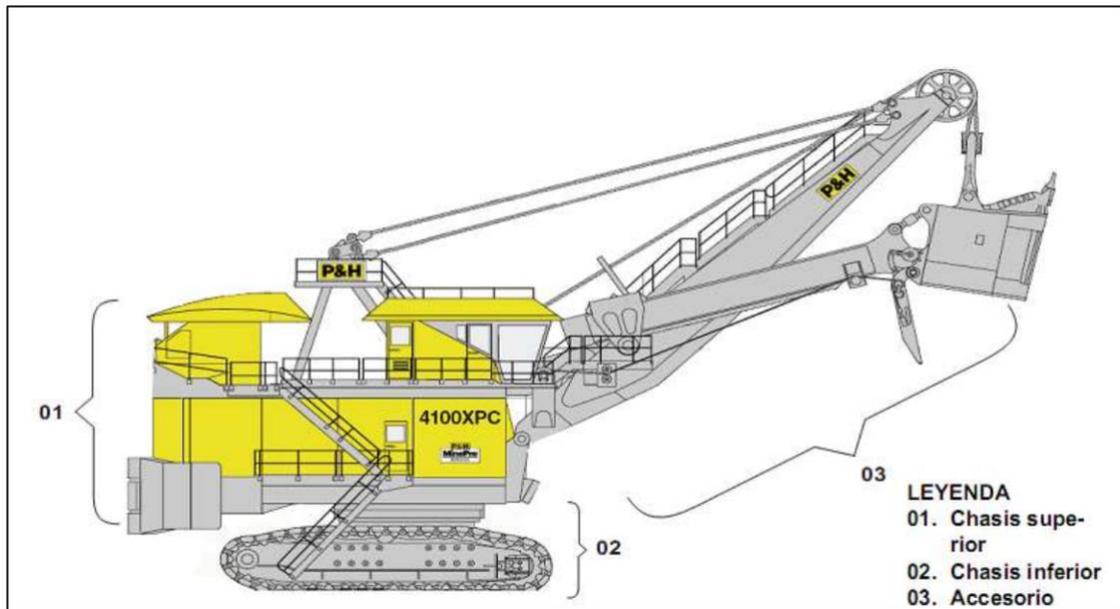
- Tren de polines de giro.
- Corona principal.
- Pin central.
- Bastidores laterales de oruga.
- Mecanismo de propulsión.

- **Accesorio**

- Gantry.
- Pluma.
- Mango del cucharón.

A continuación, la Figura N° 2.5 muestra las secciones principales de la pala eléctrica P&H 4100XPC mencionadas anteriormente.

Figura N° 2.5. Secciones principales de la pala eléctrica P&H 4100XPC.



Fuente: Manual de mantenimiento mecánica P&H 4100XPC.

2.2.2 Plan de mantenimiento preventivo integral

Un plan de mantenimiento preventivo integral es un conjunto estructurado de actividades y procedimientos planificados y programados con el propósito de mantener en óptimas condiciones de operación y funcionamiento los equipos, maquinaria o sistemas utilizados en una organización. Su enfoque principal es la prevención de fallas y el aumento de la confiabilidad de los activos, lo que a su vez contribuye a reducir los costos asociados a reparaciones no planificadas y a optimizar la vida útil de los activos.

Un plan de mantenimiento preventivo integral incluye una serie de tareas programadas que se realizan de manera regular de acuerdo con un cronograma predeterminado. Estas tareas pueden abarcar aspectos como la inspección, lubricación, calibración, limpieza, reemplazo de piezas desgastadas, pruebas de funcionamiento y otras acciones específicas según las necesidades de los equipos o sistemas en cuestión.

El objetivo principal de un plan de mantenimiento preventivo integral es:

Asegurar la disponibilidad de los activos: Garantizar que los equipos estén listos y operativos cuando se requieran, minimizando los tiempos de inactividad no planificados.
Reducir el riesgo de fallas: Identificar y abordar proactivamente problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas críticas.

Optimizar el rendimiento: Mantener los equipos funcionando eficientemente y dentro de los parámetros de diseño.

Prolongar la vida útil: Al realizar un mantenimiento preventivo adecuado, se puede extender la vida útil de los activos, lo que ahorra costos a largo plazo.

Mejorar la seguridad: Un mantenimiento preventivo también puede contribuir a mantener un ambiente de trabajo seguro, al identificar y mitigar riesgos de seguridad.

En resumen, un plan de mantenimiento preventivo integral es una estrategia de gestión que busca prevenir problemas y prolongar la vida útil de los activos de una organización, mejorando la confiabilidad y eficiencia operativa, y reduciendo los costos asociados a reparaciones imprevistas.

2.2.3 Estrategias de un plan de mantenimiento preventivo integral

Las estrategias de un plan de mantenimiento preventivo integral pueden variar según el tipo de equipo o sistema que se esté gestionando, pero en general, suelen incluir las siguientes:

1. **Inspecciones regulares:** Realizar inspecciones periódicas y detalladas de los equipos o sistemas para identificar desgaste, daños o componentes que necesiten reemplazo o ajuste.

2. **Lubricación adecuada:** Garantizar una lubricación adecuada de todas las partes móviles para reducir la fricción y el desgaste.
3. **Calibración y ajustes:** Realizar calibraciones y ajustes periódicos para mantener el rendimiento óptimo de los equipos.
4. **Sustitución de piezas:** Reemplazar piezas o componentes que tengan una vida útil limitada antes de que fallen.
5. **Mantenimiento predictivo:** Utilizar tecnologías como el monitoreo de condición, análisis de vibraciones, termografía y ultrasonido para anticipar problemas y tomar medidas preventivas.
6. **Capacitación del personal:** Asegurarse de que el personal esté capacitado para realizar el mantenimiento preventivo de manera efectiva y segura.
7. **Programación de mantenimiento:** Establecer un calendario de mantenimiento preventivo que indique cuándo se deben realizar las actividades de mantenimiento.
8. **Documentación:** Mantener registros precisos de todas las actividades de mantenimiento realizadas, incluyendo fechas, descripciones y resultados.
9. **Mejora continua:** Evaluar y ajustar constantemente el plan de mantenimiento preventivo en función de los datos recopilados y los cambios en las condiciones de operación.
10. **Gestión de repuestos:** Mantener un inventario de repuestos esenciales para garantizar que estén disponibles cuando sea necesario.
11. **Análisis de datos:** Utilizar datos históricos y tendencias para mejorar la eficiencia del mantenimiento y reducir costos.

12. Priorización de tareas: Identificar y priorizar las actividades de mantenimiento más críticas para garantizar la continuidad de la operación.

Un plan de mantenimiento preventivo integral debe ser específico para cada equipo o sistema, teniendo en cuenta sus características y necesidades particulares. Además, es fundamental seguir las recomendaciones del fabricante y las normativas aplicables en la industria correspondiente.

2.3. Indicadores de la gestión del mantenimiento

Los indicadores de la gestión del mantenimiento constituyen medidas cuantitativas o cualitativas que se emplean para evaluar y vigilar el desempeño y la eficacia de las operaciones de mantenimiento en una organización. Son esenciales para medir la disponibilidad de equipos, la eficiencia de costos y la confiabilidad de los activos. A continuación, se proporcionan algunos indicadores de la gestión del mantenimiento que se llevarán a cabo en el presente proyecto de título.

2.3.1. Disponibilidad

Resulta innegable que, en algún momento, cualquier equipo en funcionamiento experimentará una falla, dando lugar a una interrupción en la producción y la necesidad de llevar a cabo reparaciones durante un período de tiempo determinado. La disponibilidad se define como una relación matemática que permite calcular el porcentaje de tiempo en el cual un elemento o equipo específico estará en condiciones de operar. Según esta definición, la disponibilidad se refiere a la probabilidad de que el sistema esté listo para desempeñar su función designada en su entorno operativo especificado y planificado, cuando se requiera en un momento aleatorio o durante un período de tiempo definido.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2. 1})$$

Dónde:

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

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

$$\mathbf{MTTR} = \frac{\text{Tiempo total de inactividad}}{\text{N}^\circ \text{ de averías}} \quad (\mathbf{Ec. N}^\circ \mathbf{2.2})$$

Y para calcular el MTBF, se tiene:

$$\mathbf{MTBF} = \frac{\text{Tiempo total de un buen funcionamiento}}{\text{N}^\circ \text{ de averías}} \quad (\mathbf{Ec. N}^\circ \mathbf{2.3})$$

Es crucial señalar que el cálculo del indicador de disponibilidad puede abordarse desde diversos enfoques. En este contexto, se hace referencia a la ecuación N° 2.1, la cual se centra exclusivamente en el impacto de las fallas en el elemento en cuestión. En otras palabras, este indicador particular considera únicamente los tiempos de reparación asociados al mantenimiento correctivo. Su valor varía entre 0 y 1, y la determinación de un rango de disponibilidad aceptable depende de las necesidades específicas de cada empresa.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Métodos y alcance de la investigación

Esta investigación se clasifica como básica y de nivel descriptivo, ya que se centra en analizar el proceso de mantenimiento y el comportamiento de componentes a través de la creación de un plan de mantenimiento preventivo integral. En este contexto, resulta fundamental detectar cualquier desviación con respecto a la operación normal de sistemas y componentes que puedan contribuir a la inoperatividad de la pala eléctrica. La investigación de tipo básica tiene como objetivo principal expandir el conocimiento científico a través de la observación de fenómenos en la realidad, y sus niveles incluyen la exploración, descripción y explicación. Por otro lado, la investigación de nivel descriptivo busca simplemente describir cómo funcionan o suceden los objetos de estudio, sin que el investigador influya en su funcionamiento.

3.2 Diseño de la investigación

Este estudio se alinea con los objetivos de investigación de diseño no experimental y se encuentra en el ámbito descriptivo.

3.3 Población y muestra

Las unidad de estudio comprende la pala eléctrica que forma parte de la Compañía Minera Caserones y que se encuentra en funcionamiento. No se consideraron criterios de exclusión debido a la limitada cantidad de palas eléctricas modelo P&H 4100XPC disponibles.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Técnicas

Se empleó la técnica de observación en el campo de manera directa, llevando a cabo esta observación mediante el uso de fichas de observación y herramientas de medición.

La fuente de datos utilizada se basó en información primaria obtenida a través de la evaluación de la pala eléctrica modelo P&H 4100XPC.

3.4.2 Instrumentos

Los instrumentos empleados consisten en fichas de observación que fueron creadas y diseñadas por el departamento de mantenimiento predictivo de la unidad operativa en la que las palas desempeñan sus tareas. Estas fichas fueron evaluadas y aprobadas por expertos hace más de dos décadas y han sido adaptadas para satisfacer las necesidades específicas de las unidades en cuestión.

Los instrumentos necesarios para llevar a cabo un plan de mantenimiento preventivo integral pueden variar según la industria y la maquinaria específica que se esté gestionando. Sin embargo, a continuación se proporciona una lista general de instrumentos comunes que se suelen utilizar en un plan de mantenimiento preventivo integral:

1. **Checklists de Inspección:** Estos formularios detallados se utilizan para realizar inspecciones regulares de equipos y sistemas. Los técnicos completan los checklists para asegurarse de que todos los componentes se encuentren en buen estado y funcionando correctamente.
2. **Herramientas de Medición:** Estas pueden incluir instrumentos como calibradores, manómetros, termómetros, medidores de vibración y otros dispositivos para medir y registrar parámetros clave, como presión, temperatura, vibración, etc.
3. **Equipos de Diagnóstico:** Esto incluye equipos de análisis de aceite, cámaras de termografía infrarroja, analizadores de vibraciones y otros dispositivos avanzados que ayudan a identificar problemas antes de que se conviertan en fallas.

4. **Software de Gestión de Mantenimiento:** Estas aplicaciones informáticas permiten planificar, programar y dar seguimiento a las tareas de mantenimiento preventivo, así como gestionar la información recopilada durante las inspecciones.
5. **Manuales de Mantenimiento:** Documentación técnica que proporciona instrucciones detalladas sobre el mantenimiento de equipos específicos. Pueden incluir diagramas, listas de piezas, procedimientos de mantenimiento y más.
6. **Historiales de Mantenimiento:** Registros documentados de todas las actividades de mantenimiento realizadas en cada equipo, incluyendo fechas, detalles de las reparaciones y reemplazos de piezas.
7. **Planes de Mantenimiento:** Documentos que detallan las tareas de mantenimiento preventivo programadas, la frecuencia de realización y las responsabilidades asignadas.
8. **Sensores y Sistemas de Monitoreo Continuo:** Para equipos críticos, se pueden instalar sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real que envían alertas cuando se detectan anomalías.
9. **Equipo de Protección Personal (EPP):** Elementos de seguridad necesarios para que los técnicos realicen inspecciones y mantenimiento de manera segura, como cascos, gafas de protección, guantes y más.
10. **Manuales de Entrenamiento:** Documentación que brinda instrucciones y orientación sobre cómo llevar a cabo tareas de mantenimiento de manera efectiva y segura.
11. **Registros y Documentación de Cumplimiento:** Documentación que verifica que todas las tareas de mantenimiento se han realizado de acuerdo con las regulaciones y normativas aplicables.

12. **Herramientas de Comunicación:** Equipos de comunicación, como radios portátiles o sistemas de comunicación interna, para coordinar las actividades de mantenimiento y la respuesta a emergencias.

Estos son algunos de los instrumentos y recursos comunes utilizados en un plan de mantenimiento preventivo integral.

3.5 Operacionalización de las variables

La metodología de operacionalización de variables en un plan de mantenimiento preventivo integral implica definir y medir las variables clave relacionadas con el mantenimiento y la confiabilidad de los equipos de una manera concreta y cuantificable.

A continuación se presente un ejemplo de cómo operacionalizar variables en este contexto:

Variable Abstracta: Estado de los Equipos (como medida de la confiabilidad).

Operacionalización:

1. **Definición Clara:** Definir claramente lo que se entiende por "estado de los equipos" en el contexto del mantenimiento preventivo. Por ejemplo, puede ser la ausencia de defectos graves o el cumplimiento de ciertos criterios de funcionamiento.
2. **Criterios de Medición:** Establecer criterios específicos para determinar el estado de los equipos. Esto podría incluir la inspección de componentes clave, la medición de indicadores de desgaste, la revisión de registros de mantenimiento, etc.
3. **Sistema de Puntuación:** Crear un sistema de puntuación o categorización que permita asignar valores numéricos al estado de los equipos. Por ejemplo, podría

ser una escala de 1 a 5, donde 1 representa "Muy mal estado" y 5 representa "Óptimo estado".

4. **Frecuencia de Medición:** Establecer la frecuencia con la que se evaluará el estado de los equipos. Por ejemplo, podría ser mensual, trimestral o anual, según las necesidades.
5. **Registro de Datos:** Registrar los resultados de las evaluaciones utilizando el sistema de puntuación definido. Esto implica recopilar datos concretos sobre el estado de los equipos en cada medición.
6. **Análisis de Datos:** Utilizar estadísticas descriptivas para analizar los datos recopilados y obtener métricas como el promedio, la desviación estándar y la tendencia general del estado de los equipos a lo largo del tiempo.
7. **Tomar Decisiones Basadas en Datos:** Utilizar los resultados para tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento preventivo, como programar intervenciones específicas en los equipos que tienen un estado deficiente.
8. **Retroalimentación y Mejora Continua:** Utilizar los datos recopilados para retroalimentar el plan de mantenimiento preventivo, identificar áreas de mejora y ajustar las estrategias según sea necesario.

Esta metodología permite evaluar y medir de manera objetiva el estado de la pala eléctrica P&H 4100XPC, lo que facilita la toma de decisiones para garantizar un mantenimiento eficaz y la confiabilidad del activo. Cabe destacar que la operacionalización de variables específicas puede variar según la industria, los equipos y los objetivos del plan de mantenimiento preventivo integral.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

4.1 Antecedentes plan de mantenimiento preventivo

Un plan de mantenimiento preventivo es un conjunto de actividades planificadas y sistemáticas que tienen como objetivo mantener el equipo, las instalaciones o los sistemas en óptimas condiciones de funcionamiento y prevenir averías, fallos o degradación prematura. Este enfoque de mantenimiento se basa en realizar inspecciones regulares, tareas de limpieza, lubricación, ajustes y reemplazos programados de piezas, siguiendo un calendario predeterminado. El propósito principal del mantenimiento preventivo es garantizar la fiabilidad, prolongar la vida útil del equipo y evitar costosas interrupciones no planificadas.

