UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAISO - CHILE

MEJORA DEL PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE MANTENIMIENTO PARA EQUIPAMIENTO MINERO DE GRAN ENVERGADURA UTILIZANDO EL CICLO DE GESTIÓN DE RIESGO

JACQUELINE IVETTE PALACIO AGUILERA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: ING. RAFAEL MENA YANSEN

PROFESOR COREFERENTE: ING. RENE VALDENEGRO OYANEDER

ABRIL– 2018

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todos aquellos profesores, en especial al profesor Rafael Mena por guiarme y apoyarme en este último proceso; y amigos de la universidad técnica Federico Santa María, por haber formado parte de mi vida universitaria.

Por otro lado, quisiera agradecer especialmente a mi familia por apoyarme durante toda esta etapa, y agradecer a mi pareja por hacer mi estadía en la universidad, aún más grata.

Por último, quisiera agradecer a la compañía Doña Inés de Collahuasi por haberme dado la oportunidad de poder desarrollar mi memoria junto a ellos.

Resumen

El objetivo principal de este trabajo de título consiste en presentar mejoras para los procesos de planificación mantención palas electromecánicas, mediante la aplicación del ciclo gestión de riesgo, en la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

Con este fin, primero se realizará una etapa de investigación acerca de los antecedentes de la compañía, tales como, ubicación de los activos, métodos de explotación y equipos de carguío utilizados; además del estado del arte con respecto al ciclo gestión de riesgo, técnicas de ayuda para el análisis de fallas, y tipos de mantenimiento.

Posteriormente, se reunió información del área planificación mantención palas electromecánicas, analizando la situación actual de los procesos del área, su funcionamiento, los problemas que posee y que conllevan a un mejoramiento. Se identificaron variables endógenas y exógenas que afectan el cumplimiento del plan anual, tales como imprevistos, condiciones climáticas adversas, duplicidad de plan de mantenimiento.

Finalmente, se propusieron mejoras a los procesos de planificación mantención palas que permitirán robustecer el plan matriz, además se estimó un aumento en la disponibilidad de los equipos a partir de la aplicación de las mejoras, aumentando la disponibilidad de los equipos de carguío hasta en un 5% mensual en la flota HR y un 3% en la flota P&H; generando conclusiones y recomendaciones preventivas a la estrategia del área de planificación.

Abstract

The main objective of this title work is to present improvements for the maintenance planning processes of electromechanical shovels, through the application of the risk management cycle, at the Doña Inés de Collahuasi Mining Company.

To this end, first a research stage will be carried out about the company's background, such as location of the assets, operating methods and loading equipment used; in addition to the state of the art with respect to the risk management cycle, help techniques for failure analysis, and types of maintenance.

Subsequently, information was gathered from the maintenance planning area for electromechanical shovels, analyzing the current situation of the processes of the area, its operation, the problems it has and that lead to an improvement. Endogenous and exogenous variables that affect compliance with the annual plan were identified, such as unforeseen events, adverse weather conditions, duplication of maintenance plan.

Finally, improvements were proposed to the planning processes maintenance shovels that will strengthen the parent plan, in addition an increase in equipment availability was estimated from the application of the improvements, increasing the availability of the loading equipment up to a 5% monthly in the HR fleet and 3% in the P & H fleet; generating conclusions and preventive recommendations to the strategy of the planning area.

Índice de Contenidos

Agradecimientos 2
Resumen 3
Abstract 4
Índice de Contenidos 5
Índice de Ilustración 7
Índice de Tablas 8
1 Glosario 10
2 Introducción 13
2.1 Objetivos 13
2.1.1 Generales 13
2.1.2 Específicos 13
2.2 Alcances 14
3 Marco Teórico 15
3.1 Antecedentes de la compañía 15
3.1.1 Ubicación 16
3.1.2 Producción 16
3.1.3 Método de explotación 17
3.1.4 Planificación de la mantención palas en la Compañía Doña Inés de Collahuasi 19
3.2 Estado del Arte 28
3.2.1 Ciclo PHVA 28
3.2.2 Ciclo Gestión de Riesgo 30
3.2.3 Técnicas de ayuda para el análisis de falla 34
3.2.4 Tipos de mantenimiento 35
3.2.5 Conceptos de Mantenimiento 36
4 Descripción de la problemática y análisis de ella 37
4.1 Procesos de planificación mantención palas 37
4.2 Variables que afectan el cumplimiento del plan matriz 42
4.2.1 Información en sistema Ellipse 42
4.2.2 Imprevistos por falla 42

4.2.3 Condiciones Climáticas 51
4.2.4 Disponibilidad de componentes 51
5 Propuesta de mejoras al proceso de planificación mantención palas y Potenciales beneficios 53
5.1 Herramienta de gestión Ellipse 53
5.2 Condiciones climáticas .....**Error! Bookmark not defined.**
5.3 Respetar mantenimientos preventivos definidos por TBO 55
5.4 Compra de nuevos componentes 55
5.5 Definir plan de mantenimiento de acuerdo con la fase que se encuentre el activo . 57
5.6 Ingresar toda la información en la orden de trabajo del sistema Ellipse 58
5.7 Aumentar personal para realizar mantenciones o externalizar el servicio 58
6 Cuantificación de beneficios de la implementación de mejoras a los procesos de planificación 59
7 Conclusiones y recomendaciones 60
8 Referencias 62
9 Anexos 64

Índice de Ilustración

Ilustración 1: Muestra los rajos de Rosario y Ujina de la compañía minera. (Google, 2017) 15

Ilustración 2: Muestra la ubicación de la compañía minera Doña Inés de Collahuasi. (Google, 2017) 16

Ilustración 3: Muestra el proceso de carguío y transporte de mineral de la compañía minera, donde se representa 1: Infraestructura, 2: Estructura Superior, 3: Mecanismo empuje retroceso, 4: Mecanismo de levante y 5: Mecanismo descarga de balde. (CMDIC, s.f.) 18

Ilustración 4: Muestra el despiece de los cables que permiten mover el balde. Se aprecian los cables de levante, empuje y recoge. (BUCYRUS) 20

Ilustración 5: Muestra los principales mecanismos que permiten operar el balde, donde 1: Cables de Levante, 2: Cables de recoge y 3: Al interior de la pluma se encuentran los cables de empuje. (Palacio, 2017) 21

Ilustración 6: Muestra las dimensiones y rangos de trabajo del modelo de pala 4100XPC P&H. (BUCYRUS) 22

Ilustración 7: Muestra las letras que dimensionan la pala modelo 495 HR Bucyrus, en donde se complementa con la ilustración 6. (BUCYRUS) 23

Ilustración 8: Muestra el peso de trabajo, y grandes componentes de la pala 495 HR Bucyrus. (BUCYRUS) 23

Ilustración 9: Muestra los principales componentes de la pala 495 HR Bucyrus. (BUCYRUS) 24

Ilustración 10: Muestra el eje Shipper Shaft que permite el movimiento de empuje del balde. (P&H, s.f) 25

Ilustración 12: Muestra las especificaciones de trabajo de la pala modelo 4100XPC P&H. (P&H, s.f) 26

Ilustración 13: Muestra las dimensiones físicas de la pala modelo 4100XPC P&H. (P&H, s.f) 27

Ilustración 14: Representación del círculo de Deming, donde muestra las principales etapas: Planificar (Plan), Hacer (Do), Verificar (Check) y Actuar (Act). (Ludovico, 2015) 29

Ilustración 15: Representación del Ciclo Gestión de Riesgo de la compañía minera Doña Inés de Collahuasi, en donde se muestra las etapas de Planificación (mapa del proceso, matriz de riesgo, planes de mitigación y control), Ejecución (Procedimientos de trabajo), Verificación (verificación y autorización) y Conocimiento/ Aprendizaje/ Comunicación (Investigación de Incidentes). (CMDIC, 2016) 31

Ilustración 16: Representación de tiempo promedio entre fallas (MTBF). (Izzaldin, 2013) .. 37

Ilustración 17: Ilustración que representa las entradas, procesos y salidas del proceso planificación mantención palas de CMDIC. (Palacio, Esquema de Planificación Mantención Palas, 2017) 38

Ilustración 18: Muestra la comparación física entre una persona y una pala electromecánica. (Elaboración propia, 2017) 51

Índice de Tablas

Tabla 1: Muestra detenciones por mantención correctiva de las palas de la compañía CMDIC, ocurridas en el año 2016. (Elaboración propia, 2017) 43

Tabla 2: Muestra las fallas de los equipos de carguío con tiempos de detención superiores a 100 horas, ocurridas en el periodo 2015 a 2016. (Elaboración propia, 2017) 43

Tabla 3: Calculo del tiempo medio entre fallas para los equipos de carguío expresado en horas. (Elaboración propia, 2017) 44

Tabla 4: Se puede observar la tasa de falla mensual obtenida para las diferentes palas, en donde está representada en fallas por hora. (Elaboración propia, 2017) 44

Tabla 5: Muestra los tiempos promedios mensuales de detención por falla para cada pala. (Elaboración propia, 2017) 45

Tabla 6: Muestra los tiempos por mantención correctiva, calculado a partir de la tasa de falla de los equipos. (Elaboración propia, 2017)..... 46

Tabla 7: Muestra los tiempos estimados por planificación para las detenciones por imprevisto. (Elaboración propia, 2017) 46

Tabla 8: Muestra los tiempos reales de detención por imprevisto. (Elaboración propia, 2017) 47

Tabla 9: Proyección del TBO de las transmisiones de levante para la flota P&H. (Elaboración propia, 2017)..... 52

Tabla 10: Muestra los principales subcomponentes de la transmisión hoist y el costo del sub componente nuevo expresado en dolares. (Elaboración propia, 2017)..... 55

Tabla 1: Muestra detenciones por mantención correctiva de las palas de la compañía CMDIC. Hoist= levante, swing= giro, crownd= empuje y propel =propulsión..... 64

Tabla 11: Para la pala 06, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación. 66

Tabla 12: Para la pala 08, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación. 66

Tabla 13: Para la pala 09, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación. 67

Tabla 14: Para la pala 10, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación. 67

Tabla 15: Para la pala 11, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación. 68

Tabla 16: Para la pala 12, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación. 68

Tabla 17: Para la pala 13, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación. 69

Tabla 18: Para la pala 14, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación. 69

1 Glosario

Aprendizaje: Es la última parte de la metodología del ciclo gestión de riesgo, donde hace un análisis de las actividades no previstas, las medidas de control que no fueron suficientes, el feedback de los operarios con respecto al proceso. Este punto es el inicio para poder mejorar el ciclo gestión de riesgo.

ARENGA: Reunión de inicio de turno, donde asisten área de operaciones y planificación. Se presentan los objetivos del día y las amenazas que podrían ocurrir.

Budget: Presupuesto anual que estima el área de planificación mina, que debe ser aprobado por la vicepresidencia carguío y transporte.

CGR: Ciclo Gestión de Riesgo. Conjunto de acciones, técnicas y procedimientos que tienen por objetivo eliminar o disminuir el riesgo de que se produzcan resultados indeseados.

CMDIC: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

Crowd: Empuje. Hace referencia al sistema de empuje del equipo.

EPF: Estándares de Prevención de Fatalidades. Son medidas de control, para actividades que tienen asociados riesgos fatales o potencial de fatalidad. Son 8 procedimientos de trabajo para diferentes actividades en la mina.

GRT: Gestión de Riesgo en Terreno. Nace de la planificación. Refuerza la implementación efectiva de los controles.

Hoist: Levante. Se refiere al sistema de levante de la pala.

Incidente: Actividad no planificada o no prevista.

LOW: Tiempo estimado de vida útil de la mina.

Mantención Palas: Área encargada de realizar mantención programadas, cambios de componentes, e inspecciones por oportunidad a las palas P&H y Bucyrus. Además, debe planificar la reparación de los equipos frente a una mantención correctiva.

Mapa de Proceso: Documento definido por la compañía, que permite comprender los procesos, subprocesos, actividades y tareas de una determinada área o departamento.

Matriz de Amenazas: Muestra los posibles riesgos que pueden ocurrir al llevar a cabo una determinada actividad. En conjunto con los riesgos se presenta una criticidad de ocurrencia y medidas preventivas o mitigatorias para que no ocurra un accidente.

Medidas de Control o Mitigación: Son medidas que ayudan a controlar o disminuir los riesgos al realizar una determinada actividad.

Operaciones: Es el área encargada de ejecutar las actividades planificadas, establecidas por planificación mantención palas.

OT: Orden de trabajo para ejecutar una actividad programada.

Plan Matriz: Es la planificación anual de las actividades. Estas actividades incluyen los cambios de componentes, mantenciones programadas, inspecciones y, monitoreo y condiciones.

Plan Mensual: Es la planificación de las actividades de mantención comprendidas en un periodo de 30 días. Debe estar alineado con el plan trimestral.

Plan Trimestral: Es la planificación a 3 meses. En él se presentan las mantenciones programadas, los cambios de componentes y las inspecciones programadas.

Planificación Corto Plazo: Consiste en la programación de las actividades en un horizonte máximo de 3 meses.

Planificación Largo Plazo: Consiste en la programación de las actividades en un horizonte mínimo de 1 año, llegando a ser de 20 años.

Planificación: Es la organización de los recursos e información para poder realizar las actividades de la mejor forma posible. Este proceso debe ir alineado con la misión y visión de la empresa.

Procedimiento de Trabajo: Es un documento que describe el paso a paso de una determinada actividad. También incluyen los posibles riesgos y las medidas de mitigación o control. Por lo general es aplicado al área de operaciones.

Propel: Propulsión. Se refiere al sistema de propulsión del equipo.

RITUS: Reunión de Inicio de Turno Seguro. Se presentan las actividades que se realizaran durante el turno y se hace énfasis en los riesgos a que se expondrán las actividades.

Swing: Giro. Hace referencia al sistema de giro de la pala.

TBO: Tiempo medio de vida de un componente. Es recomendado por fabricante.

VATS: Verificación y Autorización del Trabajo Seguro. Formulario de verificación de documentos para poder llevar a cabo una actividad.