Los elementos clave de un plan de mantenimiento preventivo incluyen:

1. **Programación:** Se establece un calendario de mantenimiento que especifica la frecuencia de las tareas preventivas. Esto puede variar según el tipo de equipo o sistema y su nivel de uso.
2. **Lista de Verificación:** Se desarrolla una lista detallada de verificación que enumera las tareas específicas a realizar en cada período de mantenimiento. Estas tareas pueden incluir inspecciones visuales, mediciones, pruebas y otros procedimientos.
3. **Lubricación:** Se planifican y llevan a cabo las tareas de lubricación necesarias para garantizar que los componentes móviles funcionen sin fricción excesiva y desgaste prematuro.
4. **Reemplazo de Componentes:** Se identifican las piezas que deben reemplazarse periódicamente, como filtros, correas, rodamientos, juntas y otros elementos sujetos a desgaste.

5. **Inspección de Seguridad:** Se realizan inspecciones de seguridad para garantizar que todos los dispositivos de seguridad estén en funcionamiento y cumplan con las regulaciones y normativas aplicables.
6. **Registro y Documentación:** Se mantienen registros detallados de todas las actividades de mantenimiento preventivo, incluyendo fechas, horas de operación, tareas realizadas y piezas reemplazadas.
7. **Actualización Periódica:** El plan de mantenimiento preventivo se revisa y actualiza periódicamente para adaptarse a las condiciones cambiantes, nuevos datos de rendimiento o recomendaciones del fabricante.

El mantenimiento preventivo es esencial en entornos industriales, mineros, de fabricación y en muchas otras áreas donde la operación ininterrumpida es crítica. Al implementar un plan de mantenimiento preventivo efectivo, las organizaciones pueden reducir los costos de mantenimiento, minimizar el tiempo de inactividad no planificada y prolongar la vida útil de sus activos.

4.2 Descripción general

La pala eléctrica de cable 4100XPC, la opción preferida de pala clase ultra para minas de alto nivel de producción y bajo costo en todo el mundo, es ideal para cargar sistemas de trituradora-transportadora en la mina y camiones de acarreo de clase ultra. Las características de la pala 4100XPC incluyen el diseño más novedoso y actualizaciones tecnológicas para maximizar la disponibilidad de la máquina y la producción del equipo [1].

4.3 Especificaciones

La pala eléctrica P&H 4100XPC es un equipo utilizado en la industria minera para la excavación y carga de grandes cantidades de material. Aquí te proporciono algunas especificaciones generales de este equipo:

1. Capacidad de Carga:

- La capacidad de carga de la P&H 4100XPC varía según la configuración específica, pero puede ser de hasta 120 toneladas métricas o más, lo que la hace adecuada para trabajos de minería de gran escala.

2. Potencia del Motor:

- Está equipada con un motor eléctrico de alta potencia que puede tener una capacidad de hasta 5.500 HP (caballos de fuerza).

3. Peso Total:

- El peso total de la máquina es significativo y puede superar las 1.000 toneladas métricas, dependiendo de la configuración.

4. Altura de Alcance:

- La altura máxima de alcance del brazo excavador y la pala varía según la configuración, pero puede superar los 30 metros.

5. Longitud del Brazo Excavador:

- La longitud del brazo excavador es también variable y puede superar los 30 metros.

6. Ancho de la Pala:

- El ancho de la pala es grande y puede ser de varios metros para permitir la carga eficiente de grandes camiones mineros.

7. Sistemas de Accionamiento:

- La P&H 4100XPC utiliza sistemas de accionamiento eléctrico para mover el brazo excavador y la pala. Esto le proporciona una mayor eficiencia y control.

8. Sistemas de Seguridad:

- Incorpora sistemas de seguridad para proteger a los operadores y prevenir accidentes en la mina. Esto puede incluir sistemas de detección de obstáculos, sistemas de extinción de incendios, y sistemas de alarma.

9. Tren de Rodaje:

- El equipo puede descansar sobre orugas o ruedas, dependiendo de la configuración específica.

10. Sistema de Control:

- La P&H 4100XPC está equipada con un avanzado sistema de control que permite a los operadores realizar trabajos de excavación de manera precisa y eficiente.

4.4 Tecnología

La tecnología de la pala P&H 4100XPC es una avanzada tecnología utilizada en las palas eléctricas mineras, específicamente en la P&H 4100XPC, un equipo utilizado en la industria minera para la excavación y carga de grandes cantidades de material. A continuación, se describen algunas de las características y tecnologías comunes asociadas con la P&H 4100XPC:

1. **Control Electrónico Avanzado:** La pala P&H 4100XPC está equipada con sistemas de control electrónico avanzados que permiten a los operadores realizar operaciones de excavación de manera precisa y eficiente. Los controles son intuitivos y brindan información en tiempo real sobre el estado de la máquina.
2. **Sistemas de Monitoreo y Diagnóstico:** Estos equipos suelen contar con sistemas de monitoreo y diagnóstico avanzados que registran datos operativos y de rendimiento. Esto ayuda a los operadores y al personal de mantenimiento a identificar problemas potenciales y a llevar a cabo un mantenimiento preventivo más efectivo.
3. **Automatización Parcial o Completa:** Algunas palas P&H 4100XPC están equipadas con sistemas de automatización que permiten a la máquina ejecutar ciertas tareas de forma autónoma o semiautónoma, como cargar camiones de manera precisa y repetitiva.
4. **Tecnología de Detección de Obstáculos:** Para garantizar la seguridad, estas palas pueden estar equipadas con sistemas de detección de obstáculos que ayudan a evitar colisiones con otros equipos o estructuras en la mina.
5. **Sistemas de Gestión de Energía:** Dado que estas máquinas son de gran tamaño y requieren una gran cantidad de energía eléctrica, a menudo incorporan sistemas de gestión de energía para optimizar su eficiencia energética y reducir los costos operativos.
6. **Sistemas de Lubricación Centralizada:** Para facilitar el mantenimiento, algunas palas P&H 4100XPC cuentan con sistemas de lubricación centralizada que aseguran que los componentes críticos estén bien lubricados y funcionando correctamente.

7. **Sistemas de Seguridad Avanzados:** Estos equipos están diseñados con sistemas de seguridad avanzados que incluyen alarmas, sistemas de extinción de incendios, y sistemas de control de acceso para proteger a los operadores y prevenir accidentes en la mina.
8. **Diseño Modular:** Muchas de estas palas están diseñadas con componentes modulares, lo que facilita el reemplazo y la actualización de piezas para mantener el equipo en funcionamiento de manera eficiente.
9. **Capacidad de Carga y Alcance Personalizables:** La pala P&H 4100XPC se puede configurar con diferentes capacidades de carga y alcances para adaptarse a las necesidades específicas de la mina.
10. **Tecnología de Seguimiento y Localización:** Algunas palas pueden estar equipadas con sistemas de seguimiento y localización para un mejor control y gestión de su ubicación en el sitio minero.

4.5 Descripción de la pala P&H 4100XPC

Las palas eléctrica, también conocidas como palas de cables, son un tipo de excavadora frontal accionada por energía eléctrica, que se vale de cables para el accionamiento del balde o cucharón. En general se trata de equipos de gran envergadura, que alcanzan elevadas producciones con costos unitarios bajos, alta disponibilidad mecánica y una larga vida útil.

Sirven como equipos de carguío para camiones de extracción (CAEX) o para sistemas transportadores de trituración en pozo. Las palas eléctricas son uno de los equipos más usados en minería a cielo abierto y su elección es determinante para el desarrollo de minas de gran escala. [2]

En la actualidad, las constantes exigencias que demandan el proceso productivo y el cumplimiento de estándares de seguridad en la minería, hacen que el diseño y fabricación

de las palas eléctricas estén bajo un permanente desarrollo tecnológico. Esto se manifiesta en el incremento sostenido en la capacidad de carguío de los equipos, donde una pala es capaz de cargar un camión de 362 toneladas en sólo 3,5 pasadas; y en la constante diversificación de los sistemas de monitoreo de condiciones y control operacional. [3]

4.5.1 Principales secciones y sistemas de la Pala eléctrica P&H 4100XPC

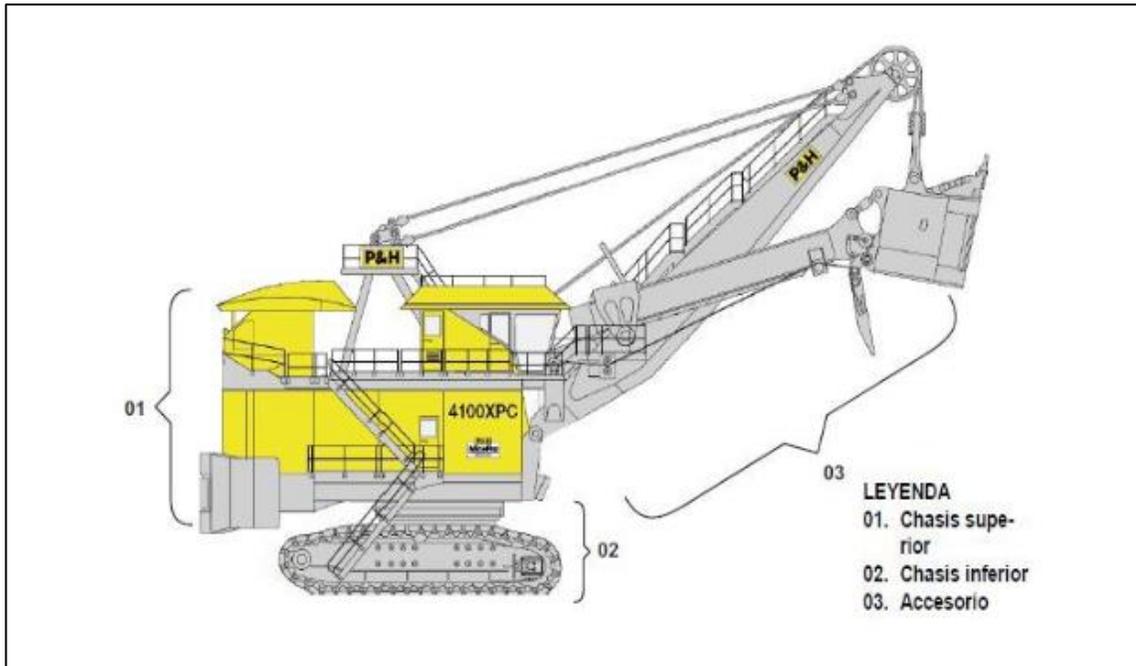
La pala eléctrica P&H 4100 XPC es un equipo de carguío que proporciona una carga útil nominal de 108,9 (ton métricas) y cuyo balde posee una capacidad de 52,8 a 61,2 (m³).

Desarrolla su labor de carguío mediante 4 funciones principales accionadas eléctricamente: Propulsión, Giro, Empuje, y Levante.

Se presentan las 3 secciones principales del equipo (ver Figura N° 4.1):

- **Chasis Inferior:** Es una estructura robusta que soporta el peso del equipo, va montada sobre dos bastidores laterales que a su vez se insertan en dos carros de orugas, permitiendo la función desplazamiento y dirección del equipo.
En la parte superior de la estructura se ubica la corona dentada de giro y la pista inferior del círculo de rodillos, sobre ellos descansa el Chasis Superior.
- **Chasis Superior:** Ubicado sobre el Chasis Inferior, consiste en una plataforma que puede girar en 360° y en ambos sentidos en torno al pin central. En la parte frontal se ubica el accesorio de operación y la cabina del operador, mientras que en la parte trasera está el contrapeso.
- **Accesorio de operación:** Permite la operación de carga mediante la combinación de las funciones de elevación y empuje. La elevación se hace mediante el cable de elevación, que se enrolla en su correspondiente tambor. Mientras que el empuje se realiza por medio de un mecanismo piñón y cremallera instalado en la pluma.

Figura N° 4.1. Principales secciones de la pala eléctrica P&H 4100XPC.



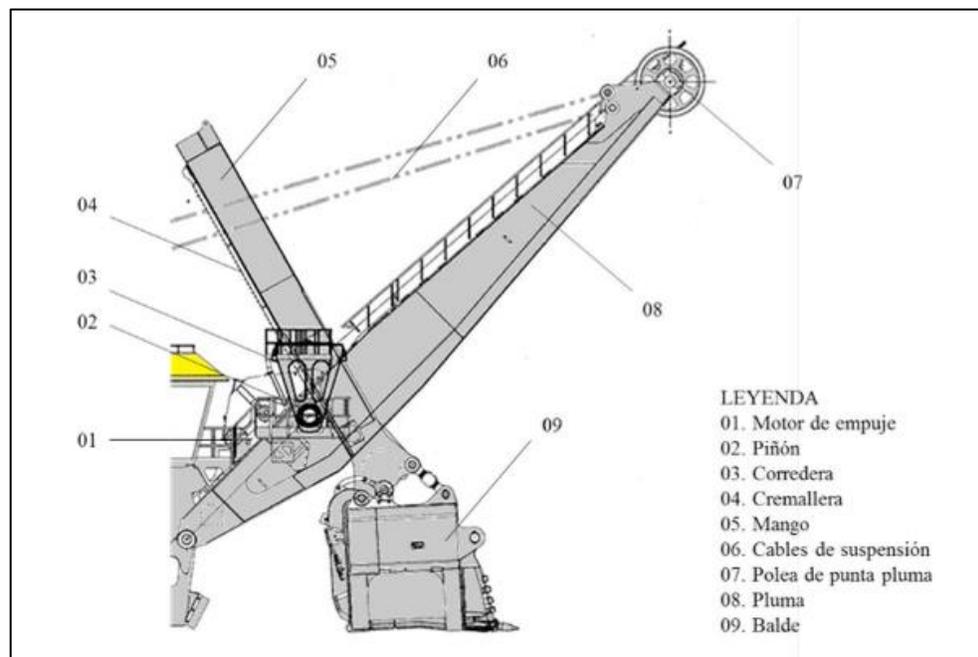
Fuente: Manual de mantención mecánica P&H 4100XPC.

Se presentan los Sistemas principales del equipo:

- **Sistema Eléctrico:** El equipo requiere de energía eléctrica para accionar todas sus funciones operativas. El sistema de distribución de electricidad de la mina proporciona energía en corriente alterna de alto voltaje, la cual llega al equipo por la parte trasera mediante un cable hasta el Chasis Inferior y mediante colectores de alto voltaje llega al Chasis Superior, donde el sistema eléctrico de la pala transforma la energía hasta niveles de trabajo adecuados y de corriente continua.
- **Sistema de Levante:** La elevación del balde se hace mediante cables, la pala dispone de un mecanismo compuesto por dos motores eléctricos y una transmisión por engranajes que permiten el enrollamiento del tambor y en consecuencia la elevación del balde. El mecanismo de levante cuenta con un freno de zapata para mantener el balde elevado durante los desplazamientos de la máquina, el freno se desactiva neumáticamente durante el carguío mediante el control eléctrico desde cabina.

- **Sistema de Empuje:** Este sistema permite la penetración del balde en el frente de carguío. Para ello la pala dispone de un mecanismo de piñón y cremallera, que funciona gracias a un motor y caja de engranajes montados en la pluma que transmite potencia mediante correas hasta el piñón y éste a la cremallera presente en el mango, permitiendo así el movimiento de empuje de la pala (ver Figura N° 4.2).

Figura N° 4.2. Componentes de los sistemas de levante y empuje de la pala eléctrica P&H 4100XPC.



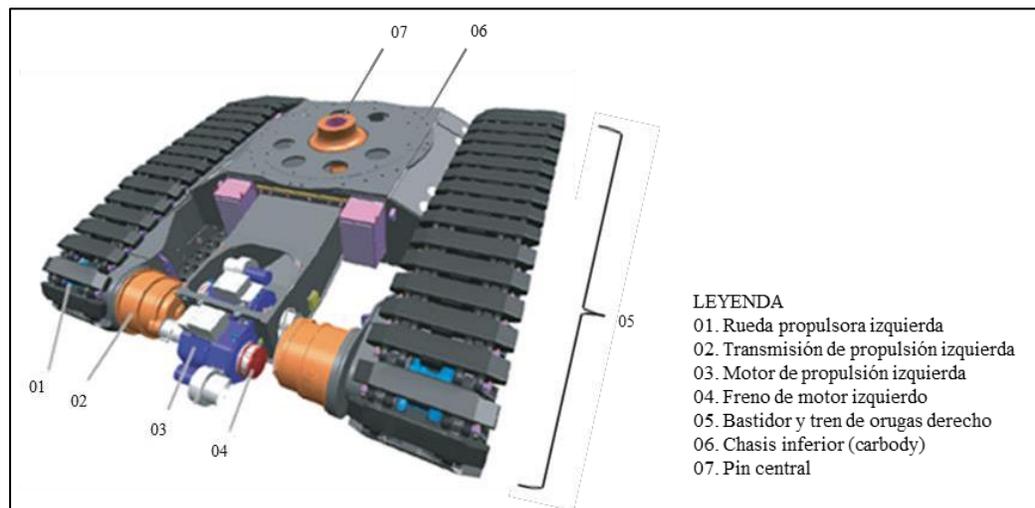
Fuente: Manual de mantención mecánica P&H 4100XPC.