WR: Requerimiento de trabajo. Surge a partir del desarrollo de una actividad anterior, donde se detectan posibles amenazas que afecten la disponibilidad del equipo.

2 Introducción

La extracción y movimiento de mineral dentro de una mina a rajo abierto se realiza mediante 4 grupos de maquinarias: perforadoras, palas, camiones y equipos auxiliares. De estos 4 grupos, las palas son los equipos más críticos, ya que de cada una de ellas dependen alrededor de 10 camiones y la ocurrencia de algún imprevisto repercute directamente en la producción de la mina.

El área de planificación mantención palas, tal como dice su nombre, es el área encargada de proyectar, gestionar y realizar las mantenciones a las palas. Los mantenimientos que planifica son mantenimiento predictivo y preventivo. Sin embargo, el plan anual de mantención palas se ve interrumpido por diferentes variables que no permiten su cumplimiento.

Las principales variables que afectan el cumplimiento del plan matriz son los imprevistos por falla, la indisponibilidad de repuestos y la falta de personal. Se estudiarán cada una de estas variables y se buscarán propuestas de mejoras que ayuden dar cumplimiento al plan matriz, con el fin de:

- Asegurar la confiabilidad de los equipos
- Dar continuidad al proceso operacional
- Disminuir la tasa de falla de los equipos
- Disminuir la variabilidad de los procesos

2.1 Objetivos

2.1.1 Generales

- Proponer mejoras a los procesos de planificación mantención palas, con el fin de asegurar el cumplimiento del plan matriz

2.1.2 Específicos

- Estudiar, identificar y analizar las variables que afectan la planificación del mantenimiento palas
- Identificar, revisar y analizar los procesos transversales de planificación del mantenimiento definido por gestión de activos para la compañía

- Identificación de mejoras al proceso de planificación de mantención palas por medio de la retroalimentación de los trabajadores
- Proponer mejoras a los procesos de planificación de mantención palas, utilizando el ciclo gestión de riesgo
- Cuantificar los potenciales beneficios de implementar mejoras al proceso de planificación de mantención palas. Conclusiones y recomendaciones

2.2 Alcances

El presente documento estudiará los procesos de planificación mantención palas, de la superintendencia mantención palas, gerencia carguío y transporte, vicepresidencia mina.

3 Marco Teórico

3.1 Antecedentes de la compañía

La Compañía Doña Inés de Collahuasi (CMDIC) es una empresa minera dedicada a la extracción y producción de concentrado, cátodos de cobre, y concentrado de molibdeno. La explotación de mineral se realiza a rajo abierto, contando con los yacimientos de Ujina y Rosario, de los cuales actualmente se explota este último.

En el sector de Ujina se encuentra también la planta concentradora, desde donde nace un mineroducto de 203 km, a través del cual el concentrado de cobre es trasladado como pulpa hasta las instalaciones de filtrado y embarque de la compañía ubicadas en Punta Patache, a 65 km al sur de la ciudad de Iquique, donde se embarcan los productos hacia mercados internacionales.

Ilustración 1: Muestra los rajos de Rosario y Ujina de la compañía minera. (Google, 2017)

3.1.1 Ubicación

La compañía minera se ubica en la comuna de Pica, Región de Tarapacá, en el extremo norte de Chile a una altura promedio de 4.400 msnm. Al ser una zona andina se caracteriza por tener un clima lluvioso en verano y nevadas ocasionales en invierno.

Ilustración 2: Muestra la ubicación de la compañía minera Doña Inés de Collahuasi. (Google, 2017)

3.1.2 Producción

A diciembre de 2014, Collahuasi es la segunda mayor operación privada de cobre en el mundo, y el tercer mayor depósito de cobre del planeta en recursos minerales (9.964 millones de toneladas).

> "La Compañía cuenta con dos procesos productivos en sus yacimientos, una línea de sulfuros y otra de óxidos, las que producen cobre y molibdeno. El 2015 Collahuasi produjo 455,3 mil toneladas de cobre fino, con ventas totales por US$ 2.690 millones.
>
> Respecto de los costos, gracias a planes desarrollados para gestionar y fortalecer la competitividad de la Compañía, se bajó el costo operacional a US$1,41 la libra, cercano al primer cuartil de la industria.
>
> La Compañía anotó positivos resultados de producción durante el primer semestre del año, al lograr una producción de 243.838 toneladas, un 12,6% más que en el mismo

período del año anterior. A eso se sumó una reducción de 23% en sus costos, llegando a US$ 1,18 la libra gracias, entre otros factores, a las mejoras operacionales y de gestión que se han implementado en los últimos años, poniendo foco en su cadena de valor y asegurando la eficiencia de sus procesos. De esta forma, Collahuasi ha podido sortear el complejo escenario de precios por el que atraviesa la industria." (CMDIC, 2017)

3.1.3 Método de explotación

El método de explotación empleado en CMDIC es a rajo abierto, por lo que los equipos empleados para la extracción de material y estéril, son las palas electromecánicas, debido a que pueden alcanzar elevadas producciones y alta disponibilidad mecánica con bajos costos unitarios.

3.1.3.1 Principales mecanismos de las palas electromecánicas

"Infraestructura

Las palas poseen una infraestructura montada sobre dos carros de orugas, lo que les permite posicionarse adecuadamente en los lugares de trabajo, y trasladarse a baja velocidad. En este conjunto va instalado el mecanismo de traslación y dirección. Además, todo el equipamiento eléctrico va montado en la infraestructura.

Estructura Superior

Sobre la infraestructura se instala la estructura giratoria, que consiste en una plataforma capaz de girar en 360 grados en ambos sentidos. Está cubierta por un habitáculo cerrado y presurizado, que impide la entrada de polvo en los sistemas de accionamiento y control, tanto de la función de carga como de la de giro montadas sobre ella.

En la parte delantera del habitáculo se ubica el equipo frontal de excavación y la cabina del operador. En la trasera está el contrapeso.

Mecanismos de operación

La operación de carga de una pala de cable se realiza mediante la combinación de dos funciones ejecutadas por dos mecanismos distintos:

- Mecanismo de elevación, que trabaja mediante el cable de elevación, que se enrolla en su correspondiente tambor.
- Mecanismo de empuje / retroceso, que se realiza por medio de un mecanismo piñón y cremallera instalado en la pluma en el caso de las palas modelo 4100XPC P&H o también mediante cables en el caso de las palas 495HR BUCYRUS, todos accionados por motores eléctricos en el caso de las palas modelo 495HR Bucyrus.

La descarga se realiza una vez que la estructura superior ha girado hasta situarse sobre la unidad de transporte (camión). En ese momento, un motor eléctrico ubicado en la pluma acciona, mediante un cable, el cerrojo de la compuerta del balde para descargar el material. (CODELCO, 2017)

Ilustración 3: Muestra el proceso de carguío y transporte de mineral de la compañía minera, donde se representa 1: Infraestructura, 2: Estructura Superior, 3: Mecanismo empuje retroceso, 4: Mecanismo de levante y 5: Mecanismo descarga de balde. (CMDIC, s.f.)

3.1.4 Planificación de la mantención palas en la Compañía Doña Inés de Collahuasi

La compañía cuenta con 2 palas 495 BI Bucyrus, 4 palas 495 HR Bucyrus y 4 palas 4100XPC P&H, siendo 10 palas de gran envergadura, que alimentan a 102 camiones. En promedio cada equipo carga 700 mil toneladas diarias a la cadena de producción, por tanto, asegurar la confiabilidad de estos equipos permite dar continuidad operacional a los procesos de la mina.

Planificación mantención palas anualmente entrega un plan matriz de mantención, incluyendo principalmente: mantenciones preventivas, predictivas, monitoreo y condiciones, y cambios de componentes. La planificación de estas actividades se distribuye de acuerdo con las frecuencias de mantención y frecuencias de cambio de componentes establecidas por fabricante.

La presente memoria no analizará los equipos de la flota BI debido a que en agosto del presente año cesaran sus funciones.

3.1.4.1 Palas electromecánicas 495HR Bucyrus

La compañía minera cuenta con 4 palas Bucyrus para la extracción de mineral y movimiento de estéril, siendo estas las palas numeradas internamente: 06, 08, 09 y 10.

La vida útil de estos equipos alcanza las 105.000 horas de operación siendo la más antigua la pala 06 con 78.359 horas de operación y la más nueva con 34.305 horas.

El sistema de empuje y recoge son lo que diferencian a estas palas de la flota 4100 XPC, ya que el conjunto está conformado por 2 sistemas de cables que permiten el movimiento del balde. Los cables de empuje y recoge están fijados al tambor de empuje y trabajan como un sistema integral, es decir, en la medida que el cable de empuje se enrolla en el tambor, el cable de recoge se desenrolla.

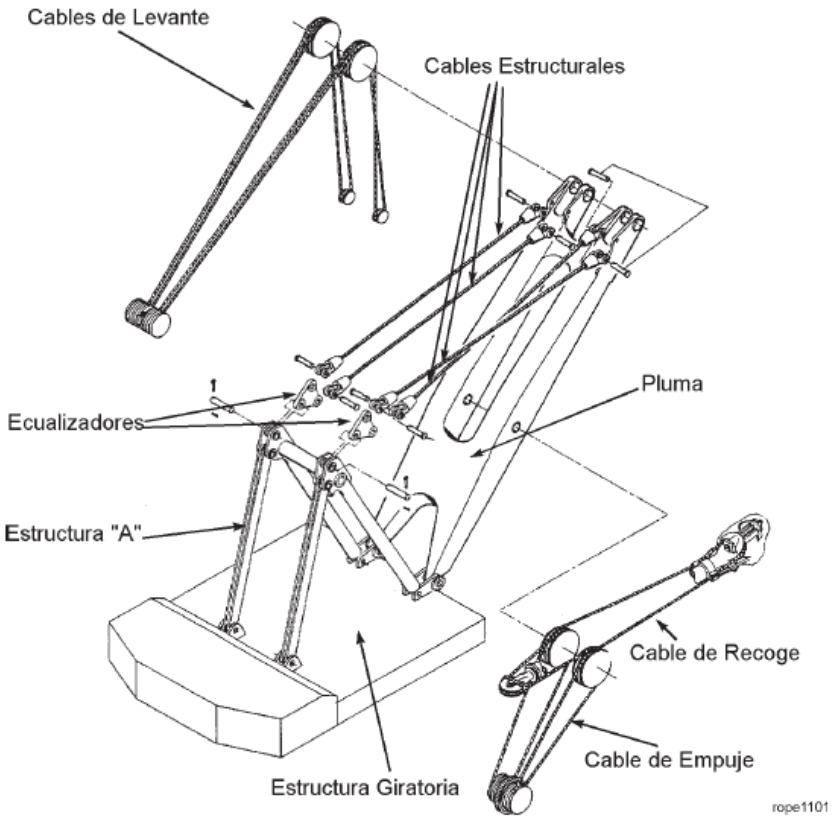


Ilustración 4: Muestra el despiece de los cables que permiten mover el balde. Se aprecian los cables de levante, empuje y recoge. (BUCYRUS)

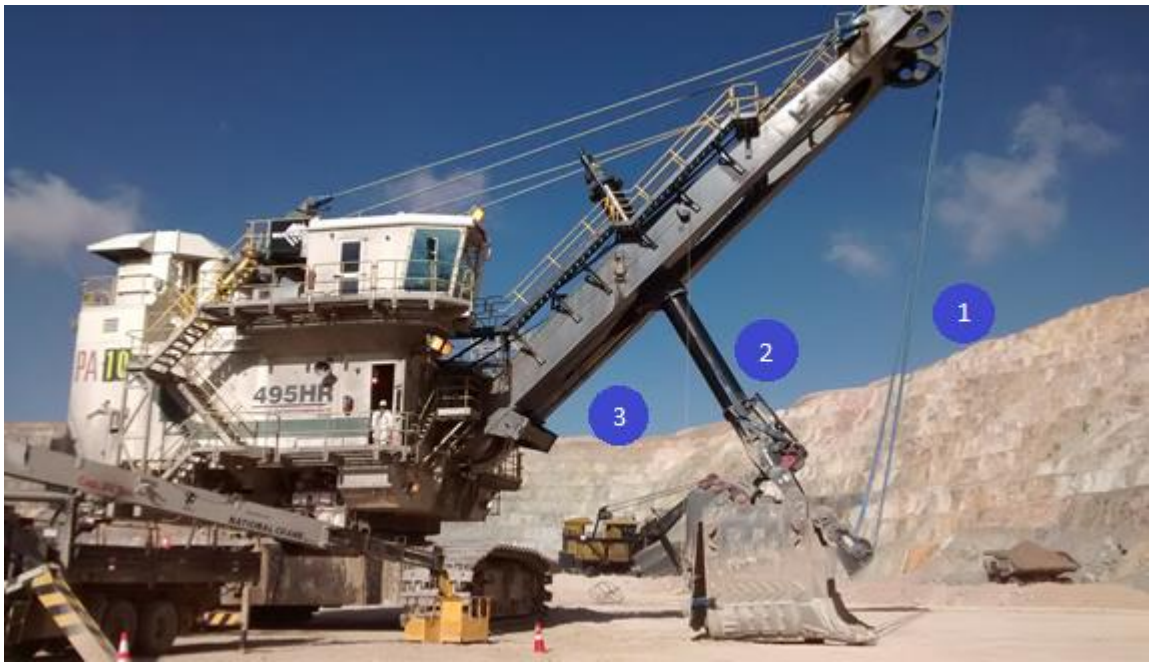


Ilustración 5: Muestra los principales mecanismos que permiten operar el balde, donde 1: Cables de Levante, 2: Cables de recoge y 3: Al interior de la pluma se encuentran los cables de empuje. (Palacio, Ilustración de mantención pala electromecánica, 2017)

3.1.4.1.1 Especificaciones

Dimensiones y Rangos de Trabajo

	US	Métrico
Capacidad Balde (nominal)	60 yd^3	46 m^3
Capacidades de Baldes (rango)	40-80 yd^3	30.6-61.2 m^3
Longitud de la Pluma	67'	20.4 m
Ángulo de la Pluma		45°
Longitud Efectiva del Mango del Balde	35'-10"	10.9 m
Longitud Total del Mango del Balde	47'	14.3 m
A: Altura de Descarga	34'-10"	10.6 m
A_1: Altura de Descarga a Radio Máximo	28'-3"	8.61 m
B: Radio de Descarga - Máximo	66'-9"	20.34 m
C: Altura de Corte - Máximo	59'-3"	18.1 m
D: Radio de Corte - Máximo	78'-2"	23.83 m
E: Radio a Nivel del Suelo	56'-1"	17.1 m
F: Profundidad Bajo Nivel del Suelo - Máxima	10'-6"	3.20 m
G: Altura Libre @ Poleas Punta Pluma	68'-6"	20.9 m
H: Radio Libre @ Poleas Punta Pluma	63'-1"	19.02 m
I: Radio Libre @ Estructura Giratoria	29'-7"	9.02 m
J: Altura Libre - Estructura Giratoria al Suelo	10'-10"	3.3 m
K: Altura de la Estructura "A"	44'-4"	13.51 m
L: Ancho Total de la Máquina	42'-8"	13.01 m
M: Altura al Suelo (Punto Inferior Estructura Transporte)	22"	0.57 m
N: Nivel Visual desde Cabina del Operador	29'-0"	8.84 m

Ilustración 6: Muestra las dimensiones y rangos de trabajo del modelo de pala 4100XPC P&H. (BUCYRUS)

A continuación, se puede observar las dimensiones de la pala modelo 495HR

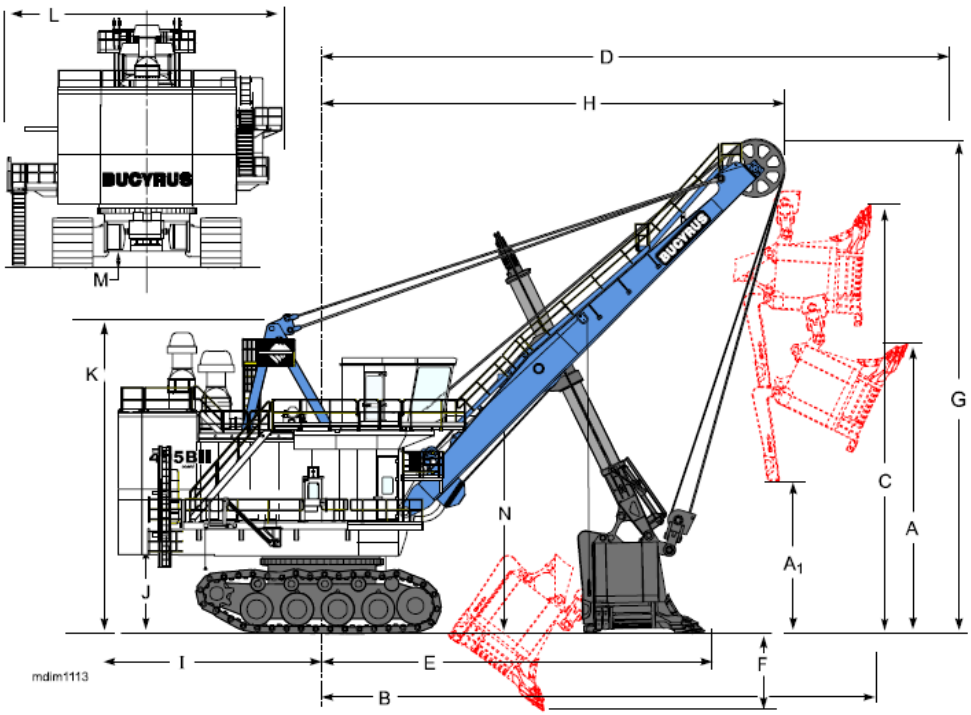


Ilustración 7: Muestra las letras que dimensionan la pala modelo 495 HR Bucyrus, en donde se complementa con la ilustración 6. (BUCYRUS)

Pesos

	(libras)	(kilogramos)
Peso de Trabajo (c/Balde)	2,688,000	1,219,300
Balde (60 yd³, 46 m³)	138,000	62,600
Contrapeso	700,000	318,200
Peso Neto, menos Contrapeso y Balde	1,850,000	839,200

Ilustración 8: Muestra el peso de trabajo, y grandes componentes de la pala 495 HR Bucyrus. (BUCYRUS)

Componentes principales de la pala modelo de pala 495HR Bucyrus

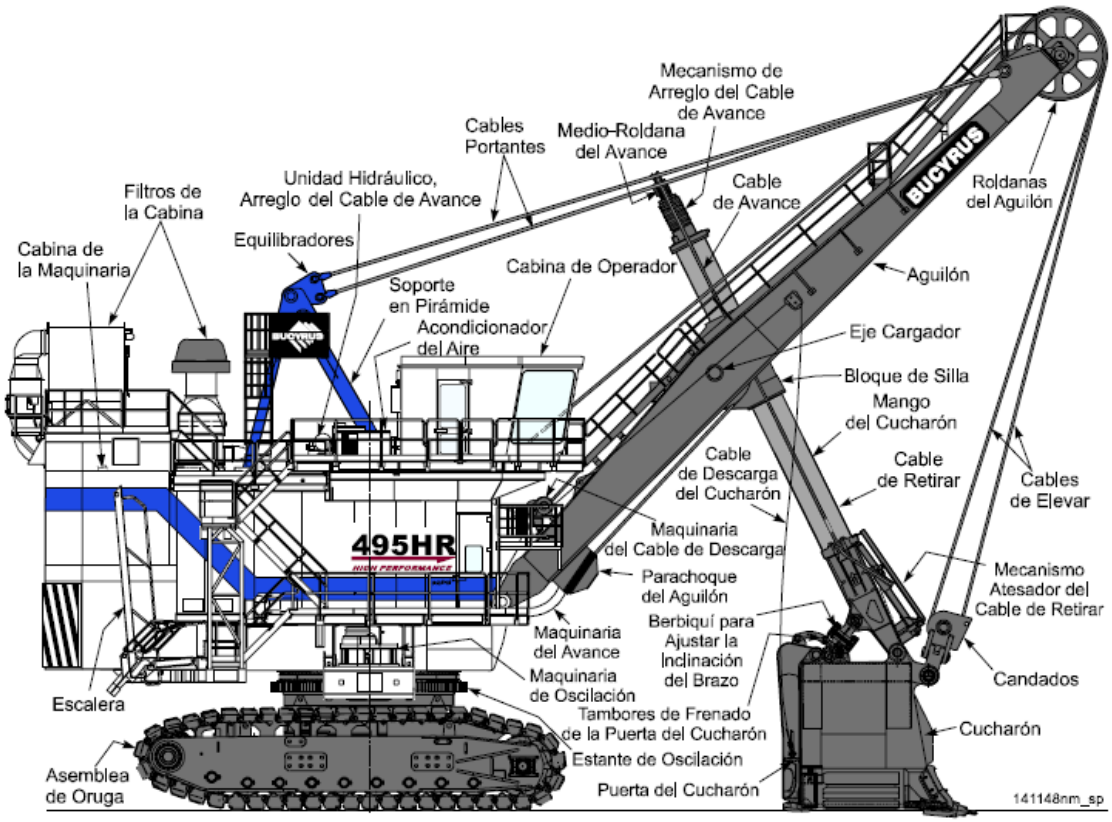


Ilustración 9: Muestra los principales componentes de la pala 495 HR Bucyrus. (BUCYRUS)

3.1.4.2 Palas Eléctricas 4100XPC P&H

El modelo P&H 4100XPC AC proporciona una capacidad nominal de 115 [ton] para camiones de gran tonelaje.

La compañía cuenta con 4 palas 4100XPC P&H, que alimentan 50 camiones aproximadamente. La flota está compuesta por las palas numeradas 11,12, 13 y 14, siendo la pala 11 la más antigua de la flota con 35.329 [hrs] de operación y la más nueva con 21515,74 [hrs].

A diferencia del modelo 495HR, el sistema de empuje cuenta con un mecanismo piñón y cremallera instalado en la pluma.

“Un sistema de transmisión por correa proporciona protección contra choques y acopla el motor de empuje a la transmisión de empuje. A su vez la transmisión de empuje acciona el shipper shaft (piñon), el cual se engrana con la cremallera para proporcionar el movimiento de empuje y recoge” (Peak Services)

Shipper shaft es un eje grande centrado en y extendido desde la pluma, el cual tiene piñones estriados en sus extremos que se engranan con la cremallera en la parte inferior del mango del balde y permite el movimiento de empuje.

Ilustración 10: Muestra el eje Shipper Shaft que permite el movimiento de empuje del balde. (P&H, s.f)

3.1.4.2.1 Especificaciones

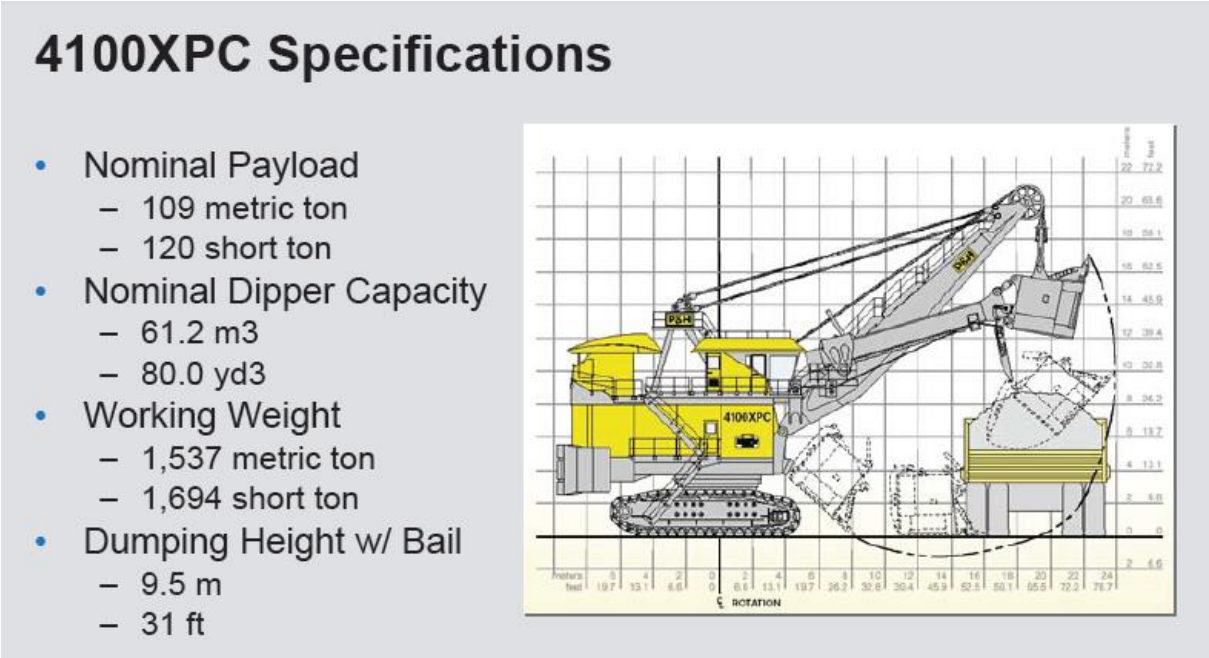


Ilustración 11: Muestra las especificaciones de trabajo de la pala modelo 4100XPC P&H. (P&H, s.f)

3.1.4.2.2 Dimensiones físicas pala 4100XPC

Overall Dimensions			
A	Width	14.4 m	47 ft. 1 in.
B	Length	15.0 m	49 ft. 4 in.
C	Height Over Gantry	14.7 m	48 ft. 3 in.
D	Width of Crawler Shoes	1930 mm (std.) 2210 mm	76 in. (std.) 87 in.
E	Width of Crawlers (std.)	10.5 m	34 ft. 5 in.
F	Length of Crawlers	11.7 m	38 ft. 6 in.
G	Ground Clearance	0.7 m	2 ft. 2 in.
H	Height — Ground to Bottom of Counterweight Slabs	3.6 m	11 ft. 10 in.
I	Height — Ground to Bottom of Counterweight	3.6 m	11 ft. 10 in.

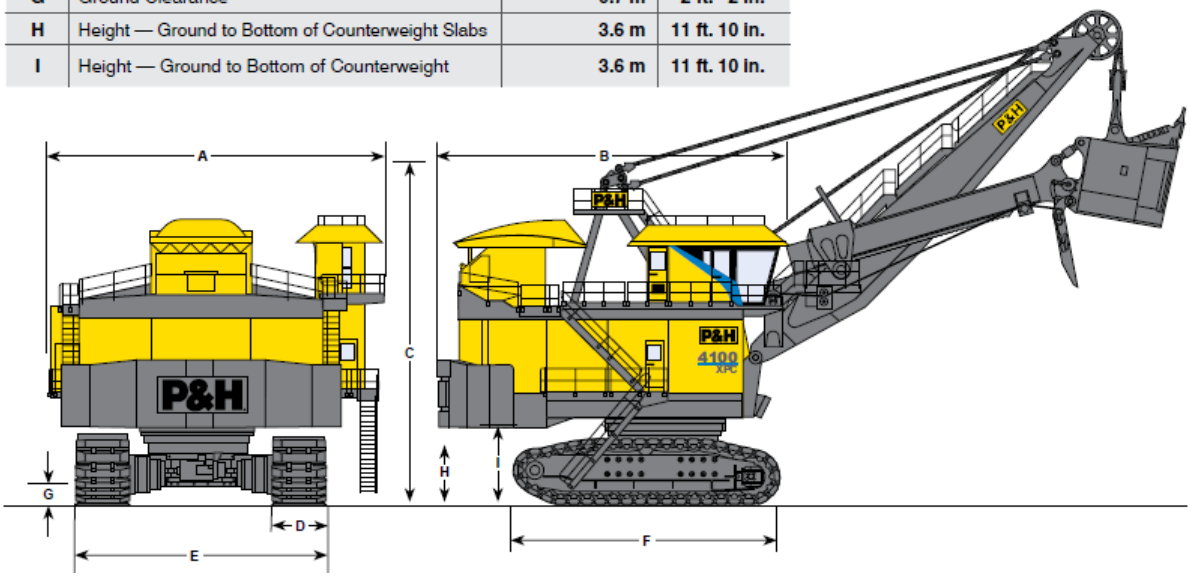


Ilustración 12: Muestra las dimensiones físicas de la pala modelo 4100XPC P&H. (P&H, s.f)

3.2 Estado del Arte

3.2.1 Ciclo PHVA

El ciclo PHVA o también conocido como círculo de Deming surge en el año 1950, por el doctor Edward Deming, en donde la abreviatura PHVA proviene de las siglas Planificar, Hacer, Verificar y Actuar. Este ciclo busca la mejora continua de los procesos propios o externos de una empresa u organización principalmente.