- **Sistema de Giro:** El sistema permite el giro en 360° y en ambos sentidos del Chasis Superior respecto al Chasis Inferior. El sistema es accionado por tres motores y transmisiones que interactúan con la corona de giro inferior. Los motores tienen frenos de retención, que evitan que el chasis superior gire después de llegar al descanso completo.

- **Sistema de Propulsión:** Para lograr el avance, retroceso y una dirección diferencial suave, el sistema de propulsión utiliza dos mecanismos propulsores independientes.

Cada mecanismo consta de un motor montado fijamente al Chasis Inferior, transmisión planetaria montada en un bastidor lateral y rueda propulsora que desplaza al tren de orugas posibilitando así el desplazamiento del equipo

Figura N° 4.3. Chasis Inferior – Sistema de Propulsión.



Fuente: Manual de mantenimiento mecánica P&H 4100XPC.

- **Sistema Neumático:** Este sistema proporciona aire comprimido, filtrado, seco y lubricado para los sistemas de frenos de la pala (giro, levante, empuje y propulsión) y el sistema de lubricación automático (bombas accionadas por aire). El aire comprimido también es utilizado para la bocina neumática, la escalera de acceso (cilindros neumáticos), para limpiar los filtros de aire, y en otros dispositivos auxiliares opcionales.
- **Sistema de Lubricación:** Es un sistema automático cuyo objetivo básico es suministrar el lubricante específico (grasa multiuso o lubricante de engranajes abiertos) a zonas móviles específicas, según ciclos de lubricación que responden a condiciones operativas específicas.

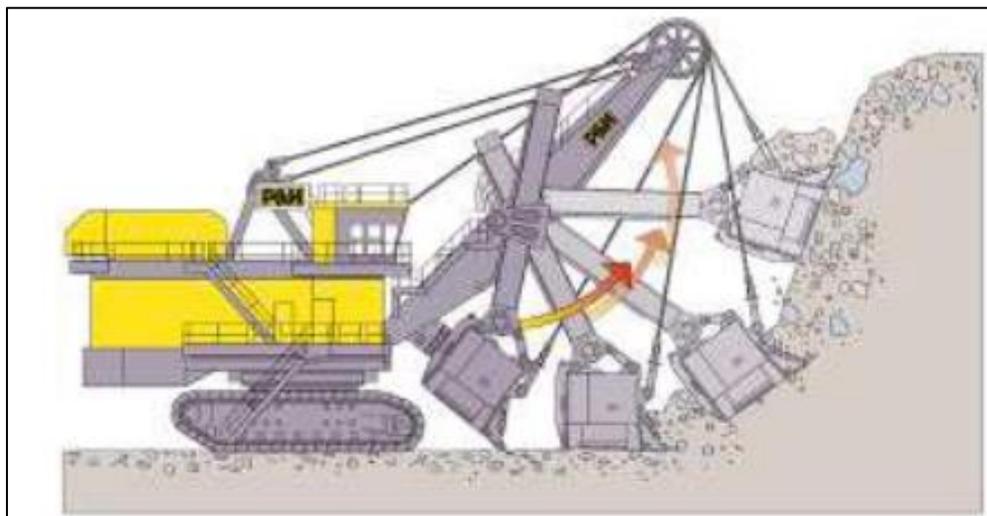
- **Sistema Estructural:** Son los elementos que dan rigidez estructural al equipo, están contruidos por planchas de acero de distinto espesor, soldadas entre ellas en diversos puntos. Se compone de estructuras como: Pluma, mango, correderas, caja de desgaste de la pluma, balde, tornamesa superior, chasis inferior, bastidores, pórtico, conjunto punta pluma y cables de suspensión.

4.5.2 Ciclo de trabajo de la pala eléctrica P&H 4100XPC

El ciclo de trabajo consta de 4 fases: excavación, giro, vaciado y retorno; desarrollando para tal fin 3 funciones principales: empuje, levante y giro. El movimiento de propulsión, se utiliza para posicionar la pala en relación al banco o frente de carguío, para trasladarla según sean los requerimientos de mineral o según condiciones operacionales de la mina y para realizar movimientos cortos durante trabajos de mantenimiento.

La fase de excavación consiste en forzar el balde en el frente de carguío, realizando movimientos de levante y empuje simultáneamente, según se aprecia en la Figura N° 4.4.

Figura N° 4.4. Chasis Inferior – Sistema de Propulsión.



Fuente: Manual de mantención mecánica P&H 4100XPC.

La fase de giro comienza cuando el balde se encuentra cargado y a una altura controlada que permita girar el balde y posicionarlo sobre el camión. La fase de vaciado comienza antes

que el balde cargado pase sobre la tolva de camión de extracción y consiste en vaciar la carga del balde, mediante un sistema de apertura de la tapa del balde. La fase de retorno incluye el giro de vuelta al frente de carguío y bajar el balde para cerrar la tapa.

La pala eléctrica está diseñada para cargar material suelto o fragmentado en los camiones. Estos camiones acarrear el material a otra área para su disposición o procesamiento. La pala puede cargar los camiones de capacidad de carga 360 (ton) en 3,5 pasadas, en ciclos de aproximadamente 30 (segundos).

4.6 Tiempo de ejecución y pautas de mantenimiento

Las Pautas de Mantenimiento son procedimientos de trabajo que buscan que las tareas se realicen siempre de la misma forma y que la información pueda transmitirse. En los procedimientos se detalla cómo realizar determinados trabajos técnicos, como son revisiones, cambios de elementos, calibración de útiles y herramientas, formas de actuación en determinadas circunstancias, etc. Estos suelen tener, al menos, los siguientes apartados [4].

1. Objeto.
2. Alcance.
3. Responsabilidades.
4. Definiciones.
5. Requisitos de Seguridad y Medio Ambiente.
6. Herramientas, materiales y repuestos necesarios.
7. Desarrollo.
8. Inspecciones y pruebas.
9. Registros .

En compañía Minera Caserones, se han desarrollado 3 tipos de Pautas de Mantenimiento para las palas eléctricas P&H 4100XPC, éstas difieren en contenido y extensión en función de las horas acumuladas de operación del equipo registradas en el horómetro.

Tabla N° 4.1. Tipos de pautas de mantenimiento pala palas P&H de Minera Caserones.

Tipo de pauta	Frecuencia	Duración
Pasos	500 (hrs)	14 (hrs)
Intermedia	250 (hrs)	6 (hrs)
Inspección diaria	Todos los días	1 (hr)

Fuente: Elaboración propia.

Los Pasos son 4 en total y se ejecutan secuencialmente bajo una frecuencia de operación de 500 (hrs) acumuladas, denominándose Paso 1, Paso 2, Paso 3 y Paso 4 que corresponden a los pasos de 500, 1.000, 1.500 y 2.000 (hrs) respectivamente. Éstos se ejecutan en forma alternada con la Pauta Intermedia o más conocida como Pauta de 250 (hrs) obedeciendo el orden dispuesto en la Figura N° 4.5.

Figura N° 4.5. Secuencia de realización de Pautas de Mantenimiento.



Fuente: Elaboración propia.

Los 4 Pasos y la Pauta de 250 (hrs) se componen de una serie de pautas por especialidad, reciben ese nombre porque son atendidas por los mantenedores en función de su especialidad.

En términos generales primero se ejecuta la pauta dinámica, que corresponde a un chequeo con el equipo en movimiento para detectar desviaciones en su funcionamiento.

Luego se desenergiza el equipo para dar inicio a la ejecución de las pautas por especialidad, para terminar con las pruebas finales para entrega del equipo, siendo un operador quien ejecuta este último punto.

Tabla N° 4.2. Contenido de las Pautas de Mantenimiento: Pasos y Pauta de 250 (hrs).

Tipo de Pauta	Pautas por especialidad
Paso	Pauta Dinámica
	Pauta de Lubricación
	Pauta Estructural
	Pauta Mecánica
	Pauta Eléctrica
	Pruebas finales de entrega
Pauta de 250 (hrs)	Pauta Dinámica
	Pautas de Lubricación
	Pauta Estructural
	Pauta Eléctrica

Fuente: Elaboración propia.

En forma anexa, junto a cada Paso o Pauta de 250 (hrs), se añade la bitácora del operador. En este documento, el operador del equipo hace un listado de observaciones o desperfectos detectados durante la operación y que deben ser atendidas por los mantenedores al momento de la ejecución.

Por su parte, la Pauta de Inspección Diaria se divide en las partes del equipo a chequear. Se dedica especial atención a la verificación del desgaste de dientes del balde “Gets”, porque con la operación tienden a deteriorarse y desprenderse, con el riesgo que llegar hasta los chancadores ocasionando problemas en los equipos y afectando la continuidad de la producción.

Tabla N° 4.3. Contenido de la Pauta Diaria.

Tipo de Pauta	Partes del Equipo
Pauta Diaria	Balde
	Sala de Máquinas
	Sistema de Lubricación
	Rodado
	Motores
	Gets

Fuente: Elaboración propia.

La flota de palas eléctricas se compone de 4 palas P&H modelo 4100 XPC. Existen leves diferencias entre ellas debido a que fueron adquiridas en distintos años, por lo tanto las Pautas de Mantenimiento se diseñan en función de esas diferencias. Es así como se distinguen dos grupos, las palas 01, 02 y 03 (adquiridas en 2018) son atendidas con un set de Pautas de Mantenimiento en común, mientras que la pala 07 (adquirida en 2021) es atendida con un set individualizado.

Producto del análisis de las Pautas de Mantenimiento y del “work-pack” asociado a su ejecución, se evidenció que no existía una secuencia establecida de las actividades a ejecutar ni un estándar detallado de sus tiempos de ejecución. Un análisis más profundo evidenció que en las Pautas de Mantenimiento existe duplicidad de actividades y tareas mal clasificadas (por ejemplo actividades de lubricación escritas en la sección eléctrica). Todo ello suma precedentes clave para la realización del plan de Mantenimiento Preventivo.

4.7 Programación de pautas de mantenimiento

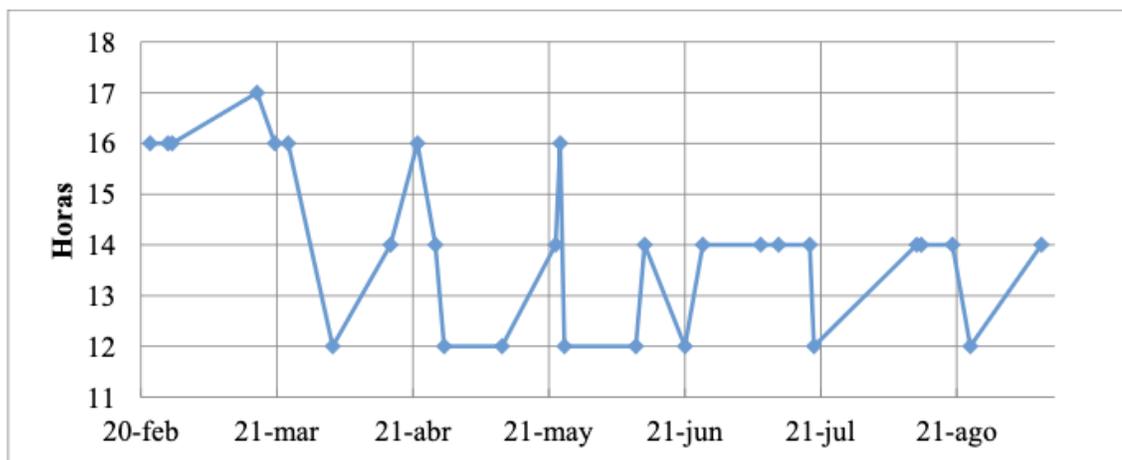
Siguiendo con el proceso de diagnóstico, una vez que ya se han identificado los aspectos principales de la estrategia de mantenimiento y que se han caracterizado las Pautas de Mantenimiento, se analiza la programación de los trabajos. Pues para lograr los resultados

esperados de los planes de mantenimiento preventivo se debe hacer una programación efectiva de los mismos.

Se revisaron los programas semanales presentes en los registros computacionales de la empresa, específicamente los programas comprendidos entre los meses de febrero y septiembre de 2022 (no se dispone de registros anteriores).

Respecto de la programación de los Pasos, se evidenció que los tiempos asignados no siguen lo establecido por la estrategia de mantenimiento, pues no siempre se programan 14 horas de ejecución (ver Figura N° 4.6).

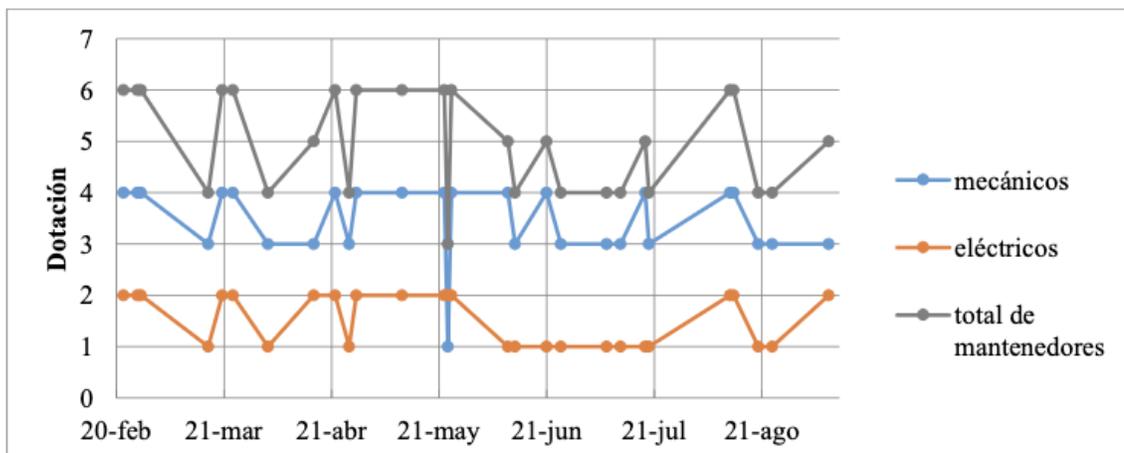
Figura N° 4.6. Tiempo programado para los pasos.



Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, la donación programada para la realización de los Pasos no sigue un estándar en particular. El total de mantenedores oscila entre 3 y 6, el número de mantenedores mecánicos oscila entre 1 y 4, y el número de mantenedores eléctricos oscila entre 1 y 2 (ver Figura N° 4.7).

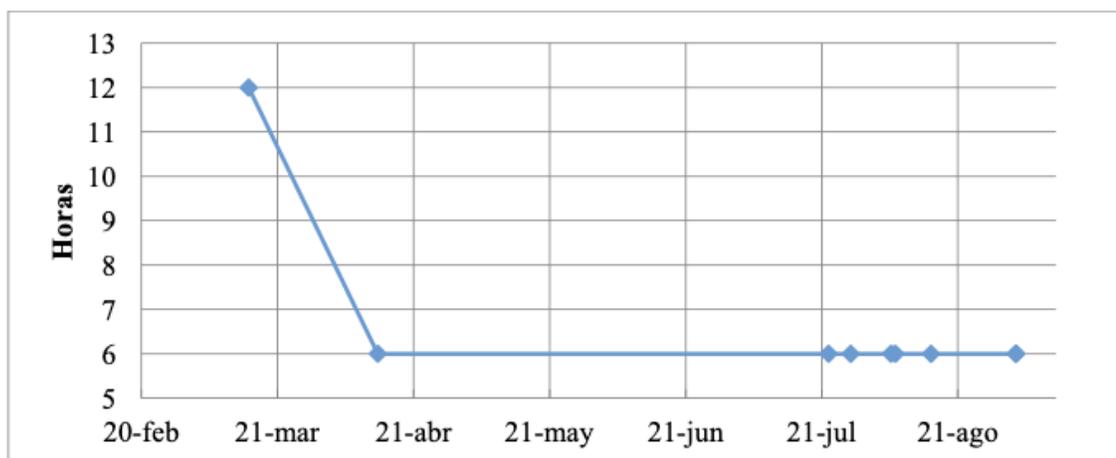
Figura N° 4.7. Dotación de mantenedores para los pasos.