En el año 1921 Edward Deming, terminó la carrera de ingeniería eléctrica, en la Universidad de Wyoming. Posteriormente en el año 1925 obtuvo la maestría en Física y Matemáticas en la Universidad de Colorado y finalmente en el año 1928 obtuvo el Doctorado en Física, en la universidad de Yale. Luego de haber obtenido su doctorado, trabajó en el Departamento de Agricultura en Washington D.C. y como consejero estadístico para la Oficina de Censo de los Estados Unidos, y es durante este periodo que Deming descubre el trabajo sobre control estadístico de los procesos creado por Walter A. Shewhart, quien trabajaba en los Laboratorios Telefónicos Bell (Bell Labs) de la telefónica AT&T, que fueron la base de sus ideas.

El doctor Walter A. Shewhart promovía la importancia de reducir la variación en un proceso de manufactura y entender que el continuo proceso de ajuste en reacción a no-conformidades en realidad incrementaba la variación. Shewhart entendía la calidad como un problema de variación, el cual puede ser controlado y prevenido mediante la eliminación a tiempo de las causas que lo provocan.

Edward Deming amplio los horizontes de la filosofía de Shewhart y las adapto en el ciclo de mejora continua, tanto para empresas u organizaciones, como para la vida personal.

Las etapas que componen el ciclo de Deming son:

- Planificar
- Hacer
- Verificar
- Actuar

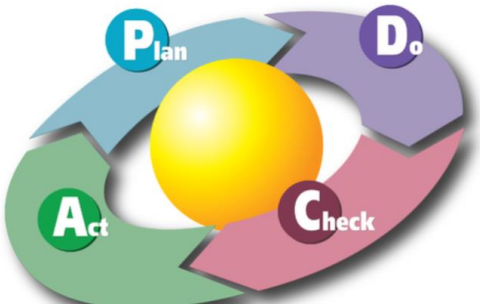


Ilustración 13: Representación del círculo de Deming, donde muestra las principales etapas: Planificar (Plan), Hacer (Do), Verificar (Check) y Actuar (Act). (Ludovico, 2015)

Planificar (Plan)

Se buscan las actividades susceptibles de mejora y se establecen los objetivos a alcanzar. Para buscar posibles mejoras se pueden realizar grupos de trabajo, escuchar las opiniones de los trabajadores, buscar nuevas tecnologías mejores a las que se están usando ahora, etc.

Hacer (Do)

Se realizan los cambios para implantar la mejora propuesta. Generalmente conviene hacer una prueba piloto para probar el funcionamiento antes de realizar los cambios a gran escala.

Controlar o Verificar (Check)

Una vez implantada la mejora, se deja un periodo de prueba para verificar su correcto funcionamiento. Si la mejora no cumple las expectativas iniciales habrá que modificarla para ajustarla a los objetivos esperados.

Actuar (Act)

Por último, una vez finalizado el periodo de prueba se deben estudiar los resultados y compararlos con el funcionamiento de las actividades antes de haber sido implantada la mejora. Si los resultados son satisfactorios se implantará la mejora de forma definitiva

(estandarización), y si no lo son, habrá que decidir si realizar cambios para ajustar los resultados o si no desecharla.

Una vez terminado el ciclo (actuar), se debe volver al primer paso periódicamente para estudiar nuevas mejoras a implantar." (Bernal, J. 2014).

Aplicar el círculo de Deming, trae consigo beneficios para la organización u empresa, principalmente:

- Disminución o mitigación de no conformidades en los procesos
- Disminución de accidentes operacionales
- Aumento de la confiabilidad de los activos

A partir de lo anterior, el ciclo de mejora continua no tan solo se ocupa en empresas sino también se utiliza de forma intuitiva en la vida diaria para llevar a cabo algún proyecto personal.

3.2.2 Ciclo Gestión de Riesgo

La metodología del ciclo gestión de riesgo se basa en el ciclo de Deming o ciclo de mejora continua. Este ciclo buscar el aseguramiento de la calidad, para ello establece las acciones necesarias para responder ante cualquier circunstancia, problema real, problema potencial o posibilidad de mejora mediante:

- Analizar con hechos y datos del proceso, para identificar las causas del problema o los factores de mejoramiento. Implementar las medidas para su reducción o eliminación.

- Estandarizar las acciones exitosas, documentando las tareas críticas y comunicándolas a todos los involucrados para su aplicación. Esto evitará la recurrencia de los problemas.

- Garantizar por diferentes acciones que los procedimientos se apliquen, para que las causas del problema nunca salgan de control.

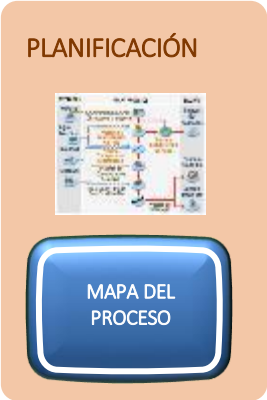
La compañía adopto esta metodología a todos sus procesos y subdividió la etapa de planificación en 3 sub etapas con el fin de simplificar las funciones y responsabilidades de estas. Las sub etapas son:

- Mapa del proceso
- Matriz de Amenazas
- Estándar prevención de fatalidad (EPF) o Plan de Mitigación o Control

Ilustración 14: Representación del Ciclo Gestión de Riesgo de la compañía minera Doña Inés de Collahuasi, en donde se muestra las etapas de Planificación (mapa del proceso, matriz de riesgo, planes de mitigación y control), Ejecución (Procedimientos de trabajo), Verificación (verificación y autorización) y Conocimiento/ Aprendizaje/ Comunicación (Investigación de Incidentes). (CMDIC, 2016)

Las etapas del ciclo gestión de riesgo se identifican como cajas, es decir, a la etapa mapa del proceso se denomina caja 1, la etapa matriz de riesgo se denomina caja 2 y así sucesivamente, hasta llegar a la caja 6. A continuación se describe cada una de ellas.

Mapa del proceso (Caja 1)



Describe el desarrollo de las actividades de un proceso, consta de 3 partes:

Las entradas son todos aquellos documentos o actividades que sirven de imput.

El proceso son todas aquellas actividades que forman parte medular de la tarea a realizar.

Las salidas son todos aquellos resultados o documentos generados a partir de la realización de la actividad.

Matriz de Riesgo (Caja 2)

A partir del mapa del proceso se van identificando los posibles riesgos o peligros de realizar las actividades del proceso, dichos riesgos se clasifican de acuerdo a un estándar de probabilidad de ocurrencia y consecuencias, identificando con color rojos aquellos procesos que afectan la salud de las personas o la continuidad operacional.

Para cada uno de los riesgos se aplican un control o plan de mitigación.

Planes de Mitigación (Caja 3)

Posteriormente a haber realizado la matriz de riesgo y en conjunto con ella se van definiendo los planes de control o mitigación para los riesgos identificados. Si no existe algún procedimiento, este se genera.

Ejecución (Caja 4)

Para desarrollar cualquier actividad debe contar con su procedimiento de trabajo, con el fin de estandarizar las actividades y minimizar los riesgos que se generen.

En este documento se detalla la tarea a realizar, lo esperado de la actividad, el riesgo asociado y las medidas de control o mitigación.

Verificación (Caja 5)

Una vez realizada la actividad se verifica la efectividad de los controles aplicados, si no es el caso, por medio de la caja 6 se modifica el procedimiento comenzando con la caja 1.

Conocimiento/ aprendizaje (Caja 6)

Los aprendizajes surgen de las desviaciones que se planteó en el mapa del proceso, deben generar una retroalimentación a los procesos con el fin minimizar los riesgos o variaciones en la planificación. Solamente a partir de la caja 6 se puede modificar los procesos de la caja 1.

3.2.3 Ciclo Gestión de Riesgo en otras empresas

En marzo del presenta año, el ministerio secretaría general de la presidencia, emitió un documento "IMPLANTACIÓN, MANTENCIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE RIESGOS EN EL SECTOR PÚBLICO", en donde se presenta la implementación y cumplimiento del proceso de gestión de riesgo. Este documento describe con orientación al sector público, la misma metodología aplicada en la compañía minera Doña Inés de Collahuasi.

La minera El Tesoro, en el año 2010 implemento el modelo de confiabilidad operacional donde beneficio la gestión de riesgo de la empresa. Su modelo es una antesala de lo que hoy se conoce como Ciclo Gestión de Riesgo.

El actual vicepresidente ejecutivo del área de operaciones en CMDIC Francisco Carvajal, implemento el modelo de confiabilidad operacional en la Minera el Tesoro bajo el mando de Gerente General, y en el año 2013 implementa el Ciclo de Gestión de Riesgo en la Compañía Doña Inés de Collahuasi.

3.2.4 Técnicas de ayuda para el análisis de falla

3.2.4.1 Análisis causa raíz (RCA)

Es un proceso estructurado y deductivo que sirve para identificar las causas primarias que desencadenan en una falla o problema. Es una técnica utilizada una vez ocurrida la falla, sin embargo, es de gran ayuda para impedir que ocurra nuevamente.

Es utilizado principalmente para:

- Eliminar fallas crónicas que, por su alta frecuencia, producen pérdidas considerables
- Evitar recurrencia de fallas esporádicas
- Corregir errores humanos durante los procesos de operación, mantenimiento, etc.
- Investigar las causas de un accidente o incidente
- Estudiar los orígenes de una falla funcional

3.2.4.2 Diagrama Ishikawa: Diagrama causa- efecto

Este diagrama permite visualizar aquellos modos de falla que podrían derivar en una falla funcional de un sistema. Un grupo propone y discute las causas de la falla ubicándolas según un factor asignado, para lo cual suele usarse una tormenta de ideas.

La falla funcional estudiada, debe describirse claramente en relación con la función que se pierde; un bajo nivel de detalle obliga a los analistas a evaluar una gran cantidad de causas que no son inherentes a la falla. Sin embargo, cuando el diagrama se somete a una gran descripción, se eliminan algunas causas que son efecto intermedio de otras, quedando solamente las causas raíces. (Pistarelli, 2010)

3.2.4.3 Diagrama de Pareto

Este diagrama propone que unos pocos factores son más significativos que el resto, razón por la que se los llama pocos y significativos. También conocida como regla del 80- 20, asegura que casi siempre existen pocas causas (20%) que contribuyen mayoritariamente (80%) a generar el efecto total.

Un diagrama de Pareto es útil para estudiar fallas crónicas, sin embargo, en ninguna circunstancia, resuelve los problemas, únicamente facilita la selección de las causas que producen mayor perjuicio.

Los pasos para construir un diagrama de Pareto son:

- Definir el problema a estudiar, su alcance y los límites del sistema
- Escoger una unidad de medida para cuantificar, por igual el efecto o pérdida de todos los eventos
- Listar los eventos o causas y la pérdida parcial con que contribuye cada uno
- Sumar las perdidas parciales para obtener la pérdida total del conjunto
- Ordenar los eventos o causas de forma descendente según la perdida que provoca cada uno
- Calcular el porcentaje que representa cada uno, con respecto al total (100%)
- Hacer la suma acumulada de las contribuciones porcentuales, desde la mayor a la menor
- Confeccionar un diagrama de barras con la pérdida de cada uno, ordenando descendentemente. En el mismo gráfico, como eje secundario del lado derecho, dibujar una línea cuyos puntos serán los porcentajes acumulados en orden ascendente
- Seleccionar los eventos cuya suma acumulada sea igual o mayor al 80% de la pérdida total
- Los planes de acción deben enfocarse a eliminar las causas vitales y por último las triviales

3.2.5 Tipos de mantenimiento

Las estrategias de mantenimiento se clasifican en 4 categorías:

- Mantenimiento Reactivo: Consiste en la reparación de una falla una vez producida. El operador de la maquina es la persona encargada de identificar los defectos de la

máquina, y encargado de avisar al personal especializado para que realice la reparación.

- Mantenimiento Predictivo: Es posible detectar síntomas prematuros de desperfectos o desajustes, un tiempo antes de que se produzca la falla no deseada. A partir de la detección de la falla, es posible estimar el tiempo de vida hasta la falla y, en consecuencia, contar con el tiempo para programar su reparación. Algunas herramientas de mantenimiento predictivo son el análisis de vibraciones, análisis de partículas de desgaste, inspección por ultrasonido, etc.
- Mantenimiento Preventivo: Se realiza a espacios de tiempos, horas o ciclos regulares bien definidos, sin importar el estado del componente. Ejemplo de este mantenimiento son servicios de inspección cíclicos, conservación y restauración de un componente para prevenir, detectar o corregir defectos.
- Mantenimiento Proactivo: Tipo de mantenimiento que pretende determinar la causa raíz que puede provocar una falla funcional con el fin de prevenir o mitigar una falla indeseable.

3.2.6 Conceptos de Mantenimiento

- Tasa de falla

Frecuencia de falla de un activo, expresado normalmente en fallos por hora

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

- Tiempo medio entre fallas (MTBF)

Indica el intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de un fallo; es decir, es el tiempo medio transcurrido hasta la llegada del evento “fallo”. Mientras mayor sea su valor, mayor es la confiabilidad del componente o equipo.