Fuente: Elaboración propia.

Respecto de la programación de la Pauta de 250 (hrs), se evidenció que los tiempos tienden a regirse por lo establecido en la estrategia, con una duración de 6 horas. Pero se detectó una situación aún más preocupante: La Pauta de 250 (hrs) no se programó por un periodo de 3 meses dentro del periodo analizado (ver Figura N° 4.8). Por lo tanto nuevamente no se cumple con los dictámenes de la estrategia de mantenimiento.

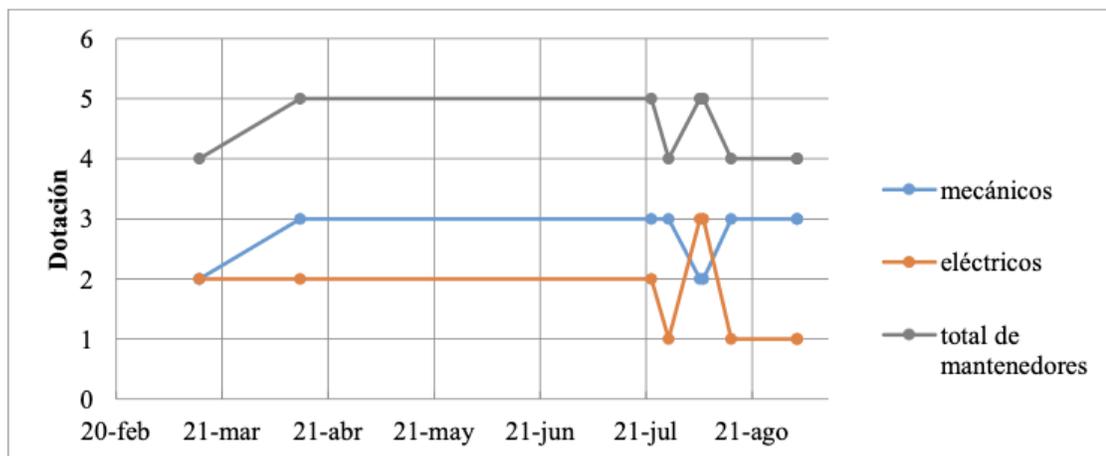
Figura N° 4.8. Tiempo programado para Pauta de 250 (hrs).



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la dotación programada para la Pauta de 250 (hrs) se replica la misma situación. No se sigue un estándar particular, pues el total de mantenedores oscila entre 4 y 5, el número de mantenedores mecánicos oscila entre 2 y 3, y el número de mantenedores eléctricos oscila entre 1 y 3 (ver Figura N° 4.9).

Figura N° 4.9. Dotación de mantenedores para Pauta de 250 (hrs).



Fuente: Elaboración propia.

Minera Caserones ha recocado la importancia que tienen los sistemas de lubricación para el funcionamiento de la pala P&H 4100XPC y en consecuencia se hizo una diferenciación en la especialidad del mantenedor mecánico instaurando la figura del mecánico-lubricador, cargo desempeñado por personal especializado en el tema, con el fin de que los trabajos de lubricación sean realizados con altos niveles de calidad.

Sin embargo, en el proceso de programación de los trabajos no se ha actualizado tal diferenciación, pues se asignan sólo mantenedores mecánicos y mantenedores eléctricos.

Esta situación es corregida durante el proceso de Asignación de la fuerza laboral por parte de los Jefes de Turno. Pues el mantenedor lubricador es quien debe ejecutar la Pauta de Lubricación presente en los Paso y Pauta de 250 (hrs) (ver Tabla N° 4.2).

4.8 Ejecución de pautas de mantenimiento

La ejecución de los trabajos por parte de los mantenedores es clave para lograr la mantenibilidad esperada junto a los efectos en disponibilidad y performance de los equipos. La responsabilidad y calidad en la ejecución permiten devolver el equipo en los plazos acordados con operaciones para así cumplir con los estándares de producción.

Se realizaron 10 visitas a terreno para presenciar la ejecución de las actividades de mantenimiento preventivo y se evidenciaron diversas situaciones de interés:

- No suele haber concordancia entre las dotaciones señaladas en el programa semanal respecto a las dotaciones asignadas por el Jefe de turno, en la práctica se tiende a asignar un mantenedor extra para cada uno de los Pasos programados.
- En dos de las cinco visitas el personal mantenedor no logró ejecutar la totalidad de las actividades de mantenimiento en el tiempo dispuesto para ello (Pasos 2 y 4).
- Se comprobó que no existe una secuencia establecida para la ejecución de las actividades contenidas en las Pautas de Mantenimiento, cada mantenedor realiza las actividades en el orden que mejor le parezca.
- No se ha establecido el “time on tool” para las pautas por especialidad, sólo se ha establecido el tiempo total de ejecución de las Pauta de Mantenimiento (ver Tabla N° 4.1).

La falta de un estándar en este aspecto dificulta el control de avance de los trabajos en terreno conforme se acerca el momento de devolución del equipo a operaciones. Dicho control es realizado por la figura del líder de mantenimiento, éste representa el nexo entre el jefe de turno y los mantenedores. El líder coordina el trabajo del equipo mantenedor y gestiona soluciones a los eventuales problemas que suceden durante la ejecución, tal como retrasos en la llegada de recursos al lugar de los trabajos (ya sea equipos de apoyo, repuestos, personal, etc); su rol es fundamental para el cumplimiento del programa diario.

Sin embargo, Minera Caserones no ha definido claramente las funciones, responsabilidades y atribuciones del líder, en consecuencia los 4 líderes de mantenimiento correspondientes a los 4 turnos de realizan trabajos distintos (p. ej: Unos trabajan mayoritariamente en terreno y otros mayoritariamente en oficina).

En base a las Pautas de Mantenimiento y tras un trabajo colaborativo con el personal:

- Se establecen las dotaciones para la Pauta de 250 (hrs) y para cada uno de los 4 Pasos, haciendo una clara diferenciación de los mantenedores según su especialidad ya sea lubricador, eléctrico o mecánico.
- Se determinan los tiempos de ejecución de las pautas por especialidad y con ello los tiempos ejecución total de las Pautas de Mantenimiento.

Debido a que el equipo a mantener es de gran envergadura, se torna necesario contar con un ordenamiento de actividades que sea capaz de minimizar los desplazamientos del personal y de recursos físicos durante la ejecución de las Pautas. En ese sentido:

- Se establece una secuencia para el desarrollo de las tareas contemplando criterios espaciales, es decir, se busca la eficiencia en los desplazamientos del personal mantenedor al interior y alrededor del equipo.
- Además se aplican criterios funcionales, que buscan la efectividad del trabajo estableciendo un orden lógico a las actividades (p. ej: La desenergización del equipo debe hacerse antes de intervenir los motores eléctricos).
- Se identifican los equipos de apoyo (EE.AA) necesarios para la ejecución de los Pasos y Pauta de 250 (hrs), luego se ordenan las actividades de tal manera que se evita que dos actividades requieran usar el mismo EE.AA de forma simultánea.

Los puntos antes mencionados se resumen en las tablas presentadas a continuación, son el primer paso para el establecer el estándar para las Pautas de Mantenimiento Preventivo.

Adicionalmente se contrasta la información contenida en las tablas con lo estipulado por la Estrategia de Mantenimiento respecto a los tiempos de detención de equipo, si no existe cumplimiento del estándar propuesto se deberá profundizar en la búsqueda de soluciones.

Tabla N° 4.4. Dotaciones y tiempo de ejecución para las pautas por especialidad – Pauta de 250 (hrs).

Tipo de Pauta de Mantenimiento	Pauta por especialidad	Duración (min)	Dotaciones
Pauta de 250 (hrs)	P. Dinámica	50	1 eléc - 1 mec - 1 lubr
	P. de Lubricación	150	1 lubricador
	P. Estructural	50	1 mecánico
	P. Eléctrica	250	1 eléctrico
Total		300	1 eléc - 1 mec - 1 lubr

Fuente: Elaboración propia.

Tras la determinación de donación de mantenedores y con el ordenamiento de actividades de la Pauta de 250 (hrs), se establece un tiempo total de trabajo de 5 (horas) y 3 mantenedores de las especialidades eléctrica, mecánica y lubricación; tal como puede advertirse en la Tabla N° 4.4. Es posible contar con 1 (hora) para actividades indirectas de mantenimiento como almuerzo y cambio de turno.

La Estrategia de Mantenimiento de la pala eléctrica P&H 4100XPC establece que la Pauta de 250 (hrs) se ejecute en un tiempo total de 6 (horas), por lo tanto, se estaría cumpliendo con lo estipulado por la Estrategia.

Tabla N° 4.5. Dotaciones y tiempo de ejecución para las pautas por especialidad – Pasos 1 y 3.

Tipo de Pauta de Mantenimiento	Pauta por especialidad	Duración (min)	Dotaciones
Paso 1 - Paso 3	P. Dinámica	60	2 eléc - 1 mec - 1 lubr
	P. de Lubricación	540	2 lubricadores
	P. Mecánica	540	2 mecánicos
	P. Estructural	400	1 mecánico
	P. Eléctrica	700	2 eléctricos
	Pruebas finales de entrega	20	Operador
Total		780	2 eléc - 3 mec - 2 lubr

Fuente: Elaboración propia.

Debido a la similitud que presenta el Paso 1 y el Paso 3, ambos son representados en una misma tabla resumen (Tabla N° 4.5).

El ordenamiento de actividades propone la realización de la Pauta Dinámica antes que el resto, pues requiere del equipo energizado para su ejecución. Una vez finalizada se procede a la desenergización del equipo y la propuesta señala la ejecución de todas las pautas por especialidad en forma paralela, con el fin de aprovechar al máximo el tiempo de detención de equipo para finalmente, y antes de la devolución del equipo, ejecutar Pruebas finales de entrega por parte del operador.

En resumen, los Pasos 1 y Paso 3 requieren de un tiempo de ejecución total de 13 (horas). Con ello se cumple con lo estipulado en la Estrategia e incluso se deja un margen de 1 (hora) para la realización de actividades indirectas como almuerzo o cambio de turno.

Tabla N° 4.6. Dotaciones y tiempos de ejecución para las pautas por especialidad – Pasos 2 y 4.

Tipo de Pauta de Mantenimiento	Pauta por especialidad	Duración (min)	Dotaciones
Paso 2 - Paso 4	P. Dinámica	40	2 eléc - 1 mec - 1 lubr
	P. de Lubricación	600	2 lubricadores
	P. Mecánica	820	4 mecánicos

	P. Estructural	400	1 mecánico
	P. Eléctrica	720	2 eléctricos
	Pruebas finales de entrega	20	Operador
	Total	880	2 eléc - 4 mec - 2 lubr

Para el Paso 2 y Paso 4 se propone el mismo sistema, es decir, la ejecución previa de la Pauta Dinámica, la realización de las pautas por especialidad en forma paralela, y la finalización con las Pruebas finales de entrega (más detalles en Anexo B: Tiempos de ejecución Pautas de Mantenimiento).

En total, el tiempo de ejecución para los Pasos 2 y Paso 4 es de 14 (horas) 40 (minutos). Excediendo ampliamente el tiempo estipulado por la Estrategia de Mantenimiento, por 40 (minutos) y no dejando espacio para actividades indirectas de mantenimiento como evacuación de mina por tronadura, almuerzo o cambio de turno.

Debido a que el Paso 2 y el Paso 4 exceden los tiempos de detención de equipo estipulados por la Estrategia de Mantenimiento, se profundiza en la búsqueda de alternativas para optimizar el trabajo y rebajar los tiempos de ejecución.

4.9 Optimización del Paso 2 y Paso 4

Dentro de la estructura organizativa de Gestión del Mantenimiento Mina está el equipo de Inspectores de Flota. Es un equipo compuesto por especialistas de distintas áreas quienes desarrollan inspecciones en terreno y hacen los análisis de fallas de los sistemas comprometidos, además se encargan del diseño de planes correctivos para su tratamiento.

Los Inspectores de flota manejan una serie de pautas de inspección, que son ejecutadas por ellos en función de su especialidad y de manera simultánea a las Pautas de Mantenimiento antes mencionadas: Pasos y Pauta de 250 (hrs) que son ejecutadas por los mantenedores.

Se analiza el contenido de las pautas de inspección y se contrastan las actividades contenidas con las actividades de las Pautas de Mantenimiento. Producto de esta comparación, se determinó que la “Pauta de Inspección Estructural” es bastante similar a la

desarrollada por los mantenedores en los Pasos 2 y 4. Con alrededor de un 30% de actividades repetidas.

Esta situación es presentada al Ingeniero de Mantenimiento (Jefe de los Inspectores de Flota) y al Ingeniero de Confiabilidad de Carguío; y se determina que no existe motivo para la realización de actividades duplicadas, por lo tanto, se procede a la eliminación de actividades duplicadas. El proceso es asistido por los Inspectores de Flota de especialidad estructural; donde el criterio que dirime en cuál de las dos pautas debe permanecer una actividad duplicada es: Si la actividad requiere conocimientos profundos en el tema estructural entonces permanece en la pauta de los Inspectores, en caso contrario la actividad permanece en la Pauta de Mantenimiento desarrollada por los Mantenedores.

En forma simultánea se hace un estudio de tiempos utilizando la herramienta del Critical Path Method – CPM. Se identifica la ruta crítica para el Paso 2 y Paso 4, esta corresponde a la Pauta Mecánica y por lo tanto, una optimización de la ruta crítica significaría la optimización general del Paso. En ese sentido, la reducción de actividades de la Pauta Estructural permite que un mantenedor mecánico se desocupe prematuramente de sus labores, quedando disponible para apoyar la ejecución de la Pauta Mecánica. Con tal modificación se logra reducir el tiempo total de ejecución de los Paso 2 y Paso 4 a una duración total de 13 (horas).

Para mayores detalles sobre la optimización de los Pasos mediante el uso de la herramienta CPM, ver Anexo B: Tiempos de ejecución Pautas de Mantenimiento.

Finalmente, el Plan de Mantenimiento Preventivo permite que todos los Pasos y la Pauta de 250 (hrs) puedan cumplir con los tiempos estipulados por la Estrategia de Mantenimiento, e incluso disponiendo en cada caso con 1 (hora) para la realización de actividades indirectas de mantenimiento como almuerzo o cambio de turno.

4.10 Nuevo formato en las Pautas de Mantenimiento

Las pautas de mantenimiento vigentes presentan las actividades a realizar de manera desordenada, por ejemplo existe una actividad a realizarse en las orugas (en el sistema de tracción, ubicado en la parte baja del equipo) y la actividad señalada a continuación es en la sala del operador (en la parte alta del equipo), lo cual supone un desplazamiento considerable del personal y de herramientas sobre todo cuando no existe una relación directa entre las actividades. Por otra parte, en las pautas no se señalan las dotaciones de mantenedores requeridos para la ejecución de cada pauta por especialidad.

Ante esta deficiencia, la propuesta influye en el diseño de las pautas de mantenimiento, se ordenan las actividades de las pautas según la secuencia propuesta para la ejecución eficiente y efectiva de sus actividades; además en el encabezado de cada pauta por especialidad se indica la dotación específica de mantenedores para la realización de las actividades y, en los casos que corresponda, se señalan los EE.AA. necesarios para la actividad que lo requiera.

Con las modificaciones en el diseño de las pautas, el Líder de mantenimiento puede hacer un control más efectivo del avance de los trabajos en terreno, pues a partir del porcentaje de avance de cada “checklist” se puede saber fácilmente el porcentaje de avance de la pauta en su totalidad.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Antecedentes generales

En primer lugar, se dio inicio al proceso con un análisis exhaustivo del mantenimiento existente en la empresa, abarcando aspectos administrativos, gerenciales, de mantenimiento y diseño. Después de mantener una conversación detallada con el responsable del área durante varios días y observar minuciosamente el funcionamiento normal de los procesos de producción, se pudo identificar de manera más precisa los procesos y las máquinas críticas de la compañía. Este análisis permitió la posterior elaboración del plan de mantenimiento, que tenía como objetivo abordar los problemas que se estaban experimentando en la pala eléctrica P&H 4100XPC.

Al examinar de cerca el plan de mantenimiento existente, se descubrió que la mayoría de las actividades de mantenimiento se llevaban a cabo únicamente cuando se presentaba una falla, es decir, se seguía un enfoque de mantenimiento correctivo. Este enfoque resultaba rudimentario y poco eficiente en la obtención de resultados productivos y soluciones a largo plazo. La implementación de este enfoque de mantenimiento era la principal causa de los diversos problemas e inconvenientes que afectaban significativamente la eficiencia operativa de la pala eléctrica P&H 4100XPC.

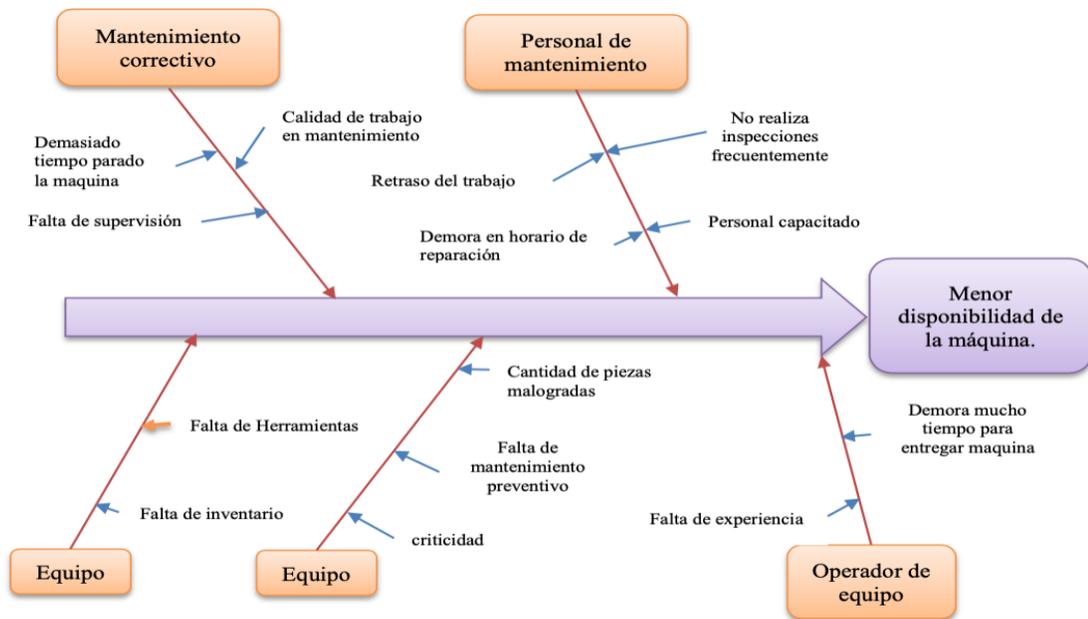
El objetivo principal de este Plan de Mantenimiento Preventivo es incrementar la disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC a un nivel de entre el 90% y el 95%. Esto se logrará mediante la aplicación del plan de mantenimiento propuesto, con la finalidad de evitar que el equipo se detenga debido a problemas de mantenimiento, ya que esto tiene un impacto negativo en los resultados de producción. Actualmente, no se lleva a cabo un seguimiento adecuado en el departamento en este sentido, pero se reconoce que el paro de un equipo debido a la falta de mantenimiento tiene implicaciones económicas significativas. Estos son los aspectos en los que se centrará y analizará con mayor énfasis a lo largo del proyecto de tesis.

5.2 Análisis de los Resultados

5.2.1 Diagrama de Causa y Efecto actual del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo

Se realizó el Diagrama de Causa y Efecto para identificar las posibles causas y sub causas que afectan la disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC, es decir, aquellos factores que causan la indisponibilidad del equipo que se muestra a continuación en la Figura N° 5.1.

Figura N° 5.1. Diagrama de causa y efecto actual del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.



Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Identificación de causas mediante datos obtenidos antes del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo

Para la situación actual en la recopilación de datos se extrajo la información durante 7 meses antes de diseñar el Plan de Mantenimiento Preventivo por medio del historial de

fallas de la pala eléctrica P&H 4100XPC en los años 2021 y 2022 proporcionado por la empresa.

Luego de obtener la información necesaria por medio de la compañía minera se realizó la siguiente Tabla N° 5.1 en donde podemos señalar las distintas causas de la indisponibilidad del equipo, visto que no solo son problemas mecánicos si no también intervienen el factor humano para que el equipo este mucho tiempo parado sin operar.

Tabla N° 5.1. Datos antes del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.

Meses Año 2021-2022	Tiempo parado del equipo por fallas (Hr) A¹	Tiempo de reparación (Hr) B²	Reparación de falla después de mantenimiento (Hr) C³	Tiempo perdido por falta de repuestos y herramientas (Hr) D⁴
Septiembre	9	15	6	6
Octubre	8	16	5	4
Noviembre	9	15	7	5
Diciembre	7	14	6	3
Enero	9	12	7	6
Febrero	8	12	5	6
Marzo	8	13	4	5
Total	58	97	40	35

Fuente: ERP, minera Caserones.

¹ A: Tiempo parado del equipo por fallas.

² B: Tiempo de reparación del equipo.

³ C: Reparación de falla después del mantenimiento.

⁴ D: Tiempo perdido por falta de repuestos.

5.2.3 Diagrama de Pareto

Con el Diagrama de Pareto se pueden detectar los problemas que tienen más relevancia mediante la aplicación del principio de Pareto (pocos vitales, muchos triviales) que dice que hay muchos problemas sin importancia frente a solo unos graves. Ya que, por lo general, el 80% de los resultados totales se originan en el 20% de los elementos.

Hay veces que es necesario combinar elementos de la mayoría útil en una sola clasificación denominada otros, la cual siempre deberá ser colocada en el extremo derecho. La escala vertical es para la frecuencia o porcentaje. Con los datos de la Tabla N° 5.1, podemos realizar la gráfica que es muy útil al permitir identificar visualmente en una sola revisión tales minorías de características vitales a las que es importante prestar atención y de esta manera utilizar todos los recursos necesarios para llevar a cabo una acción correctiva sin malgastar esfuerzos.

Tabla N° 5.2. Datos para realizar el Diagrama de Pareto antes del Diseño del Plan de Mantenimiento.

Meses Año 2021-2022	Tiempo parado del equipo por fallas (Hr) A⁵	Tiempo de reparación (Hr) B⁶	Reparación de falla después de mantenimiento (Hr) C⁷	Tiempo perdido por falta de repuestos y herramientas (Hr) D⁸
Septiembre	9	15	6	6
Octubre	8	16	5	4
Noviembre	9	15	7	5
Diciembre	7	14	6	3
Enero	9	12	7	6

⁵ A: Tiempo parado del equipo por fallas.

⁶ B: Tiempo de reparación del equipo.

⁷ C: Reparación de fallas después del mantenimiento.

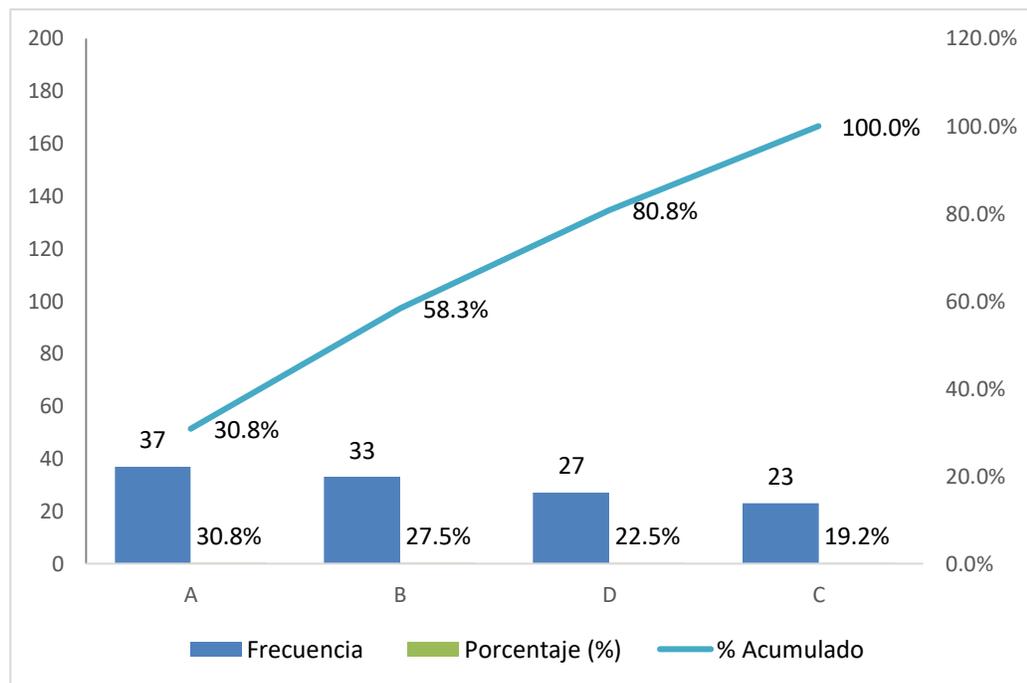
⁸ D: Tiempo perdido por falta de repuestos.

Febrero	8	12	5	6
Marzo	8	13	4	5
Total	58	97	40	35
Porcentaje (%)	25,22%	42,17%	17,39%	15,22%
% Acumulado	25,22%	67,39%	84,78%	100,00%

Fuente: ERP, minera Caserones.

A partir de los datos visualizados en la Tabla N° 5.2 se construye el diagrama de Pareto del Gráfico N° 5.1, teniendo en cuenta los siete primeros meses antes de realizar el diseño del plan de mantenimiento, se llegó a calcular el total del porqué de la indisponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC para luego hallar el porcentaje y el porcentaje acumulado, para así visualizar que las áreas críticas en donde se debe intervenir con suma urgencia, indicamos que los tiempos de parada de falla y reparación serán representados por A y B y los tiempos de reparación y perdido están representadas por C y D. A continuación, el Gráfico N° 5.1 muestra el diagrama de Pareto respectivo.

Gráfico N° 5.1. Diagrama de Pareto antes del Diseño del Plan de Mantenimiento.



Fuente: Elaboración propia.

5.2.4 Cálculo de las Disponibilidades antes de realizar el Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo

Una vez analizado los datos que se muestran en la Tabla N° 5.1 pasaremos a una evaluación de las disponibilidades en los diferentes meses debido a las fallas existentes, esta tabla nos dará a información necesaria para poder calcular la disponibilidad con el que está trabajando la pala eléctrica P&H 4100XPC, y nos dará información de cuánto tiempo pasan parados los equipos por algún motivo en determinado período. De la teoría calculamos la disponibilidad para cada mes.

Septiembre

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_9 = \frac{250 - (9 + 15 + 6 + 6)}{250} \times 100\%$$

$$D_9 = 85,60\%$$

Octubre

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_{10} = \frac{250 - (8 + 16 + 5 + 4)}{250} \times 100\%$$

$$D_{10} = 86,80\%$$

Noviembre

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_{11} = \frac{250 - (9 + 15 + 7 + 5)}{250} \times 100\%$$

$$D_{11} = 85,60\%$$

Diciembre

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_{12} = \frac{250 - (7 + 14 + 6 + 3)}{250} \times 100\%$$

$$D_{12} = 88,00\%$$

Enero

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_1 = \frac{250 - (9 + 12 + 7 + 6)}{250} \times 100\%$$

$$D_1 = 86,40\%$$

Febrero

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_2 = \frac{250 - (8 + 12 + 5 + 6)}{250} \times 100\%$$

$$D_2 = 87,60\%$$

Marzo

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_3 = \frac{250 - (8 + 13 + 4 + 5)}{250} \times 100\%$$

$$D_3 = 88,00\%$$

5.2.5 Comportamiento de la Disponibilidad antes de realizar los Cambios

A continuación, la Tabla N° 5.3 podemos visualizar la disponibilidad calculada durante los 7 meses antes de diseñar el plan de mantenimiento preventivo, así como el Target de disponibilidad definido por la empresa minera a donde se quiere llegar para poder afirmar que si se puede mejorar el funcionamiento de la máquina.

Tabla N° 5.3. Disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC antes del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.

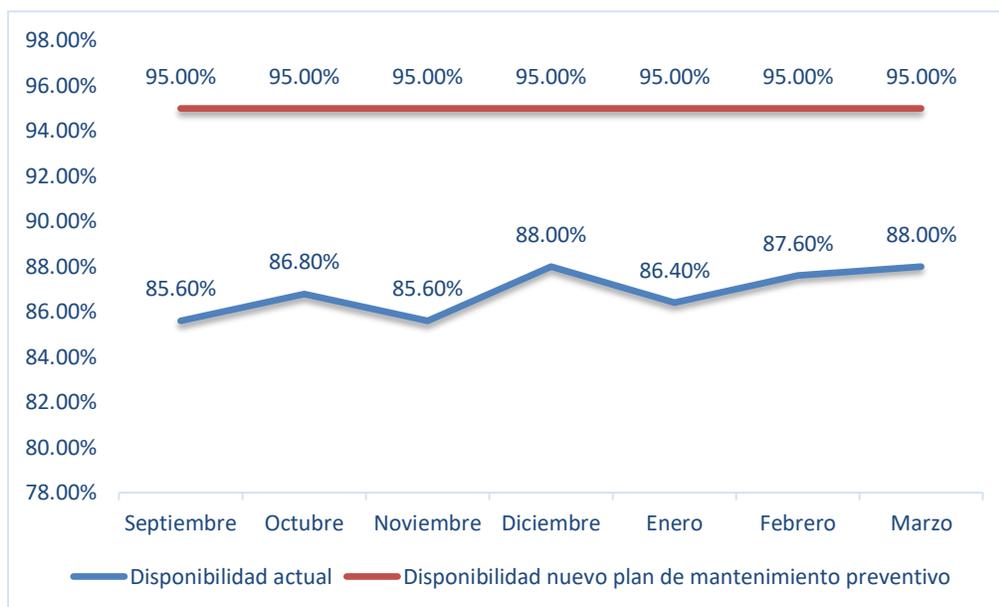
Meses Año 2021-2022	Disponibilidad Actual	Disponibilidad Nuevo Plan de Mantenimiento Preventivo
Septiembre	85,60%	95,00%
Octubre	86,80%	95,00%
Noviembre	85,60%	95,00%
Diciembre	88,00%	95,00%
Enero	86,40%	95,00%
Febrero	87,60%	95,00%
Marzo	88,00%	95,00%

Fuente: Elaboración Propia.

Antes de proponer el diseño del plan de mantenimiento preventivo las disponibilidades calculadas durante los siete meses están muy por debajo de la disponibilidad planteada como Target para ver si se llega a mejorar la disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC que se muestran en el Gráfico N° 5.2 donde se nota que si existe una indisponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC por que el intervalo de disponibilidad está muy por debajo de lo que tal vez se requiere para su optima operación.

A continuación, el Gráfico N° 5.2 se llega a deducir que la pala eléctrica P&H 4100XPC está funcionando muy por debajo de su capacidad real con el que debe operar y para el cual fue diseñado, esto generalmente se debe a las fallas no contempladas por que no se cuenta con un plan de mantenimiento adecuado para este equipo.

Gráfico N° 5.2. Disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC antes del Plan de Mantenimiento.

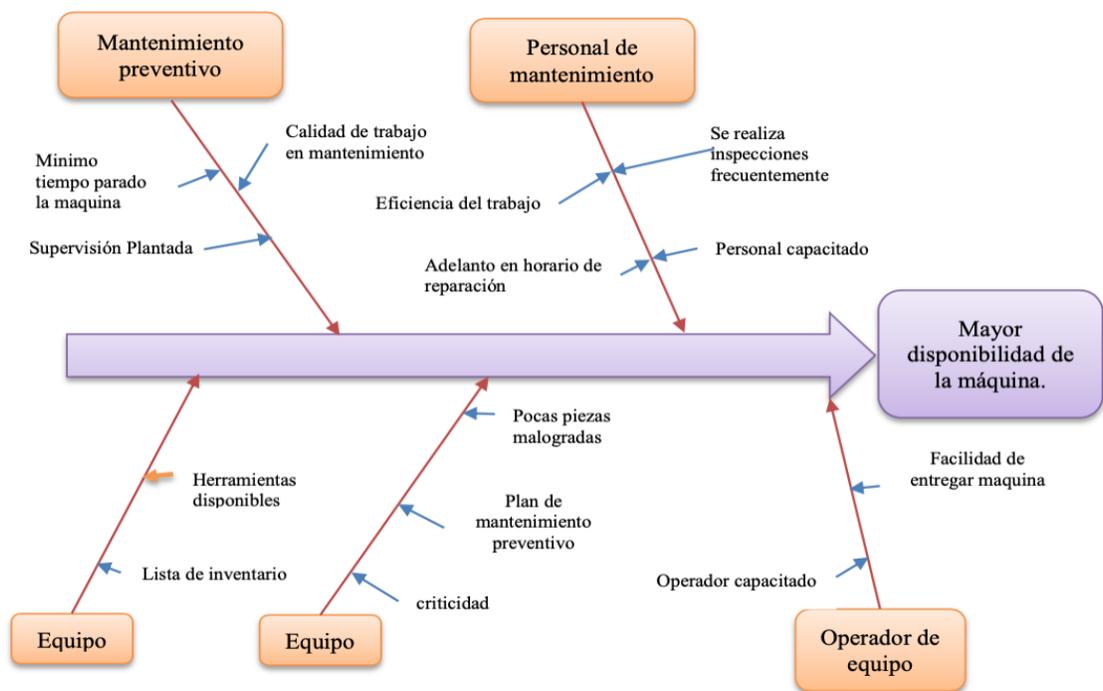


Fuente: Elaboración Propia.