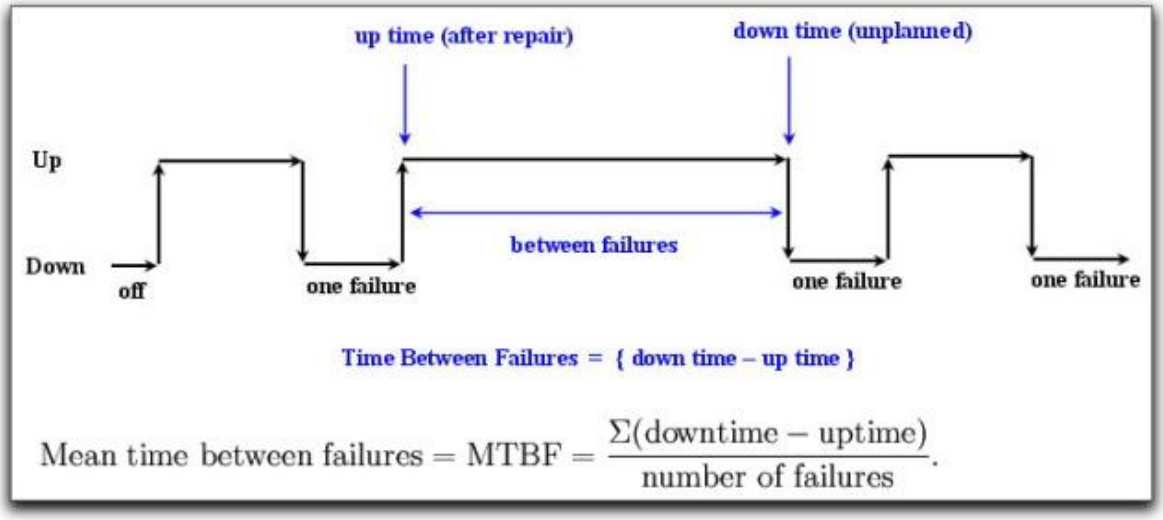


Ilustración 15: Representación de tiempo promedio entre fallas (MTBF). (Izzaldin, 2013)

4 Descripción de la problemática y análisis de ella

El plan matriz que entrega planificación mantención palas no se cumple a cabalidad, provocando que mantenciones preventivas se conviertan en mantenciones correctivas. A raíz de esto, surge la necesidad de corregir las desviaciones que impiden cumplir el plan matriz, para ello se revisaran los procesos de planificación mantención y se identificaran las principales variables que afectan su cumplimiento.

4.1 Procesos de planificación mantención palas

Se revisaron los procesos de planificación mantención palas con el fin de evaluar e identificar los procesos más importantes relacionados con la generación y cumplimiento del plan matriz, para ello se revisará la caja 1: Mapas del Proceso.

Ilustración 16: Ilustración que representa las entradas, procesos y salidas del proceso planificación mantención palas de CMDIC. (Palacio, Esquema de Planificación Mantención Palas, 2017)

Planificación mantención palas se divide en planificación a largo y corto plazo. Las actividades que se planifican en un horizonte superior a un año son actividades que gestiona planificación largo plazo, mientras que las actividades planificadas menor a un año las gestiona planificación a corto plazo.

La planificación a corto plazo comprende los subprocesos de:

- Confiabilidad
- Gestión de repuestos
- Programación

4.1.1 Planificación largo plazo

Planificación a largo plazo es el proceso encargado de desarrollar la planificación del mantenimiento anual y quinquenal, donde se planifican las reparaciones mayores, cambios de componentes, mantenciones preventivas y predictivas, y monitoreos y condiciones. A partir de lo anterior se genera un listado aproximado de componentes a cambiar durante el año, generando el Budget de componentes, estimación de capex y opex de los procesos de mantenimiento.

Para poder desarrollar el plan quinquenal y anual de mantención, primero se debe definir una estrategia de cambio de componentes. Actualmente la estrategia definida desarrolla el mantenimiento de los equipos en serie, es decir, se debe terminar el mantenimiento de un equipo para poder comenzar con otro. Una vez definida la estrategia de mantención, se distribuyen las actividades desplegadas en el sistema Ellipse de acuerdo con la disponibilidad de mano de obra, disponibilidad de repuestos y tiempo de entrega de estos.

A partir del plan anual, planificación largo plazo debe entregar la disponibilidad mensual de los equipos que los calcula en base al tiempo total anual, tiempo de mantenciones preventivas, mantenciones predictivas y mantenciones correctivas.

$$T_{nominal} = 365\ dias * 24\ horas = 8760\ [hrs/año]$$

$$T_{dmant} = T_{nominal} - H_{mant}$$

$$T_{disp} = t_{dmant} - t_{imprevisto}$$

$$disponibilidad = \left[\frac{T_{nominal} - T_{disp}}{Tnominal}\right] * 100$$

La confección del capex del quinquenio se desarrolla en base a lo proyectado por la herramienta de gestión Ellipse, donde se evalúan las posibles inversiones que permitan aumentar la confiabilidad de los equipos por medio de mantenciones preventivas.

Actualmente se desarrollan planes de detenciones mayores que permiten aumentar la confiabilidad de las palas, sin embargo, estas detenciones se proyectan en base al

comportamiento de los equipos, es decir, cuando comienzan a presentarse demasiadas detenciones seguidas se proyecta la realización de una detención mayor.

4.1.2 Planificación a corto plazo

Planificación a corto plazo debe gestionar los recursos necesarios para poder realizar las actividades planificadas en el plan anual, ingresar trabajos clasificados como amenazas (fallas críticas) entregadas por el ingeniero de confiabilidad, ingresar actividades atrasadas (backlogs) y realizar el seguimiento del cierre de los trabajos programados.

Los recursos necesarios que debe gestionar planificación a corto plazo, para poder llevar a cabo las actividades de mantención son:

- Componentes: Pedir los componentes a bodega para la ejecución de la actividad
- Mano de Obra: Compuesta por el personal mecánico, eléctrico y soldador
- Equipos de apoyo: Los conforman las grúas, grúas horquillas, camión grúa, camión alza hombre, camión plataforma, etc.
- Espacio físico de trabajo: Se debe gestionar y preparar suelo para realizar la mantención del equipo

Por otro lado, planificación corto plazo debe incorporar a la planificación mensual, actividades declaradas como amenazas por el ingeniero de confiabilidad. Dichas actividades surgen a partir de las mantenciones predictivas que se realizan, como lo es el monitoreo y condiciones, chequeos por elementos de desgaste, revisión sistema de lubricación, etc.

Además, planificación debe ingresar al plan mensual las actividades planificadas, pero no ejecutadas del mes anterior, denominadas backlogs. Dichas actividades se van ingresando en la medida que cuentan con todos los recursos para su ejecución.

Finalmente, planificación corto plazo debe supervisar el cierre de las ordenes de trabajo, realizando visitas a terreno, hablando con los trabajadores para que cierren las actividades ejecutadas en el sistema Ellipse.

4.1.3 Confiabilidad

Confiabilidad principalmente debe revisar y entregar el listado de amenazas que se han detectado por monitoreo y condiciones, ayudar en la investigación de los análisis causa raíz y hacer visitas a terreno para supervisar las actividades realizadas. Para poder realizar el listado con los componentes críticos, monitoreo y condiciones entrega los resultados obtenido de las mantenciones predictivas y el ingeniero de confiabilidad realiza una matriz de amenazas que permiten ordenar las actividades por criticidad.

Además, realiza visitas a terreno para supervisar el desarrollo de las actividades programadas, y reunir información para los RCA (análisis causa raíz) en el caso de que se halla presentado una falla catastrófica.

4.1.4 Gestión de repuestos y reparables

Repuestos es el proceso encargado de gestionar y disponer de los componentes para las actividades programadas y planificadas a largo plazo, para ello debe revisar diariamente el stock de repuestos disponible en Ellipse, solicitar componentes a bodega, catalogar componentes nuevos en el inventario, sugerir a ingeniero de inventario sobre cambios en los niveles de stock mínimos.

A partir del plan anual, se genera el listado con los componentes a cambiar durante el año y el área de repuestos se encarga de gestionar los componentes y reparables para entregarlos en el horizonte planificado. Una vez que se acerca la fecha de ejecución del plan se van solicitando los repuestos a bodega para la ejecución del plan.

4.1.5 Programación

El proceso de programación debe organizar las actividades planificadas, estableciendo las tareas que se pueden desarrollar en serie o en paralelo y avisar a planificación corto plazo sobre las tareas que no alcanzan a ser programadas. Además, programación debe crear las carpetas de procedimientos para las diferentes especialidades que realizan las actividades de mantención, como mecánicos, eléctricos, soldadores, inspectores y supervisores, incluyendo la orden de trabajo, el procedimiento de trabajo, la verificación de trabajo seguro (VATS), la carta Gantt, la matriz de riesgo y el posicionamiento de equipos.

4.2 Variables que afectan el cumplimiento del plan matriz

Por medio de la caja 6: Conocimiento y Aprendizajes observados, se pudieron identificar las principales variables que afectan el cumplimiento del plan anual de mantención palas, siendo estas:

- Información en el sistema Ellipse
- Imprevistos
- Condiciones Climáticas adversas
- Disponibilidad de repuestos

4.2.1 Información en sistema Ellipse

Se identifico que el área de planificación largo plazo no ingresa su plan de mantención anual al sistema Ellipse, sino que va ingresando los programas de mantenciones en la medida que se aproxima la fecha de ejecución. Sin embargo, con esta medida lo planificado en el plan matriz se va modificando y realizando de acuerdo con la disponibilidad existente semanalmente, provocando que no se soliciten anticipadamente los recursos a utilizar. De forma complementaria se detectó que la mayoría de los componentes no están ingresados en la herramienta de gestión, provocando que no se pueda visualizar una proyección del plan matriz en el sistema.

De un total de 83 componentes para la flota HR, actualmente sólo se han ingresado 16 componentes con su respectiva frecuencia de cambio, lo que equivale a un 19% del total de componentes. De forma similar de un total de 78 componentes de la flota P&H, hasta la actualidad se han ingresado 20 componentes, lo que equivale a un 25% del total.

4.2.2 Imprevistos por falla

Diariamente ocurren fallas en las palas, con tiempos de detención desde 20 minutos hasta 60 horas. Esta es una variable que afecta directamente al plan matriz, ya que se destinan los recursos a las actividades más urgentes.

A continuación, se pueden observar algunas fallas con su respectivo tiempo de detención. Se puede ver con mayores detalles en el anexo 1.

Tabla 1: Muestra detenciones por mantención correctiva de las palas de la compañía CMDIC, ocurridas en el año 2016. (Elaboración propia, 2017)

Sistema	Sub-Sistema	Duración
Empuje	Cambio corredera empuje	58:14:01
Giro	Cambio bomba refrigeración hoist	34:49:57
Frenos	Cambio freno motor propel N° 1	13:12:26
Empuje	Quiebre diente cremallera	9:59:58
Aire	Corte correa compresor	6:23:16
Balde	Reposición caja lainas	2:28:35
Balde	Regulación de pestillo	0:26:45

Además, se identificó que existen fallas que detienen al equipo por más de 100 horas, y que afectaron la producción de la compañía. A continuación, se presenta alguna de estas fallas.

Tabla 2: Muestra las fallas de los equipos de carguío con tiempos de detención superiores a 100 horas, ocurridas en el periodo 2015 a 2016. (Elaboración propia, 2017)

Sistema	**Sub-Sistema**	**Duración**
Levante	Falla transmisión hoist	677:25:39
Rodado	Cambio bastidores y mango	528:00:00
Giro	Falla polines de tornamesa	437:30:19
Propulsión	Eje propel derecho cortado	353:38:12
Rodado	Falla rodillos guía	225:01:43
Electro	Cambio transformador principal	109:15:53

A partir del historial de falla obtenido por el sistema Dispatch, se procedió a analizar el historial con el fin de calcula tasa de falla de los equipos, y así poder tener una noción de indisponibilidad mensual por falla. Este análisis se realizó para fallas superiores a los 30 minutos de detención, ya que es el tiempo mínimo que demora el personal de mantención en llegar al equipo.

Para obtener la tasa de falla mensual, se utilizó el historial de falla comprendido entre los años 2015 a 2016, en donde primero se calculará el tiempo medio entre fallas por equipo, obteniendo:

Tabla 3: Calculo del tiempo medio entre fallas para los equipos de carguío expresado en horas. (Elaboración propia, 2017)

MTBF [Hrs]												
Equipo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
PA06	28,76	28,76	30,38	20,38	25,20	26,51	27,58	21,92	27,61	19,07	17,53	20,94
PA08	26,63	18,87	27,78	27,49	18,50	16,11	22,02	33,59	26,58	27,22	24,45	24,06
PA09	18,69	19,44	23,01	31,17	21,02	19,55	14,40	15,99	27,14	21,46	15,79	19,37
PA10	25,05	25,62	23,28	28,70	23,03	22,41	19,82	30,12	37,34	30,28	33,98	29,52
PA11	17,34	20,45	24,01	25,93	33,60	20,68	21,04	21,65	24,22	33,24	20,60	19,99
PA12	41,90	38,70	41,55	68,54	36,36	46,47	37,35	28,94	53,72	29,36	40,19	45,55
PA13	29,96	39,59	33,52	31,90	26,59	44,23	37,29	31,60	29,30	22,92	26,34	30,83
PA14	46,41	51,91	39,22	38,51	54,17	31,92	35,36	40,36	42,38	41,19	48,79	33,64

Sabiendo que:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

Se procedió a calcular la tasa de falla mensual.

Tabla 4: Se puede observar la tasa de falla mensual obtenida para las diferentes palas, en donde está representada en fallas por hora. (Elaboración propia, 2017)

Tasa de Falla [Fallas/hrs]												
Equipo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
PA06	0,035	0,035	0,033	0,049	0,040	0,038	0,036	0,046	0,036	0,052	0,057	0,048
PA08	0,038	0,053	0,036	0,036	0,054	0,062	0,045	0,030	0,038	0,037	0,041	0,042
PA09	0,053	0,051	0,043	0,032	0,048	0,051	0,069	0,063	0,037	0,047	0,063	0,052
PA10	0,040	0,039	0,043	0,035	0,043	0,045	0,050	0,033	0,027	0,033	0,029	0,034
PA11	0,058	0,049	0,042	0,039	0,030	0,048	0,048	0,046	0,041	0,030	0,049	0,050
PA12	0,024	0,026	0,024	0,015	0,027	0,022	0,027	0,035	0,019	0,034	0,025	0,022
PA13	0,033	0,025	0,030	0,031	0,038	0,023	0,027	0,032	0,034	0,044	0,038	0,032
PA14	0,022	0,019	0,025	0,026	0,018	0,031	0,028	0,025	0,024	0,024	0,020	0,030

Además, se calculó el tiempo promedio por falla, para cada equipo, con el fin de poder tener una estimación de la indisponibilidad por imprevisto.