5.2.6 Diagrama de Causa y Efecto después del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo

Se realizó el diagrama de Causa y Efecto en la Figura N° 5.2 para poder identificar las causas que afectan para tener mayor disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC.

Figura N° 5.2. Diagrama de Causa y Efecto después del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.



Fuente: Elaboración Propia.

5.2.7 Identificación de causas mediante datos obtenidos después del Diseño del Plan de Mantenimiento

Los datos mostrados en la Tabla N° 5.4 corresponden a valores tomados después de haber diseñado el plan de mantenimiento preventivo para la pala eléctrica P&H 4100XPC de acuerdo al informe obtenido de parte de la Compañía Minera Caserones.

En este cuadro se puede apreciar en cuanto influye el mantenimiento preventivo y cuanto se puede mejorar la indisponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC., también se encuentra una mejora más que evidente en el factor humano, estos datos serán una base fundamental para poder calcular si hay una mejora adecuada y proporcional de la disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC mediante el diseño de un Plan de Mantenimiento Preventivo.

Tabla N° 5.4. Datos después del diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.

Meses Año 2022	Tiempo parado del equipo por fallas (Hr) A	Tiempo de reparación (Hr) B	Reparación de falla después de mantenimiento (Hr) C	Tiempo perdido por falta de repuestos y herramientas (Hr) D
Abril	6	5	3	4
Mayo	5	6	4	6
Junio	6	4	3	3
Julio	4	4	5	4
Agosto	6	5	4	4
Septiembre	5	4	2	3
Octubre	5	5	2	3
Total	37	33	23	27

Fuente: ERP, minera Caserones.

5.2.8 Diagrama de Pareto después de realizar los Cambios

La Tabla N° 5.5 nos muestra los datos obtenidos una vez aplicado el plan de mantenimiento realizado durante siete meses, en donde se puede apreciar que si existe un cambio significativo de resultados en comparación a la Tabla N° 5.3, en donde se identificó causas que al identificarlas buscamos la manera de mejorarlas, evaluando los resultados de los cambios efectuados.

Con estos datos obtenidos mediante el formato de mantenimiento que fue una recopilación por el personal técnico calificado de la empresa.

Tabla N° 5.5. Datos para realizar el diagrama de Pareto después del diseño del Plan de Mantenimiento.

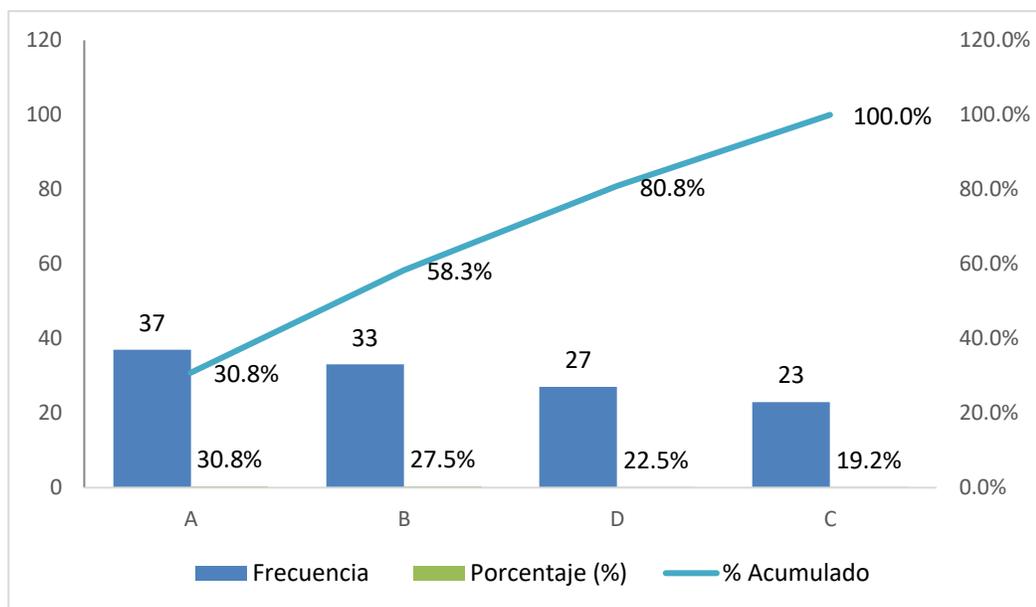
Meses Año 2022	Tiempo parado del equipo por fallas (Hr) A	Tiempo de reparación (Hr) B	Reparación de falla después de mantenimiento (Hr) C	Tiempo perdido por falta de repuestos y herramientas (Hr) D
Abril	6	5	3	4
Mayo	5	6	4	6
Junio	6	4	3	3
Julio	4	4	5	4
Agosto	6	5	4	4
Septiembre	5	4	2	3
Octubre	5	5	2	3
Total	37	33	23	27
Porcentaje (%)	30,83%	27,50%	19,17%	22,50%
% Acumulado	30,83%	58,33%	77,50%	100,00%

Fuente: ERP, minera Caserones.

Una vez obtenidos el total de datos mediante el porcentaje y el porcentaje acumulado podemos graficar el diagrama de Pareto que se muestra en el Gráfico 5.3, se puede apreciar que mediante el diseño del plan de mantenimiento se reduce notablemente el tiempo de reparación de la pala eléctrica P&H 4100XPC cuando ocurre una falla imprevista y que la mayor parte de la indisponibilidad del equipo se debe al tiempo parado cuando ocurre una falla caso que fue todo lo contrario visualizado en el diagrama de Pareto antes de diseñar el plan de mantenimiento, con respecto a la zona que no es crítica se observa que el tiempo

perdido por falta de repuestos y herramientas es mucho mayor a tiempo de reparación cuando ocurre una falla después de haber realizado el mantenimiento.

Gráfico N° 5.3. Diagrama de Pareto después del Diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.



Fuente: Elaboración Propia.

5.2.9 Cálculo de las Disponibilidades después de realizar el diseño del Plan de Mantenimiento

Una vez analizado los datos que se muestran en la Tabla N° 5.5 nos dará la información necesaria para poder calcular a disponibilidad después de haber diseñado el plan de mantenimiento, la tabla nos muestra que existe un cambio sustancial en cuanto a factores que intervienen en la indisponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC.

Esta Tabla N° 5.5 nos dará la información de si se mejora la disponibilidad una vez realizado el Plan de Mantenimiento Preventivo.

De la teoría de la gestión del mantenimiento procedemos a calcular la disponibilidad para cada mes.

Abril

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_4 = \frac{250 - (6 + 5 + 3 + 4)}{250} \times 100\%$$

$$\mathbf{D_4 = 92,80\%}$$

Mayo

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_5 = \frac{250 - (5 + 6 + 4 + 6)}{250} \times 100\%$$

$$\mathbf{D_5 = 91,60\%}$$

Junio

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_6 = \frac{250 - (6 + 4 + 3 + 3)}{250} \times 100\%$$

$$\mathbf{D_6 = 93,60\%}$$

Julio

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_7 = \frac{250 - (4 + 4 + 5 + 4)}{250} \times 100\%$$

$$D_7 = 93,20\%$$

Agosto

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_8 = \frac{250 - (6 + 5 + 4 + 4)}{250} \times 100\%$$

$$D_8 = 92,40\%$$

Septiembre

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_9 = \frac{250 - (5 + 4 + 2 + 3)}{250} \times 100\%$$

$$D_9 = 94,40\%$$

Octubre

Cálculo de la Disponibilidad:

$$D_{10} = \frac{250 - (5 + 5 + 2 + 3)}{250} \times 100\%$$

$$D_{10} = 94,00\%$$

5.2.10 Comportamiento de la disponibilidad después de realizar los Cambios

A continuación, la Tabla N° 5.6 muestra las disponibilidades calculadas durante los 7 meses después de haber diseñado el Plan de Mantenimiento Preventivo, también se

muestra el Target de la disponibilidad a donde se quiere llegar para poder mejorar el funcionamiento de la pala eléctrica P&H 4100XPC por parte de Compañía Minera Caserones.

Tabla N° 5.6. Disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC después del diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo.

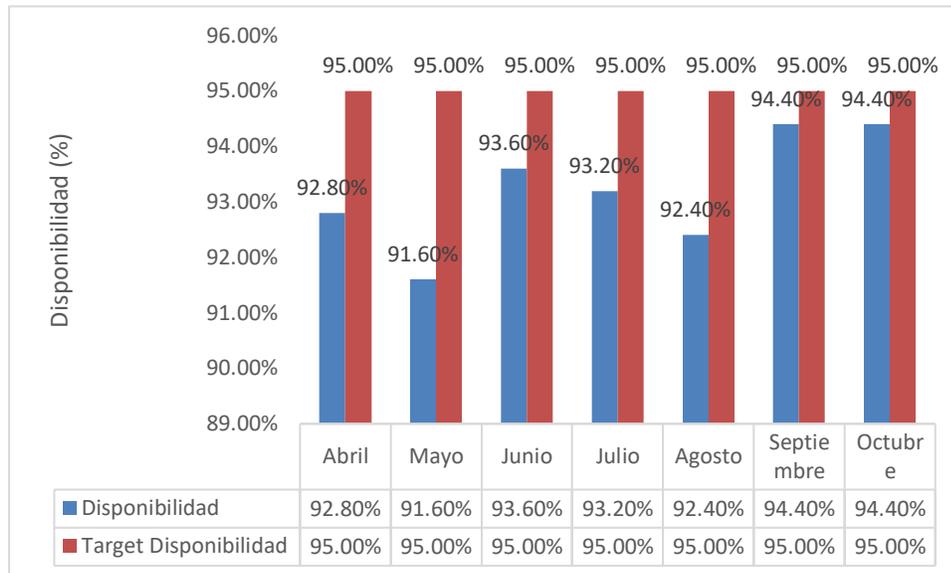
Meses Año 2022	Disponibilidad	Target de Disponibilidad
Abril	92,80%	95,00%
Mayo	91,60%	95,00%
Junio	93,60%	95,00%
Julio	93,20%	95,00%
Agosto	92,40%	95,00%
Septiembre	94,40%	95,00%
Octubre	94,40%	95,00%

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez diseñado el plan de mantenimiento acerca de las disponibilidades calculadas que se muestran en el Gráfico N° 5.4 se nota claramente que hay cambios significativos con relación al Gráfico N° 5.3, con estos cálculos podemos apreciar que la disponibilidad ahora supera a la meta de disponibilidad trazada en un inicio, comprobando que si se reduce los tiempos en donde existían las fallas una vez diseñado el plan de mantenimiento.

La disponibilidad mecánica calculada es igual o mayor a la disponibilidad propuesta reafirmando que si funciona el Plan de Mantenimiento Preventivo con relación a un plan de mantenimiento que es plenamente correctivo, dado al inicio.

Gráfico N° 5.4. Disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC después del Plan de Mantenimiento.



Fuente: Elaboración Propia.

5.3 Análisis estadístico de resultados

Para el estadístico final se elaboró la siguiente Tabla N° 5.7 que indica la disponibilidad actual y después de la implementación del Plan de Mantenimiento Preventivo.

Tabla N° 5.7. Comparación de Disponibilidades.

Meses Año 2022	Disponibilidad actual del plan de mantenimiento	Disponibilidad después del plan de mantenimiento
Abril	85,60%	92,80%
Mayo	86,80%	91,60%
Junio	85,60%	93,60%
Julio	88,00%	93,20%
Agosto	86,40%	92,40%

Septiembre	87,60%	94,40%
Octubre	88,00%	94,40%

Fuente: Elaboración Propia.

Dicha tabla muestra las disponibilidades actuales y la nueva producto de la realización del Plan de Mantenimiento Preventivo.

A continuación, el Gráfico N° 5.5 realiza un análisis comparativo de las disponibilidades actual y después de la implementación del Plan de Mantenimiento Preventivo para la pala eléctrica P&H 4100XPC.

Gráfico N° 5.5. Disponibilidad Actual y Nueva de la pala eléctrica P&H 4100XPC.



Fuente: Elaboración Propia.

Podemos observar, que en el Gráfico N° 5.5 la disponibilidad una vez implementado el plan de mantenimiento aumenta y llega al target definido por la empresa correspondiente a un 95% y en los meses de abril, junio, julio, agosto, septiembre y octubre llega a un promedio de un 93,5%, lo que se traduce en beneficios para la compañía

producto de una mayor utilización del equipo, mayores frecuencias de mantenimiento y gestión por parte de la compañía.

5.4 Diseño del nuevo Plan de Mantenimiento Preventivo

Según lo realizado en el diagrama de Ishikawa Figura N° 5.2, a continuación, se describe el nuevo Plan de Mantenimiento Preventivo de acuerdo a las causas identificadas y el efecto del aumento de la disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC, llegando al Target de un 95% establecido por Compañía Minera Caserones.

A. Causa N° 1: Mantenimiento Preventivo

- Se establecen reuniones semanales con la finalidad de alinear el trabajo con la gestión del mantenimiento de la compañía Minera Caserones.
- La calidad del trabajo se supervisa a través del jefe de turno y supervisor del área de mantenimiento.
- El tiempo de parada del equipo tiende a cero, dado el nuevo plan de mantenimiento que aumenta la disponibilidad del equipo según el Target de un 95% establecido por compañía minera.

B. Causa N° 2: Personal de Mantenimiento

- Las inspecciones de la pala eléctrica P&H 4100XPC. se realizarán de manera diaria y semanal, con la finalidad de establecer la cultura de trabajo con foco en la gestión de activos.
- Se capacitará al personal de mantenimiento con la nueva estrategia de mantenimiento preventivo, dicha capacitación será de manera mensual y en forma conjunta con el supervisor y jefe de turno respectivo.

- Las reparaciones al equipo serán de manera programada, ya que con la nueva estrategia de mantenimiento preventiva se lleva un control más exhaustivo, por lo que elimina la estrategia de mantenimiento correctivo que trabaja a la falla actualmente.
- La eficiencia del trabajo elimina altos costos y reduce los tiempos de reparación de la pala eléctrica P&H 4100XPC.

C. Causa N° 3: Equipo

- Se llevará la gestión de inventarios de los diversos repuestos que necesita la pala eléctrica P&H 4100XPC, cosa de no tener tiempos muertos y paradas de producción por la indisponibilidad de estos, ya que se traduce en costo para la compañía.
- Las herramientas para hacer el trabajo permiten diseñar diversas metodologías de un trabajo colaborativo.
- Realizar de manera semanal el análisis de criticidad de los componentes que conforman la pala eléctrica P&H 4100XPC., con la finalidad de desarrollar los planes de mantenimiento y gestión de inventarios de los repuestos del equipo.

D. Causa N° 4: Operador de Equipo

- Capacitar a los diversos operarios de la pala eléctrica P&H 4100XPC., para tener un uso correcto del mismo, lo anterior, alineado a la estrategia de mantenimiento preventivo, a fin de lograr el target de un 95% establecido.

- Al momento de hacer entrega de la máquina contar con un check list para que el operario conozca en qué estado se encuentra y en caso de contar con algún inconveniente avisar a su jefatura directa.

El diseño del nuevo plan de mantenimiento preventivo se construyó en función de las causas identificadas en el diagrama de Ishikawa de la Figura N° 5.2, el cual tiene efecto en una mayor disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC, y sienta las bases de una estrategia de mantenimiento preventivo en Compañía Minera Caserones, con foco en la reducción de los costos asociados a la gestión del mantenimiento y un aumento de los beneficios.