Tabla 5: Muestra los tiempos promedios mensuales de detención por falla para cada pala. (Elaboración propia, 2017)

MTTF												
Equipo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem	Octubre	Noviem	Diciemb
PA06	2:06:57	3:19:52	7:06:35	13:34:05	3:32:47	2:39:39	6:31:21	11:41:38	1:53:00	2:03:18	2:59:50	9:51:34
PA08	4:37:12	3:18:00	3:57:54	2:21:04	2:49:34	4:21:47	5:30:47	26:32:22	2:24:33	3:15:36	1:31:18	7:50:31
PA09	04:21:26	03:18:00	03:00:33	02:28:22	03:11:41	05:03:49	04:10:45	03:44:21	01:58:47	01:59:23	05:03:06	02:11:39
PA10	4:09:14	4:36:08	3:02:44	2:38:07	5:56:11	6:12:30	2:33:31	2:38:44	3:38:50	11:35:16	3:49:03	4:36:17
PA11	2:25:33	2:36:42	2:05:08	2:17:31	2:07:32	1:50:31	1:51:38	1:57:45	3:52:58	2:00:56	1:46:25	1:34:10
PA12	03:48:29	02:03:54	01:57:34	01:26:35	01:21:08	01:30:36	02:47:49	02:30:39	02:13:49	02:27:15	02:35:43	03:34:03
PA13	02:12:08	02:20:12	11:34:02	01:59:04	02:30:44	02:07:09	02:00:05	02:20:40	01:47:15	02:01:14	04:18:25	12:17:36
PA14	1:46:01	2:01:00	2:44:33	1:49:17	1:57:45	1:33:54	4:58:23	3:10:59	1:57:49	2:45:46	2:44:49	7:37:04

Posteriormente se procedió a calcular la indisponibilidad por mantenimiento correctivo a partir de la tasa de falla y el MTTF, para ello primero se debe calcular el número de fallas en el periodo.

$$N°Fallas = \lambda * Tiempo\ despues\ de\ mantención\ preventiva/predictiva$$

$$Indisp.por\ falla = N°Fallas * MTTF$$

Se asumirá un tiempo post mantenciones preventivas y predictivas de 600 hrs para calcular el número de fallas, debido a que es tiempo promedio que utiliza planificación en su plan matriz

Tabla 6: Muestra los tiempos por mantención correctiva, calculado a partir de la tasa de falla de los equipos. (Elaboración propia, 2017)

Indisponibilidad por Falla [Hrs]												
Equipo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PA06	45	66	209	323	80	58	179	254	59	70	86	271
PA08	104	105	86	51	92	163	150	474	54	72	37	196
PA09	140	102	78	48	91	155	174	140	44	56	192	68
PA10	100	108	79	55	155	166	77	53	59	230	67	94
PA11	84	77	52	53	38	53	53	54	96	36	52	47
PA12	55	32	28	13	22	19	45	52	25	50	39	47
PA13	44	35	207	37	57	29	32	45	37	53	98	239
PA14	23	23	42	28	22	29	84	47	28	40	34	136

Además, se presentan los valores estimados por planificación para la indisponibilidad por imprevisto.

Tabla 7: Muestra los tiempos estimados por planificación para las detenciones por imprevisto. (Elaboración propia, 2017)

Indisponibilidad por Falla [Hrs]												
Equipo	Ene	Feb	Ma	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sept	Oct	Nov	Dic
PA06	43	41	0	44	43	42	43	43	42	43	44	43
PA08	43	39	43	42	45	42	43	43	42	43	42	43
PA09	45	39	43	42	43	42	43	43	42	45	42	43
PA10	43	39	45	42	43	42	43	43	42	43	44	43
PA11	37	33	37	36	37	36	37	39	36	37	36	37
PA12	37	33	37	36	37	38	37	37	36	37	36	37
PA13	39	33	37	36	37	36	37	37	38	37	36	37
PA14	37	33	39	36	37	36	37	37	36	37	38	37

Comparando los valores obtenidos en la tabla 6 con los valores presentados la tabla 7, siendo esta última tabla los valores estimados en el plan matriz, se puede ver que estos valores difieren significativamente y se puede establecer a priori que la indisponibilidad estimada por planificación subestima los tiempos reales de detención por mantención correctiva. Para

corroborar esta afirmación, se procedió a recopilar los tiempos de detención por imprevisto para los periodos de enero a marzo del 2017.

Tabla 8: Muestra los tiempos reales de detención por imprevisto. (Elaboración propia, 2017)

Tiempo real de Mant. Correctivo			
Equipo	Enero	Febrero	Marzo
PA06	57	56	94
PA08	58	35	31
PA09	188	66	74
PA10	92	35	74
PA11	55	54	20
PA12	20	16	25
PA13	132	6	28
PA14	20	7	28

Al comparar la tabla 7 con la tabla 8, se puede verificar que para la flota HR los tiempos estimados por planificación mantención palas son subestimado con lo ocurrido en la realidad.

Por otro lado, a partir del historial de falla entregado por el sistema Dispatch, se realizó un análisis de Pareto para poder identificar las fallas más críticas y, por ende, los componentes más críticos de cada equipo.

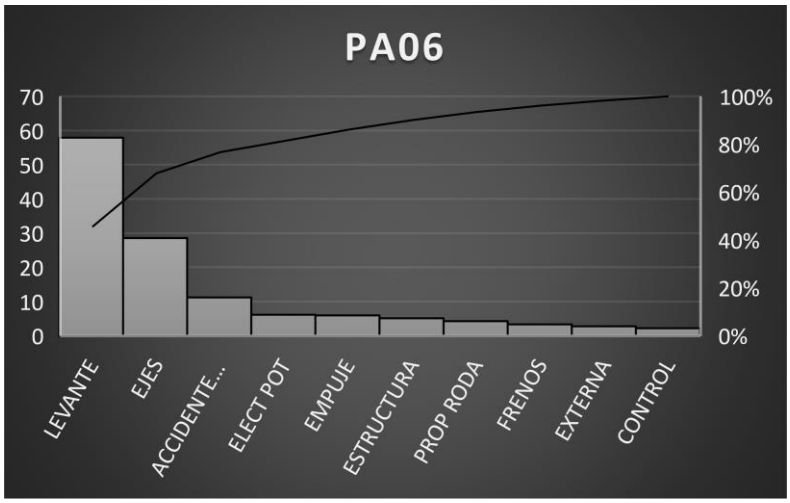


Gráfico 1: Gráfico de Pareto realizado al historial de falla de la pala 06, donde muestra que el sistema de levante es el sistema más crítico con tiempos de detención de 58 horas promedio por falla. (Elaboración propia, 2017)

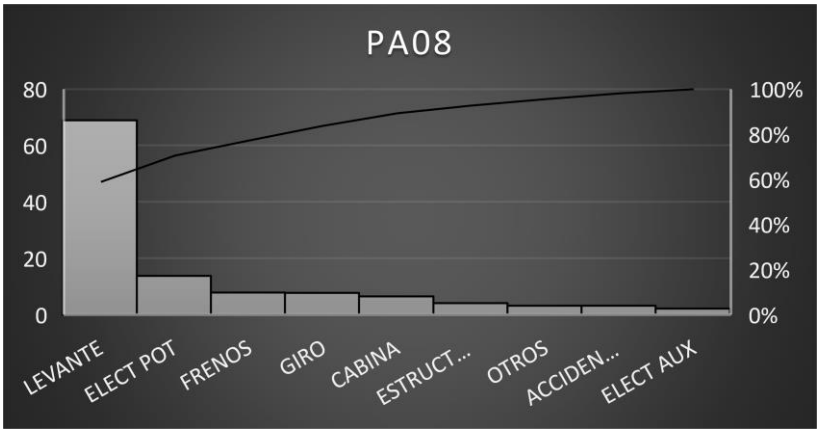


Gráfico 2: Gráfico de Pareto realizado al historial de falla de la pala 08, donde muestra que el sistema de levante es el sistema más crítico con tiempos de detención de 68 horas promedio por falla. (Elaboración propia, 2017)

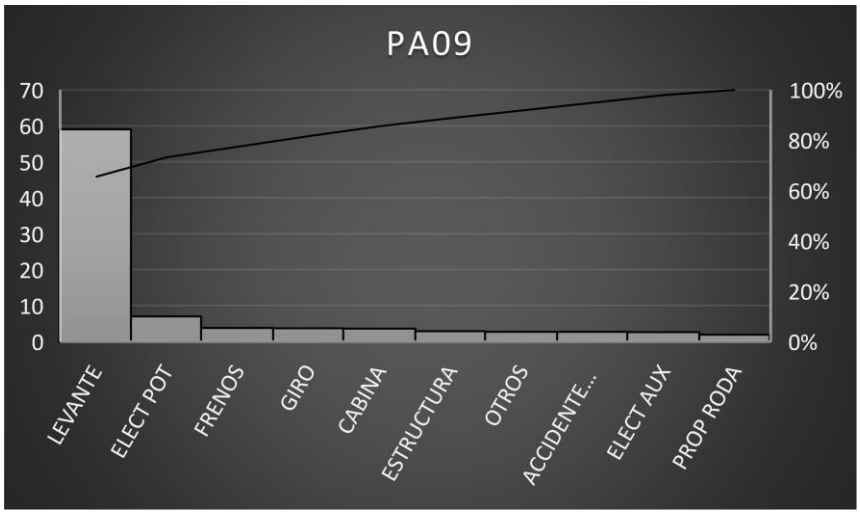


Gráfico 3: Gráfico de Pareto realizado al historial de falla de la pala 09, donde muestra que el sistema de levante es el sistema más crítico con tiempos de detención de 60 horas promedio por falla. (Elaboración propia, 2017)

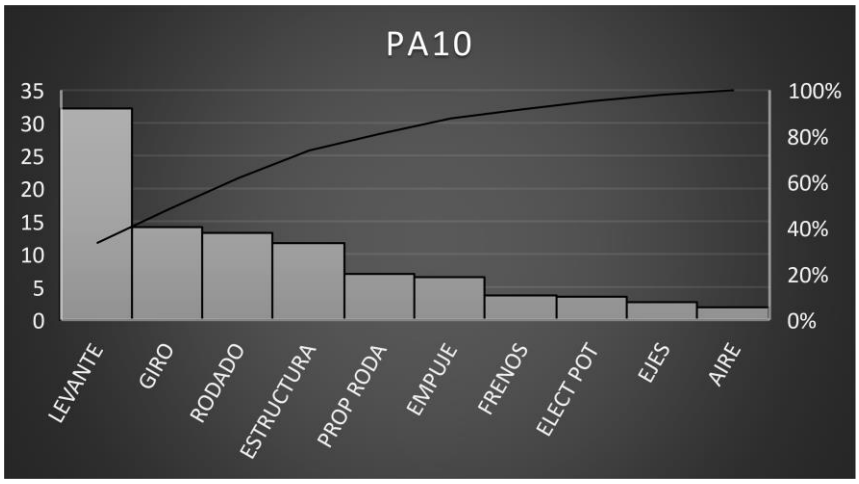


Gráfico 4: Gráfico de Pareto realizado al historial de falla de la pala 10, donde muestra que el sistema de levante es el sistema más crítico con tiempos de detención de 30 horas promedio por falla. (Elaboración propia, 2017)

Se identificó que el sistema más crítico es el sistema de levante, en donde el sub sistema transmisión Hoist es la falla más crítica en la flota HR, generando tiempos de detención hasta de 600 horas, mientras que haber realizado una mantención preventiva, hubiera detenido el equipo por 180 horas.

En la flota P&H no se identificó una tendencia de falla, por lo que no se puede identificar una falla crítica para la flota.

Como se mencionó anteriormente las actividades correctivas desplazan las actividades planificadas, y esto se puede ver reflejado en la distribución de personal para las actividades planificadas versus no planificadas.

Distribución de personal frente a actividades planificadas

Actividad	Personal
Mantención Planificada	8 mecánicos y 4 eléctricos
Mantención no planificada	2 mecánicos y 2 eléctricos
Actividades Misceláneas (Preparativos Mantenciones, Limpieza De Áreas, etc)	3 mecánicos

Distribución de personal frente a actividades correctivas

Actividad	Personal
Mantención Planificada	**3** mecánicos y **2** eléctricos
Mantención no planificada	**8** mecánicos y **4** eléctricos
Actividades Misceláneas (Preparativos Mantenciones, Limpieza De Áreas, etc)	2 mecánicos

Cuando ocurre un imprevisto de gran envergadura que amenaza la continuidad operacional, así como el fallo de una transmisión, el fallo de un motor o el fallo de un eje, parte del personal que estaba destinado a realizar las mantenciones planificadas, se envía a atender la mantención correctiva, prolongando el tiempo de detención de la actividad planificada o no realizando la actividad programada.

4.2.3 Condiciones Climáticas

Las palas tienen una altura promedio de 20 [m] y debido a su gran tamaño y limitada movilidad, las mantenciones se realizan al aire libre.

Ilustración 17: Muestra la comparación física entre una persona y una pala electromecánica. (Elaboración propia, 2017)

Los meses más críticos son los meses de enero, febrero y marzo, donde los equipos están expuestas al invierno altiplánico, que consiste en tormentas eléctricas, fuertes lluvias y vientos fuertes principalmente; y en los meses de mayo, junio y julio los equipos están expuestos al invierno continental, que consiste en temperaturas bajo cero, alta probabilidad de nevadas y fuertes ráfagas de viento.

Debido a las condiciones climáticas que se presentan algunas actividades de mantención duran más del tiempo planificado, y otras no se realizan por las eventualidades presentadas.