5.5 Estimación de las consecuencias

La estimación de las consecuencias permite dimensionar el impacto que traería la implementación del Plan de Mantenimiento Preventivo, representando un “input” importante para el proceso de toma de decisiones. Si la propuesta avizora resultados favorables desde los puntos de vista económico y no-económico entonces es más probable que la organización apruebe su realización e implementación.

5.5.1 Consecuencias económicas

Las consecuencias económicas de la implementación del Plan de Mantenimiento Preventivo dicen relación con la disminución de detención de equipo, ya que una devolución anticipada del equipo a operaciones otorga la posibilidad de operar más tiempo y generar más ingresos.

Sin embargo, resulta particularmente difícil hacer una correcta estimación del tiempo de detención de equipo asociado a la ejecución de las Pautas de Mantenimiento Preventivo. Pues la ejecución de las Pautas de Mantenimiento va acompañada de una serie de “backlogs”; donde el reporte de los tiempos de trabajo no especifica cuanto tiempo tomó la ejecución de las Pautas y cuánto tomó la ejecución de los “backlogs” sino que se reporta por el tiempo total.

A pesar de ello, el beneficio económico es calculado a partir de la disminución de 2 (horas) de detención de equipo producto de la optimización de los Pasos 2 y Paso 4; bajo el supuesto de que efectivamente ese tiempo extra es utilizado por el área de operaciones para producir.

En promedio, las palas P&H 4100 XPC son sometidas a la realización de un Paso cada 500 (hrs) de operación lo que lleva a la ejecución de un Paso al mes, situación comprobada en los registros de la empresa y esquematizada en la Tabla N° 5.8.

Tabla N° 5.8. Realización de Pasos en el tiempo.

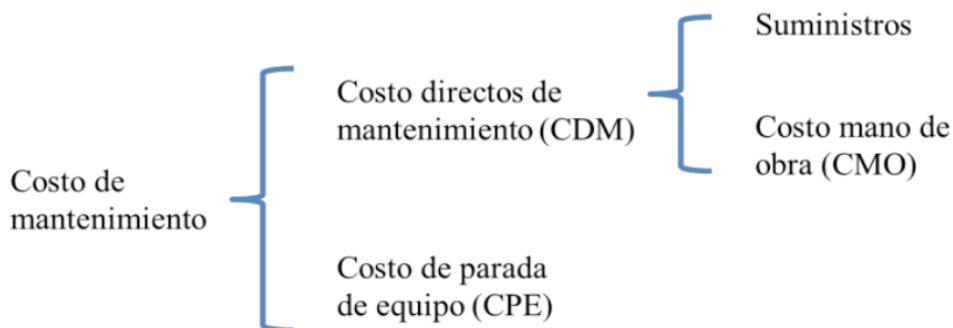
Paso #	1	<u>2</u>	2	<u>4</u>	1	<u>2</u>	3	<u>4</u>	1	2	3	<u>4</u>
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic

Fuente: Elaboración propia.

Se han subrayado los Pasos 2 y 4, éstos se ejecutan 6 veces al año por equipo y 24 veces considerando toda la flota. Lo cual significaría 48 (hrs) anuales extra de producción de la flota.

Los costos de ejecución del mantenimiento siguen el siguiente esquema que se muestra a continuación en la Figura N° 5.3 [5]:

Figura N° 5.3. Esquema de costos de mantención.



Fuente: Sena – Fedemetal, 1991.

5.5.1.1 Costos directos de mantenimiento (CDM)

Los costos directos de mantenimiento se definen como el valor del conjunto de bienes y servicios que se consumen para llevar a cabo una tarea de mantenimiento, se componen por los costos por suministros y los costos de mano de obra.

A partir de la estandarización en las dotaciones de las Pautas de Mantenimiento se compara la situación actual versus la recomendada, ver Tabla N° 5.9. Si bien la dotación recomendada contempla mano de obra adicional, los turnos actuales compuestos por 12 mantenedores pueden absorber la carga de trabajo. Por lo tanto tampoco haría cambios en el costo de la mano de obra (CMO).

Tabla N° 5.9. Comparación de dotaciones para la ejecución de Pautas de Mantenimiento.

Tipo de Pauta	Dotación actual (promedio)	Dotación recomendada
Paso 1 – Paso 3	6*	7
Paso 2 – Paso 4	6*	8
Pauta de 250 (hrs)	4,4	3

Fuente: Elaboración propia.

* Los programas semanales indican 5 mantenedores promedio, pero en la asignación se suele añadir un mantenedor.

5.5.1.2 Costos de parada de equipo (CPE)

Corresponde a los ingresos que la empresa deja de percibir como consecuencia de la detención del equipo para su mantenimiento. El cálculo del CPE se basa en los datos aportados por Minera Caserones el segundo semestre del 2022.

Datos:

- Rendimiento efectivo promedio de las palas eléctricas P&H 4100XPC es de 1.696 [ton/hr] y corresponde al tonelaje total de material cargado en una hora (considerando lastre y mineral).

- Relación lastre/mineral: 3,281 quiere decir que para producir una tonelada de mineral se deben cargar 3,281 toneladas de lastre. A partir de ésta se obtiene la relación “mineral/(lastre + mineral)”: 0,234.
- Ley de Cu: 0,58 [%] es el porcentaje de cobre que encierra una determinada muestra.
- Precio realizado del cobre: 219,2 [¢/lb] es el precio que originó los ingresos en el periodo declarado. Que es el equivalente a 4.832,53[USD/ton] por conversión de unidades.
- Recuperación de cobre en Planta: 86,9% es el porcentaje de cobre producido por la planta concentradora respecto a la cantidad de cobre que llega a stock-pile.

Con todos estos factores se calcula el CPE:

$$1.696 \left[\frac{\text{ton LyM}}{\text{hr}} \right] * 0,234 \left[\frac{\text{ton M}}{\text{ton L y M}} \right] * 0,58 [\%] * 4.832,53 \left[\frac{\text{USD}}{\text{ton M}} \right] * 86,9[\%]$$

$$= 9.666,4 \left[\frac{\text{USD}}{\text{hr}} \right]$$

A partir del CPE se estiman los ingresos que la empresa podría obtener si la flota de palas eléctricas P&H 4100XPC operase durante las 48 horas extra anuales, por concepto de la optimización de los Pasos y la consiguiente devolución anticipada de equipos desde mantenimiento a operaciones.

$$9.666,4 \left[\frac{\text{USD}}{\text{hr}} \right] * 48 \left[\frac{\text{hr}}{\text{año}} \right] = 463.987,2 \left[\frac{\text{USD}}{\text{año}} \right]$$

5.5.2 Consecuencias No - económicas

El Plan de Mantenimiento Preventivo tiene diversas consecuencias positivas. En primer lugar, su objetivo es cumplir con las directrices de la estrategia relacionadas con los

tiempos de detención de los equipos en cada Pauta de Mantenimiento, lo que beneficia la mantenibilidad de la flota de palas eléctricas P&H 4100XPC de manera favorable.

La implementación de un estándar es un paso crucial para garantizar un trabajo coordinado y de alta calidad. Esto permite una ejecución uniforme de las pautas, sin importar el turno en el que se realice la actividad. Además, este enfoque revaloriza la labor de los mantenedores y su importancia en la consecución de resultados clave en el área, como la disponibilidad, la confiabilidad y la mantenibilidad.

El Plan de Mantenimiento Preventivo simplifica el control del trabajo en el terreno, ya que organiza las actividades de las pautas por especialidad. Esto facilita que el líder de mantenimiento supervise el progreso de la Pauta y detecte posibles retrasos en la ejecución. De esta manera, se pueden tomar medidas oportunas para abordar la situación y asegurar que se cumplan los plazos de devolución de los equipos.

Por último, la implementación progresiva del estándar brinda a los mantenedores la oportunidad de hacer críticas constructivas y proponer correcciones al estándar existente, esto fomenta la mejora continua del Plan de Mantenimiento Preventivo y permite aprovechar la experiencia y la iniciativa del personal. En consecuencia, se promueve la colaboración entre las diferentes áreas involucradas en el mantenimiento de los equipos, tanto de forma directa como indirecta.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Tras completar el proyecto de título denominado de diseño de un plan de mantenimiento preventivo integral para la pala eléctrica P&H 4100XPC en colaboración con la Empresa Global Services S.A. en Compañía Minera Caserones, se han extraído conclusiones altamente significativas.

- El análisis detallado del equipo proporcionó un conocimiento exhaustivo de sus componentes clave, características técnicas y requisitos de mantenimiento, estableciendo así una base sólida para una gestión de mantenimiento efectiva.
- La identificación de puntos críticos permitió la priorización de acciones, focalizándose en áreas con un impacto sustancial en el rendimiento general de la máquina.
- La ejecución del plan de mantenimiento preventivo ha generado una mejora notable en la disponibilidad de la pala eléctrica, alcanzando un nivel cercano al objetivo del 95%, lo que se traduce en una reducción significativa del tiempo de inactividad y una mayor eficiencia operativa.
- Además, el análisis de causa y efecto a través del diagrama proporcionó una visión clara de las posibles causas que afectan la disponibilidad, permitiendo una identificación precisa de áreas críticas que requieren atención continua y ajustes en el plan de mantenimiento para garantizar un rendimiento óptimo a largo plazo.
- Este proyecto de título no solo contribuye a la mejora de la disponibilidad de la pala eléctrica, sino que también establece un marco sólido para futuras estrategias de mantenimiento preventivo. Su impacto no solo se limita a la eficiencia operativa, sino que se extiende al compromiso con la sostenibilidad, la reducción

de costos y la maximización de beneficios en el contexto minero. En conjunto, estas conclusiones respaldan la eficacia y la relevancia del plan de mantenimiento preventivo diseñado para la pala eléctrica P&H 4100XPC.

6.2 Recomendaciones

Basado en las conclusiones mencionadas, se proponen las siguientes recomendaciones para la Empresa Global Services S.A. y Compañía Minera Caserones:

1. **Seguimiento Continuo:** Mantener un seguimiento constante de la aplicación del plan de mantenimiento preventivo y la disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC es esencial. Esto garantizará que se mantengan los niveles de disponibilidad alcanzados y se puedan realizar ajustes conforme sea necesario.
2. **Capacitación del Personal:** Proporcionar capacitación adecuada al personal de mantenimiento para asegurar que estén al tanto de las mejores prácticas y procedimientos definidos en el plan de mantenimiento preventivo.
3. **Tecnología de Monitoreo Avanzado:** La implementación de sistemas de monitoreo avanzado, como sensores y análisis de datos en tiempo real, puede proporcionar información crítica sobre el estado de la pala eléctrica. Esto permitirá una detección temprana de problemas y una respuesta más efectiva.
4. **Plan de Contingencia:** Desarrollar un plan de contingencia para hacer frente a situaciones de emergencia y minimizar el tiempo de inactividad en caso de fallas inesperadas en la máquina.
5. **Documentación y Registro:** Mantener un registro detallado de todas las actividades de mantenimiento y sus resultados para facilitar el análisis posterior y la toma de decisiones informadas.

En conjunto, estas recomendaciones ayudarán a mantener y mejorar la disponibilidad de la pala eléctrica P&H 4100XPC, lo que se traducirá en un aumento de la eficiencia operativa y una reducción de los costos asociados a tiempos de inactividad en las operaciones mineras de Compañía Minera Caserones.

BIBLIOGRAFÍA

[1] <https://mining.komatsu/es/product-details/p-h-4100xpc#!overview>.

[2] CODELCO. Procesos productivos - Carguío y transporte [en línea] https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_extraccion_carguioyt.asp.

[3] MINERÍA CHILENA. Palas para rajo abierto: por una producción más eficiente y segura. [en línea] Grupo editorial Editec. 11 de noviembre, 2013 <http://www.mch.cl/informes-tecnicos/palas-para-rajo-abierto-por-una-produccion-mas-eficiente-y-segura>.

[4] GARCÍA Garrido, Santiago. Organización y Gestión Integral de Mantenimiento. 1° ed. Madrid, España. Ediciones Díaz de Santos, 2003. 320 p.

[5] SENA - Servicio Nacional de Aprendizaje, FEDEMÉTAL - Federación Colombiana de Industrias Metálicas. Manual de Mantenimiento. Colombia. Santafé de Bogotá. 1991. 90 p.

ANEXOS

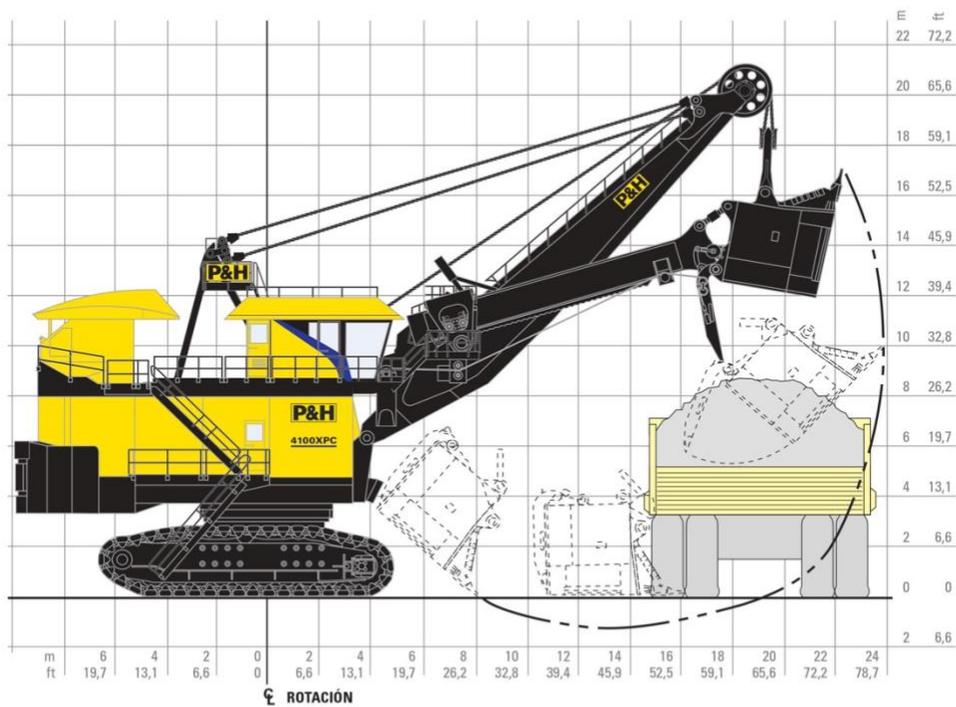
Anexo A: Especificaciones generales de la pala eléctrica P&H 4100XPC

KOMATSU

P&H

4100XPC

Especificaciones generales
de la pala eléctrica de minería



Rangos operacionales

Altura de corte	16,8 m	55 ft 2 in
Radio de corte	23,9 m	78 ft 8 in
Altura de descarga* (puerta abierta)	9,5 m	31 ft
Radio a nivel del suelo	16,0 m	52 ft 6 in
Radio de giro de cola	9,8 m	32 ft 3 in
Nivel visual del operador	10,1 m	33 ft 1 in

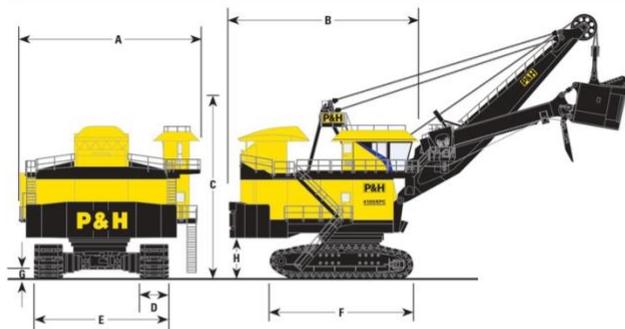
*Se muestra la altura con un balde tipo aro. Las alturas son mayores para los baldes sin aro o compactos. La altura de descarga real puede ser mayor que la altura de la puerta.

Capacidad

Carga útil nominal*	De 99,8 a 108,9 tm	120 tc
Capacidad nominal del balde rasante SAE	De 52,8 a 61,2 m ³	De 69 a 82 yd ³
SAE 2:1	de 58,3 a 67,6 m ³	de 74,4 a 88,4 yd ³
Carga suspendida nominal	195 tm	215 tc
Tamaño óptimo del camión (se muestra camión de 360 tm [400 tc])	De 218 a 363 tm	De 240 a 400 tc

*La capacidad del balde y la carga útil dependen de diversos factores. Comuníquese con Komatsu Mining para analizar su aplicación específica.