4.2.4 Disponibilidad de componentes

Los componentes se van solicitando a bodega de acuerdo con la planificación del plan mensual. A su vez los componentes se compran o reparan de acuerdo con lo solicitado por el

plan matriz, para tener su disponibilidad cuando llegue el momento de cambiar el componente. Sin embargo, algunos de ellos no están disponibles al momento de programar la actividad debido principalmente a demoras en el tiempo de entrega de reparables, provocando retrasos en las actividades planificadas, y, por ende, que los componentes trabajen por sobre su tiempo entre Overhaul (TBO).

Los componentes que se reparan se envían a talleres externos a la compañía, en donde existe una persona CMDIC encargada de visitar las reparaciones con el fin de realizar un QA/QC (aseguramiento y control de la calidad) de los procesos de reparación.

CMDIC tiene la política de mantener la menor cantidad de componentes en stock, con el fin de no mantener capital detenido, sin embargo, el stock actual de algunos componentes no alcanza a satisfacer la demanda de cambios en el año, u existen componentes que su tiempo de reparación excede el tiempo que se tiene estimado para el próximo cambio, potenciando posibles fallas.

De los gráficos de Pareto expuestos anteriormente se pudo observar que el sistema de levante es el sistema más crítico, generando detenciones superiores a las 50 horas por falla, identificando la transmisión hoist como la más crítica en la flota HR

Al revisar el stock de componentes se pudo identificar que existe un reparable para cada flota, y al realizar la proyección de cambio de componentes en la flota P&H se pudo observar que el stock actual no satisfacerá la demanda anual de mantenimiento preventivo, ya que existe un reparable para toda la flota.

Tabla 9: Proyección del TBO de las transmisiones de levante para la flota P&H. (Elaboración propia, 2017)

Equipo	Fecha de Mantenimiento Preventivo
PA11	2017-04-19
PA12	2017-08-09
PA13	2019-01-01
PA14	2019-11-18

Al realizar la proyección de cambios de componentes, en el presente año el cambio de la transmisión Hoist en la pala 12 deberá atrasarse debido a que el componente reparado de la

pala 11 no alcanzaran a estar reparado en el periodo de 4 meses que arroja la programación, ya que el periodo de reparación mínimo es de 6 meses, generando una brecha de 2 meses en que el componente trabajará por sobre su TBO.

5 Propuesta de mejoras al proceso de planificación mantención palas y Potenciales beneficios

En el capítulo anterior se analizaron los procesos de planificación y las variables que lo afectan, y se pudieron identificar oportunidades de mejoras que ayudaran a dar cumplimiento del plan matriz.

Todas las propuestas de mejoras descritas a continuación reflejarán resultados a largo plazo, donde sus resultados mostrarán un aumento en la disponibilidad de los equipos, disminución de mantenciones correctivas,

A continuación, se propondrán mejoras a los procesos de planificación en función de las falencias identificadas.

5.1 Herramienta de gestión Ellipse

La herramienta de gestión Ellipse permite proyectar una versión preliminar de las mantenciones preventivas y predictivas. Para facilitar los procesos de planificación y evitar problemas de duplicidad de planes, se propone ingresar la mayor cantidad de componentes que se cambien por mantención preventiva con su respectivo TBO para tener una versión más robusta del plan matriz.

Además, al ingresar la mayor cantidad de mantenciones preventivas y predictivas, permitirá desplegar y gestionar los recursos de mejor manera para llevar a cabo dicho plan. Un ejemplo sería la capacidad de personal en los periodos que se desee evaluar, reflejará los periodos donde se requiera mayor personal para ejecutar las actividades, permitiendo organizar el personal o contratar de ser necesario.

Finalmente, las distintas áreas que componen la compañía podrán visualizar las actividades programadas y con ello relacionarse de mejor manera para la obtención de recursos, como es el caso de los equipos auxiliares.

5.2 Actividades frente a condiciones climáticas adversas

Como se presentó en el capítulo 4, los meses de enero, febrero, marzo, mayo, junio y julio son los meses más críticos para la producción de la mina. Con el fin de disminuir los imprevistos y accidentes operacionales, se propone posponer o adelantar las actividades durante los eventos climáticos.

Se identifico que las mantenciones que requieren de izaje presentan un mayor riesgo para el personal al ser realizadas con condiciones climáticas adversas, por otro lado, las actividades de soldadura y tratamientos térmicos, no se deben realizar debido a la falta de condiciones mínimas de trabajo para asegurar la calidad de las piezas tratadas.

Las actividades que se pueden ejecutar sin incurrir en un riesgo para el personal, ya que el operador trabajará al interior del equipo, son:

- Pautas de mantención eléctrica
- Pautas de mantención mecánica
- Monitoreo y condiciones
- Alumbrado exterior
- Pruebas dinámicas eléctricos
- Pruebas dinámicas mecánicas
- Mantención cabina del operador
- Medición y ajuste de shipper shaft y correderas palas P&H
- Intervención o cambio de cuchillas de alta tensión palas P&H

Planificación corto plazo deberá informarse semanalmente de las condiciones meteorológicas, con el fin de poder adelantar o posponer actividades sin que coincida con eventos climáticos.

5.3 Respetar mantenimientos preventivos definidos por TBO

Para poder minimizar los imprevistos o disminuir la duración de estos, primero se debe atacar la causa raíz, donde se pudo identificar que las mantenciones preventivas no se desarrollaban en el tiempo planificado o se realizaban muy posteriormente a lo establecido, y los requerimientos de trabajo (WR) no se atendían con la urgencia que correspondía. Para poder evitar que se desplacen las mantenciones preventivas por los imprevistos, se debe planificar actividades preventivas en paralelo con algún evento correctivo con el fin de proyectar el personal con holgura.

5.4 Compra de nuevos componentes

Como se vio en el ítem 4.2.4, al realizar la proyección del plan matriz, el componente de transmisión Hoist no alcanzará a estar reparado para la proyección de cambio de componente de la pala 12. Es por esto por lo que surge la necesidad de revisar si la compra de otro componente compensa los tiempos de detención por imprevisto.

Al revisar el historial de falla se pudo observar que en promedio los tiempos de detención por falla de la transmisión de levante son superiores a las 572 horas, por lo cual con este promedio se evaluará la oportunidad de comprar otro componente.

Para evaluar el costo de oportunidad de la compra de otra transmisión de levante, a continuación, se entregará la información necesaria para realizar dicho análisis.

Los sub componentes de la transmisión de levante y sus costos son:

Tabla 10: Muestra los principales subcomponentes de la transmisión hoist y el costo del sub componente nuevo expresado en dolares. (Elaboración propia, 2017)

Sub componente	Costo [$]
1° Reducción delantera hoist	304050,6
1° Reducción trasera hoist	304050,6
Reducción interior delantera Hoist	578697,7
Reducción interior trasera Hoist	586509,2
Motor hoist delantero	388657,7
Motor hoist trasero	388657,7

Además, realizar una mantención preventiva de la transmisión Hoist detiene el equipo por 150 horas.

Por otro lado, se identificó la producción de cobre fino del año 2015, llegando a ser 455.300 toneladas. Al mismo tiempo, se obtuvo el dólar observado para el periodo 2015, siendo de $2,49 [US/Lb]. (Cochilco, 2015)

La conversión de libra a kilogramo de cobre es:

$$1\ [lb] = 0{,}454\ [Kg]$$

Por lo tanto, el precio del cobre representado en [US/Kg] es de 5,53.

Se identifico que los equipos de carguío en promedio trabajan 595 horas mensuales y 7142 horas al año. Si se multiplica las 7142 horas anuales por 9 palas que trabajan directamente con la extracción de mineral, se obtiene 64282 horas operacionales anual.

Para cuantificar la producción de cobre por hora, la producción anual del año 2015 se dividió por las horas anuales operativas de las palas.

$$Producción\ Cu\ \left[\frac{Ton}{hr}\right] = \frac{Producción\ de\ Cobre\ 2015}{Hrs.\ anuales\ operativas}$$

$$Producción\ Cu = \frac{455300\ [Ton]}{64282\ [Hrs.\ anuales]} = 7,08\ \left[\frac{Ton}{hr}\right] = 7082{,}9\ \left[\frac{Kg}{hr}\right]$$

Finalmente, la producción de cobre evaluada en dolares por hora es:

$$Producción\ de\ Cu\ por\ hora = Producción\ Cu\left[\frac{Kg}{hr}\right] * Precio\ Cu\ \left[\frac{US}{Kg}\right]$$

$$Producción\ Cu\ por\ hora = 7082{,}9\ \left[\frac{Kg}{hr}\right] * 5{,}48\ \left[\frac{US}{Kg}\right] = 38.814.3\ \left[\frac{US}{hr}\right]$$

De esta manera, procederá a calcular el costo de oportunidad de la compra de una transmisión de levante.

$$Costo\ de\ Op. = Diferencia\ de\ producción * Producción\ Cu\ por\ hora$$

$$Diferencia\ de\ producción = Hrs.Mant.Correctiva - Hrs.Mant.Preventiva$$

$$Diferencia\ de\ producción = 572 - 150 = 422\ [horas]$$

$$Costo\ de\ Op. = 422 * 38.814{,}3 = \$16.379.635\ [US]$$

$$Equivalencia\ porcentual = \frac{Costo\ componente}{Costo\ de\ Op.}\ \%$$

$$Equivalencia\ porcentual = \frac{2.550.623}{16.379.635} = 15\%$$

La falla de la transmisión hoist detiene el equipo por 572 horas, versus una mantención preventiva que detiene el equipo 150 horas. Al realizar la resta de estos datos y multiplicarlo por la producción de cobre por hora, se obtiene que se podrían haber generado $16.379.635 dólares. Por tanto, el costo de ineficiencia al haber mantenido el equipo detenido justifica la compra de una nueva transmisión, ya que representa el 15% de la producción de cobre que se pudo haber generado.

5.5 Definir plan de mantenimiento de acuerdo con la fase que se encuentre el activo

Actualmente todas las palas de la compañía presentan el mismo plan de mantenimiento, definido principalmente por las mantenciones preventivas y cambio de componentes según TBO, sin embargo, de acuerdo con la fase en que se encuentre el equipo, este puede tener que estar expuesto a mayores exigencias debido a las condiciones del mineral a extraer.

Se propone definir un plan de mantenimiento de acuerdo con las condiciones de la fase en que se encuentren trabajando los equipos (granulometría del mineral, dureza del terreno, humedad, etc), para ello se deberá analizar la información respectiva de cada fase y aplicar un nuevo plan de mantenimiento según el área de operación.

5.6 Ingresar toda la información en la orden de trabajo del sistema Ellipse

Ingresar toda la información en la orden de trabajo (OT) no tan solo ayudará a tener toda la información en el sistema, sino que también permitirá realizar análisis de tiempos de detención, costos de las actividades y personal requerido para ejecutarlas.

Al ingresar el personal requerido para ejecutar la actividad en la OT, se podría realizar un análisis de si el personal actual es suficiente para ejecutar las actividades o si se necesita más personal para desarrollarlas.

Por otro lado, ingresar los costos de la actividad de mantenimiento permitirá obtener los costos asociados a determinada actividad y obtener de forma instantánea los OPEX del periodo que se quiera evaluar.

5.7 Aumentar personal para realizar mantenciones o externalizar el servicio

Como se revisó en el capítulo anterior, los imprevistos en algunas ocasiones desplazan el plan matriz debido a que se priorizan las actividades correctivas, debido a esto se propone aumentar la capacidad de personal para ejecutar ambas actividades de mantenimiento. Para ello, se deberán estudiar las actividades correctivas que desplazaron las actividades planificadas y posteriormente realizar una proyección de personal para ejecutar las actividades futuras.

Otra propuesta de mejora es externalizar el servicio de mantenimiento, estableciendo la disponibilidad de los equipos como KPI a controlar, para ello se deberá realizar un análisis económico de la implementación de contratos con empresas externas versus el costo del actual plan de mantenimiento y su ejecución.

6 Cuantificación de beneficios de la implementación de mejoras a los procesos de planificación

Para poder cuantificar los beneficios de la aplicación de las mejoras, se expresará en términos de disponibilidad de los equipo post mantenciones. La evaluación se realizó con respecto al año 2016, ya que se poseen todos los datos para generar resultados significativos. En anexos se pueden observar la disponibilidad de los equipos antes de las mejoras, y la proyección de disponibilidad después de las mejoras.

La flota HR es la que se verá más beneficiada con la implementación de las mejoras, debido a que aumenta en un mayor porcentaje su disponibilidad, aumentando en un 5% la disponibilidad de la flota. Este aumento en la disponibilidad de la flota se debe principalmente a que redujeron ciertos tiempos de detención a las palas, que superaban las 200 horas de detención.

Por otro lado, la flota P&H aumento en un 3% su disponibilidad, en donde se redujeron diferentes tiempos de detención por mantenciones correctivas, versus si se hubieran realizado por mantención preventiva.

Si los porcentajes de disponibilidad se cuantificaran en dólares, quedarían representados como:

Flota HR

$$Costo\ Oportunidad = Disp * año * \$hora = 0{,}05 * (365 * 24) * 38.814{,}3 \left[\frac{US}{hr}\right]$$

$$Costo\ Oportunidad = 17.000.663\ [US]$$

Flota PH

$$Costo\ Oportunidad = 10.200.398\ [US]$$

Si no se hubieran generado los imprevistos presentados en el capítulo anterior, el año 2016 se pudieron haber generado $27.201.061 [US] más sobre la producción obtenida durante ese periodo.

7 Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo de título se presentaron propuestas de mejoras, a partir de la necesidad de robustecer el plan matriz de mantención palas electromecánicas, definiendo los objetivos presentados y el posterior análisis de la información recopilada, para detectar posibles oportunidades de mejoras. Sin duda, al recopilar información de los trabajadores y sistemas de información, análisis de esta e identificación de falencias, se pudo cumplir con los objetivos necesarios para desarrollar el trabajo descrito.

Junto con ello, de las actividades que no permiten cumplir con el plan matriz mantención palas electromecánicas, se clasificaron en variables exógenas tales como los imprevistos y condiciones climáticas adversas, y como variables endógenas la falta de información en el sistema Ellipse, indisponibidad de personal.

Dentro de las variables exógenas, para poder minimizar los imprevistos el personal de planificación debe respetar los mantenimientos preventivos definidos por el fabricante o por monitoreo y condiciones, ya que, si no se cumplen estos, seguirán ocurriendo mantenciones no planificadas y con ello, desplazándose actividades programadas. Por otro lado, para poder enfrentar las condiciones climáticas adversas, el área de planificación deberá estar constantemente informado sobre las condiciones meteorológicas, organizando las actividades de acuerdo con la factibilidad de poder realizarlas con eventos extremos.

Dentro de las variables endógenas, se proyecta una amenaza en la disponibilidad de componentes para la flota P&H, ya que, no se ha definido un plan de mantenimiento que desarrolle ambas actividades en paralelo.

Actualmente existe un único plan de mantenimiento definido para las palas electromecánicas, siendo que trabajan en distintas fases y están sometidas a distintas exigencias, identificando una mejora que plantee un plan de mantenimiento dependiendo del sector que trabaje el activo.

Aplicando las mejoras presentadas, se estima un aumento en la disponibilidad mensual de los equipos de carguío en un 5% en la flota HR y un 3% en la flota P&H; es decir, se proyecta una mayor extracción de mineral gracias a la optimización de las actividades presentadas.

Finalmente, el resultado de las propuestas de mejoras mencionadas en los capítulos anteriores, se verán reflejadas en un horizonte a largo plazo (mayor a 1 año), por lo que, quedarán reflejadas en la caja 1: mapa de proceso, del ciclo gestión de riesgo.

De los antecedentes recopilados, se recomienda:

- Utilizar la herramienta de gestión Ellipse como parte de los procesos de planificación del área, ya que con ella se puede gestionar de mejor manera la información ingresada tanto a nivel de área como a nivel de compañía.
- Al comprar equipos consecutivamente se recomienda organizar las mantenciones de ellos, junto con el abastecimiento de repuestos.
- Junto con lo anterior, se recomienda un cambio de actitud a nivel de compañía, donde los costos asociados a mantenimiento sean observados más bien como una inversión para los activos y no como costos operacionales.
- Además, se recomienda respetar cambio de componentes definidos por la frecuencia de fabricante, ya que ejecutando estos, se reducirán directamente los imprevistos.
- Definir un plan de mantenimiento de acuerdo la zona donde trabaje el activo, ya que, dependiendo de las condiciones del terreno, mineral extraído, los equipos estarán sometidos a diferentes exigencias.

8 Referencias

BUCYRUS. (s.f.). *Manual de mantenciones y operaciones palas electricas 495HR N°10213.* BUCYRUS INTERNATIONAL, Inc.

CMDIC. (2016). *Ilustración del CGR.* Iquique: Reunión de ciclo gestión de riesgo.

CMDIC. (2017). *Reporte Anual de Cobre por Mina en Chile.* Iquique: CMDIC.

CMDIC. (s.f.). *Collahuasi*. Obtenido de Producción de cobre: http://www.collahuasi.cl/que-hacemos/nuestra-operacion/

Cochilco. (2015). *Boletin Cochilco*. Obtenido de http://boletin.cochilco.cl/estadisticas/grafico.asp?tipo_metal=1

CODELCO. (2017). *Codelco Educa*. Obtenido de Equipos de carguío a rajo abierto: https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/escolares_extraccion_equipos_asociadoscarguioacieloabierto.asp

Google. (20 de Mayo de 2017). *GoogleMaps*. Obtenido de https://www.google.cl/maps/search/mirera+collahuasi,+iquique/@-20.9871968,-68.6910655,14150m/data=!3m1!1e3

Google. (20 de Mayo de 2017). *GoogleMaps*. Obtenido de https://www.google.cl/maps/search/mirera+collahuasi,+iquique/@-20.8286973,-68.8924321,9.22z”

Izzaldin. (2013). *Linkedin*. Obtenido de MTBF-MTBM: https://www.linkedin.com/pulse/mtbf-mttr-mtbm-reliablility-metrics-mohamed-izzaldin-ahmed/

Ludovico, R. (2015). *Linkedin*. Obtenido de Ciclo PDCA: https://www.linkedin.com/pulse/itil-v3-foundations-self-study-my-two-cents-ludovico-ristori/

P&H. (s.f). *Manual de mantenimiento de sistemas mecánicos Pala Eléctrica Minera P&H 4100XPC (Libro 1).* P&H MinePro Services.

Palacio, J. (2017). Esquema de Planificación Mantención Palas. Iquique, Región de Tarapaca: Jacqueline Palacio.

Palacio, J. (2017). Ilustración de mantención pala electromecánica. Iquique, Región de Tarapaca: Jacqueline Palacio.

Palacio, J. (2017). Tiempo detención de fallas. Iquique, Región de Tarapaca: Jacqueline Palacio.

Peak Services. (s.f.). *Manual de entrenamiento de sistemas mecánicos 4100 XPC (AC).* P&H MinePro Services.

Pistarelli, A. (2010). *Manual de Mantenimiento: Ingeniería, Gestión y Organización.* Buenos Aires: R y C.

ShamesS, J. (2017). *Integrales multiples.* chicago: Anta.

9 Anexos

Anexo 1

Tabla 11: Muestra detenciones por mantención correctiva de las palas de la compañía CMDIC. Hoist= levante, swing= giro, crownd= empuje y propel =propulsión.

Sistema	Sub-Sistema	Duración
Empuje	Cambio corredera empuje	58:14:01
Electro Potencia	Cambio motor hoist	50:31:22
Electro Potencia	Cambio motor crowd	43:56:12
Empuje	Falla transmisión abrir balde	37:34:07
Giro	Cambio bomba refrigeración hoist	34:49:57
Cables	Cambio cable levante	24:27:45
Rodado	Zapata cortada	22:24:31
Estructura	Reparación fisura en balde	20:30:13
Sistema Lubricación	Corte de línea de lubricación	16:18:04
Frenos	Cambio freno motor propel N° 1	13:12:26
Propulsión de Rodado	Se repone pasador de oruga	11:13:57
Electro Auxiliar	Problema partida equipo	10:24:05
Empuje	Quiebre diente cremallera	9:59:58
Frenos	Falla freno crowd	7:26:58
Aire	Cambia válvula escala acceso	7:20:28
Electro Auxiliar	Falla ventiladores proppel	06:33:37
Aire	Corte correa compresora	6:23:16
Balde	Regulación de pestillo	6:11:08
Balde	Se repara tapa balde quebrada	5:41:40
Empuje	Se solda collerin de mango	5:32:41
Control	Falla sistemas de mando	03:42:25
Cables	Corta cable abrir balde	03:34:08
Frenos	Cambio sello freno hoist	3:32:03
Accidente Operacional	Corta cable de cola	3:16:42
Cables	Cable de izaje fuera de lugar	3:15:28
Levante	Temperatura eje transmisión	02:58:30

Balde	Reposición caja lainas	2:28:35
Giro	Relleno aceite por alarma	2:27:51
Control	Falla control giro	2:18:03
Aire	Baja presión aire	0:56:18
Empuje	Tensado correas empuje	0:55:36
Balde	Regulación freno tapa balde	0:49:46
Control	Cambio joystick de mando	0:45:16
Balde	Caída de punta	0:40:02
24v	No sube escalera acceso	0:39:43
Propulsión de Rodado	Reposición línea aire freno propel	0:33:13
Estructura	No sube escala acceso	0:30:42
Balde	Regulación de pestillo	0:26:45

Anexo 2

Tabla 12: Para la pala 06, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación.

PA06	Enero	febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov.	Dic
Horas Totales	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
Mant. Preventiva	65,59	86,38	48,56	0,00	25,87	58,94	149,31	80,89	67,51	101,88	55,76	84,83
Mant. Correctiva Antes de mejoras	34,50	46,41	307,11	677,13	97,41	61,47	153,98	116,24	55,51	63,03	141,25	147,73
Mant. Correctiva después de mejoras	34,50	46,41	233,11	150,13	97,41	61,47	153,98	116,24	55,51	56,03	141,25	58,73
Disponibilidad Antes	87%	81%	52%	6%	83%	83%	59%	74%	83%	78%	73%	69%
Disponibilidad después	87%	81%	62%	79%	83%	83%	59%	74%	83%	79%	73%	81%

Tabla 13: Para la pala 08, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación.

PA08	Enero	febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov.	Dic
Horas Totales	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
Mant. Preventiva	74,82	17,61	73,19	46,65	142,83	125,28	3,30	85,27	55,80	45,00	142,26	99,92
Mant. Correctiva Antes de mejoras	142,52	153,32	82,67	80,32	163,23	447,93	60,11	26,03	29,30	52,82	20,36	356,17
Mant. Correctiva después de mejoras	71,52	153,32	82,67	80,32	163,23	44,93	27,11	26,03	29,30	52,82	20,36	282,17
Disponibilidad Antes	71%	75%	79%	82%	59%	20%	91%	85%	88%	87%	77%	39%
Disponibilidad después	80%	75%	79%	82%	59%	76%	96%	85%	88%	87%	77%	49%

Tabla 14: Para la pala 09, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación.

PA09	Enero	febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov.	Dic
Horas Totales	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
Mant. Preventiva	69,12	131,61	45,19	98,77	19,02	62,31	0,00	4,54	102,58	57,82	53,94	27,43
Mant. Correctiva Antes de mejoras	90,62	77,26	81,67	57,16	81,38	273,84	744,00	129,52	33,39	183,51	64,68	58,70
Mant. Correctiva después de mejoras	90,62	77,26	81,67	57,16	81,38	141,84	744,00	129,52	27,39	183,51	64,68	51,70
Disponibilidad Antes	79%	70%	83%	78%	87%	53%	0%	82%	81%	68%	84%	88%
Disponibilidad después	79%	70%	83%	78%	87%	72%	0%	82%	82%	68%	84%	89%

Tabla 15: Para la pala 10, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación.

PA10	Enero	febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov.	Dic
Horas Totales	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
Mant. Preventiva	323,72	696,00	733,00	42,07	67,62	111,44	90,84	56,60	82,88	5,00	19,06	45,27
Mant. Correctiva Antes de mejoras	96,90	0,00	0,85	64,27	169,16	106,66	27,30	30,30	53,97	561,22	31,59	58,28
Mant. Correctiva después de mejoras	96,90	0,00	0,85	58,27	149,16	98,66	27,30	30,30	39,97	393,22	31,59	58,28
Disponibilidad Antes	43%	0%	1%	85%	68%	70%	84%	88%	81%	24%	93%	86%
Disponibilidad después	43%	0%	1%	86%	71%	71%	84%	88%	83%	46%	93%	86%

Tabla 16: Para la pala 11, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación.

PA11	Enero	febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov.	Dic
Horas Totales	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
Mant. Preventiva	65,22	6,01	54,33	62,37	65,92	123,35	5,59	100,84	31,92	84,49	46,39	28,90
Mant. Correctiva Antes de mejoras	103,75	111,88	74,17	48,20	18,31	50,41	87,10	65,83	46,26	65,37	99,43	52,16
Mant. Correctiva después de mejoras	73,75	86,88	56,17	37,20	18,31	50,41	67,10	32,83	43,26	47,37	81,43	36,16
Disponibilidad Antes	77%	83%	83%	85%	89%	76%	88%	78%	89%	80%	80%	89%
Disponibilidad después	81%	87%	85%	86%	89%	76%	90%	82%	90%	82%	82%	91%

Tabla 17: Para la pala 12, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación.

PA12	Enero	febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov.	Dic
Horas Totales	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
Mant. Preventiva	210,81	65,42	22,35	40,62	125,63	3,81	26,18	57,91	224,17	16,30	42,41	20,55
Mant. Correctiva Antes de mejoras	74,16	29,68	30,33	3,25	17,67	16,47	20,60	48,70	21,71	54,20	22,89	16,31
Mant. Correctiva después de mejoras	41,16	13,68	30,33	3,25	10,67	16,47	8,60	36,70	6,71	54,20	22,89	16,31
Disponibilidad Antes	62%	86%	93%	94%	81%	97%	94%	86%	66%	91%	91%	95%
Disponibilidad después	66%	89%	93%	94%	82%	97%	95%	87%	68%	91%	91%	95%

Tabla 18: Para la pala 13, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación.

PA13	Enero	febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.	Dic
Horas Totales	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
Mant. Preventiva	45,94	44,82	27,35	94,17	70,82	33,81	54,11	48,68	60,11	6,54	64,48	7,01
Mant. Correctiva Antes de mejoras	58,03	94,66	78,27	18,40	45,80	17,38	17,80	41,19	65,20	41,10	152,88	496,98
Mant. Correctiva después de mejoras	51,03	27,66	43,27	18,40	45,80	17,38	12,80	21,19	40,20	38,10	43,88	271,98
Disponibilidad Antes	86%	80%	86%	84%	84%	93%	90%	88%	83%	94%	70%	32%
Disponibilidad después	87%	90%	91%	84%	84%	93%	91%	91%	86%	94%	85%	63%

Tabla 19: Para la pala 14, muestra las horas de mantenimiento correctivo y preventivo, y disponibilidad antes de aplicar las mejoras, versus la proyección de los tiempos de mantención y disponibilidad aplicando las mejoras a los procesos de planificación.

PA14	Enero	febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov.	Dic
Horas Totales	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
Mant. Preventiva	116,38	28,28	65,54	75,02	63,17	71,75	4,16	79,73	32,73	66,81	3,83	120,25
Mant. Correctiva Antes de mejoras	41,23	32,00	24,95	23,71	31,60	28,34	7,70	20,54	52,58	52,44	10,86	47,71
Mant. Correctiva después de mejoras	27,23	26,65	20,95	23,71	27,60	28,34	7,70	13,54	28,58	29,44	11	29,71
Disponibilidad Antes	79%	91%	88%	86%	87%	86%	98%	87%	88%	84%	98%	77%
Disponibilidad después	81%	96%	88%	86%	88%	86%	98%	87%	91%	87%	99%	80%