2 Pala eléctrica de minería P&H 4100XPC



Dimensiones generales

A Ancho	14,4 m	47 ft 1 in
B Longitud	15,0 m	49 ft 4 in
C Altura sobre pórtico	14,7 m	48 ft 3 in
D Ancho de zapatas	1.930 mm 2.210 mm	76 in 87 in
E Ancho de orugas (76")	10,2 m	33 ft 6 in
F Longitud de orugas	11,7 m	38 ft 6 in
G Distancia al suelo	0,7 m	2 ft 2 in
H Altura: del suelo a la parte inferior de las placas de contrapeso	3,6 m	11 ft 10 in

Requisitos de potencia

Voltaje de alimentación*	7.200 o 13.800 V trifásico, 60 Hz	6.000, 6.600, 7.200 u 11.000 trifásico, 50 Hz
Transformador de alimentación	(Mínimo) 3.750 kVA	
Cortocircuito VA mínimo disponible en la pala	30 MVA	

*Voltaje según los requisitos del cliente

Giro

Tres cajas de engranajes planetarios modulares P&H de diseño probado y un engranaje de giro forjado de una sola pieza transmiten el torque para obtener tiempos de ciclos rápidos.

Frenos de disco de aplicación por resorte y liberación neumática – uno por motor.

Sistema de filtración de la lubricación por salpicadura.

Propulsión

La propulsión a demanda permite una rápida transferencia al modo de propulsión. La transferencia rápida a su vez permite un reposicionamiento frecuente de la pala en el banco, lo que reduce en tiempos de ciclos más rápidos y mayor eficiencia de la excavación.

Dos cajas de engranajes planetarios P&H robustas de diseño probado transmiten de forma independiente el torque a las ruedas dentadas motrices, generando la fuerza de tracción requerida para que la propulsión y las operaciones de posicionamiento se efectúen rápida y eficientemente.

Sistema de propulsión de rueda dentada motriz de baja tensión Delta marca P&H con zapatas de orugas de fundición para trabajo pesado.

Frenos de disco de aplicación por resorte y liberación neumática – uno por motor.

Empuje

Accionamiento por correa en V Powerband entre el motor y el engranaje absorbe las cargas de choque.

Engranajes de primera y segunda reducción en carcasa cerrada para garantizar la lubricación por salpicadura, facilitar el mantenimiento y extender la vida útil de los componentes.

El mango del balde de brazos dobles con cajón de torsión y accionamiento de piñón tiene una estabilidad inherente en el banco y ofrece una capacidad óptima de excavación.

Freno de disco de aplicación por resorte y liberación neumática.

Levante

Todos los engranajes están alojados en cajas de engranajes enclaustradas individuales con aceite filtrado y refrigerado que lubrica todos los cojinetes, además de lubricación por salpicadura para obtener un funcionamiento confiable y facilitar el mantenimiento.

Tambor de levante grande con diámetro de 68" para una vida útil más prolongada de flexión del cable. El sistema de estrobo de férula y el remolcador eléctrico doble se entregan de fábrica de forma estándar para un cambio eficiente del cable.

Frenos de disco de aplicación por resorte y liberación neumática – uno por motor.

Komatsu Mining Corp. Group
mining.komatsu



Los diseños, las especificaciones y/o los datos de los productos en este documento se proporcionan solo para fines informativos y no representan una garantía de ningún tipo. Los diseños y/o las especificaciones pueden cambiar en cualquier momento sin previo aviso. Las únicas garantías que se aplican a la venta de nuestros productos y servicios son nuestros documentos de garantía estándar, que se suministrarán a pedido.

Komatsu, Joy, Montabert, P&H, Delta y otras marcas comerciales y de servicio que se utilizan aquí son propiedad de Komatsu Ltd., Komatsu Mining Corp., o de sus respectivos propietarios o licenciatarios.

© 2018 Komatsu Mining Corp. Todos los derechos reservados.

SP-4100XPCSPEC01-0518-V1

Anexo B: Tiempos de ejecución Pautas de Mantenimiento

La Propuesta de mejora contempla la realización de 5 cartas Gantt correspondiente a las Pautas de Mantenimiento:

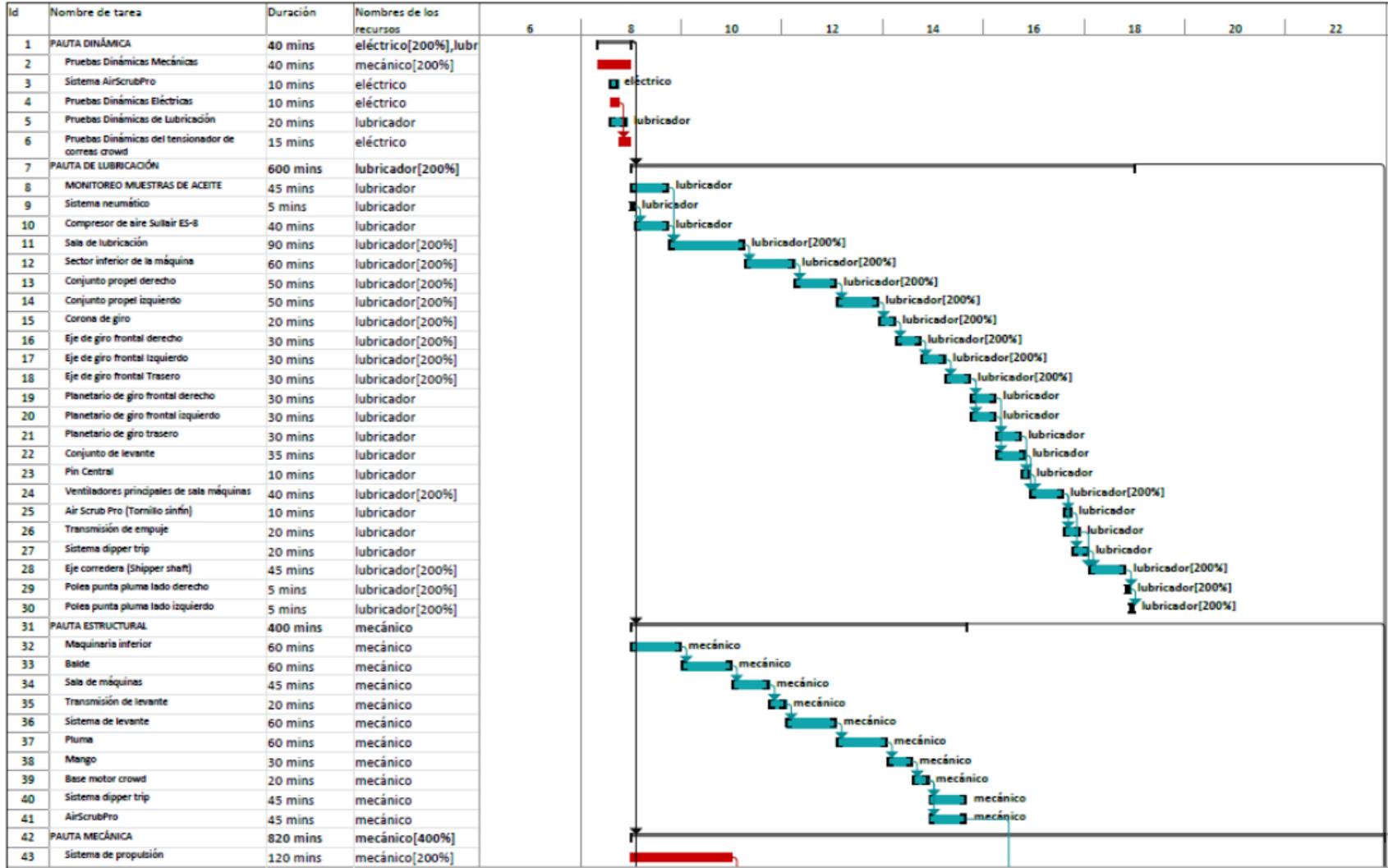
- Pauta de 250 (hrs).
- Paso 1.
- Paso 2.
- Paso 3.
- Paso 4.

Una vez determinados los tiempos de ejecución de cada Pauta de Mantenimiento, se aprecia que tanto el Paso 2 como el Paso 4 requieren de una cantidad de tiempo que excede lo dictado por la Estrategia de Mantenimiento. Por lo tanto, ambas pautas son sometidas a un proceso de optimización.

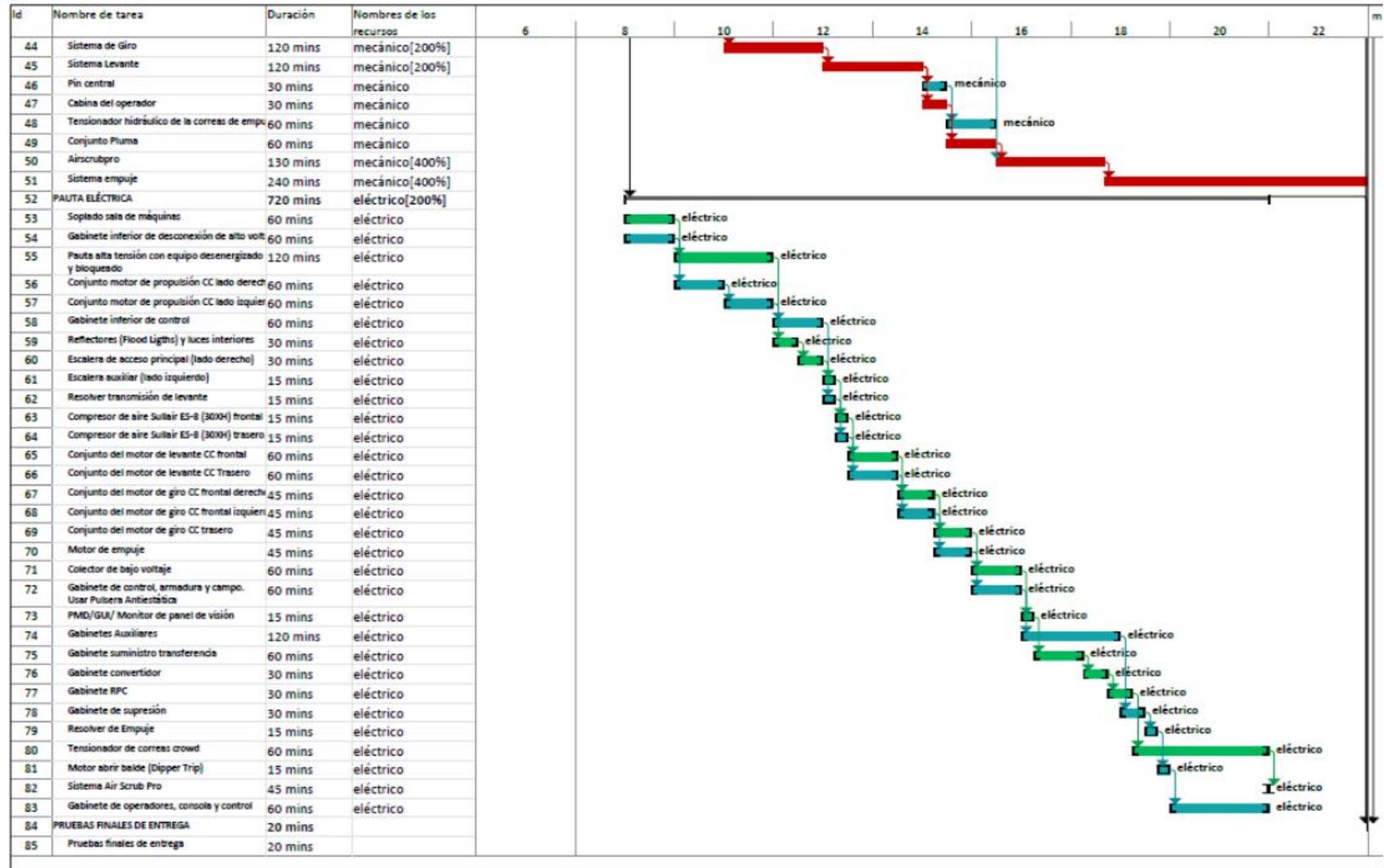
Por simpleza y debido a que el Paso 2 y el Paso 4 son prácticamente iguales, se presenta el trabajo realizado sobre el Paso 4:

- Carta Gantt previo a la optimización del Paso.
- CPM previo a la optimización del Paso.
- Carta Gantt posterior a la optimización del Paso.
- CPM posterior a la optimización del Paso.

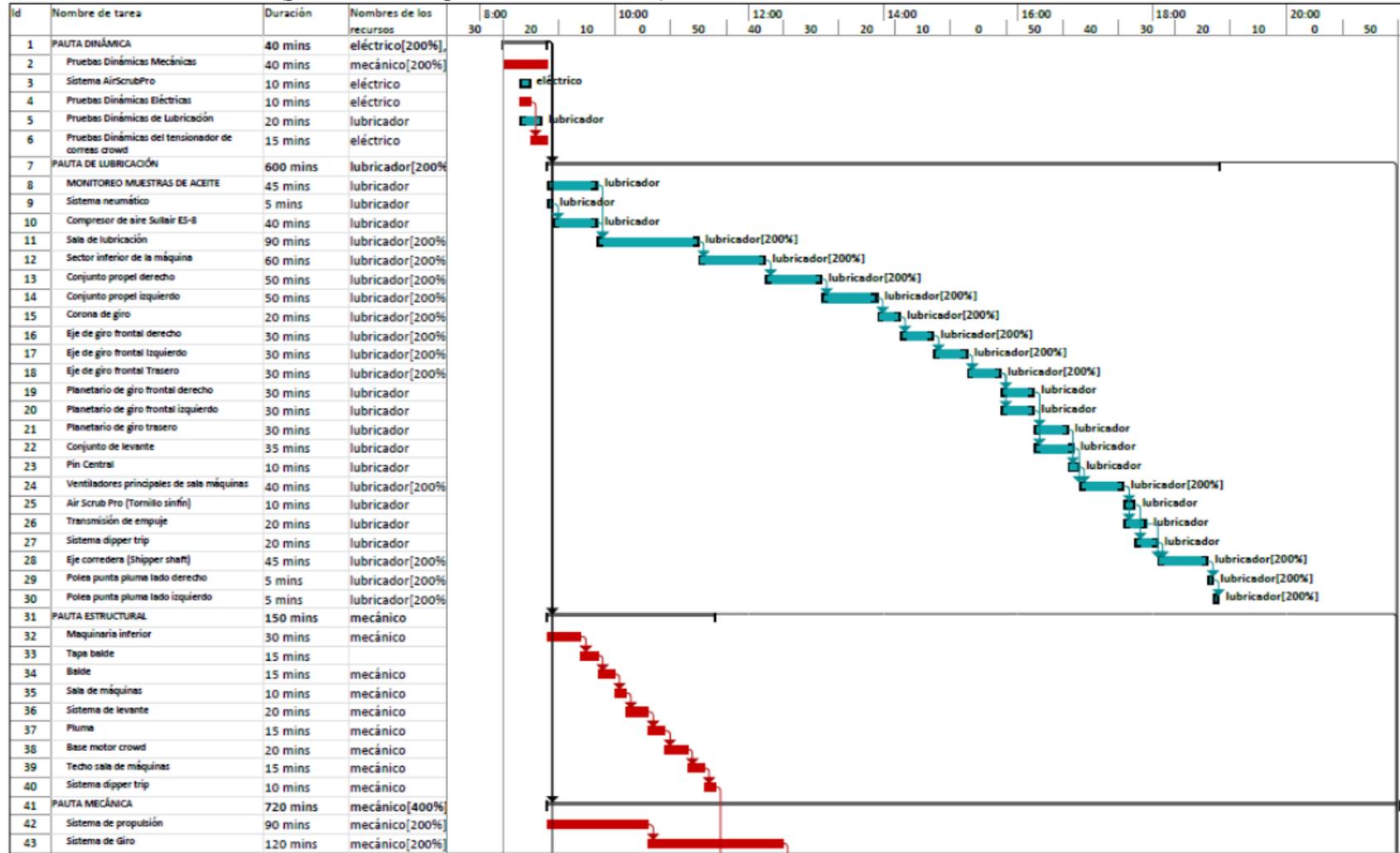
Carta Gantt del Paso n°4 (previo a la optimización del Paso)



(Continuación)



Carta Gantt del Paso nº4 (posterior a la optimización del Paso)



(Continuación)



