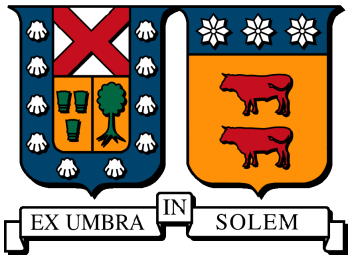
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO-CHILE



Evaluación y propuesta de estrategia de mantenimiento preventiva cíclica para el recambio de los dientes de baldes de palas eléctricas en Compañia minera de gran tamaño

GONZALO HERNÁNDEZ MELLADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: ING. NELSON ÁLVAREZ C.
PROFESOR CORREFERENTE: ING. TOMÁS GRUBESSICH F.

Diciembre 2019

Resumen

Este trabajo de título fue desarrollado en en la Superintendencia Mantención Palas en la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM.

La finalidad principal es entregar una propuesta de mantenimiento distinta a la existente para elementos de desgaste, específicamente los dientes de baldes de palas electromecánicas. El estudio consiste en hallar un tiempo de reemplazo que minimice costos de mantenimiento, al mismo tiempo que busca mejorar la confiabilidad de los dientes.

Se comienza explicitando los objetivos y alcances, para luego dar contexto al proceso y la compañía en la que se realizó el trabajo de memoria. Además se hace un breve resumen del modelo de gestión de la compañía.

Luego se presenta la teoría que está detrás del estudio, comenzando con una breve explicación del mantenimiento y la matemática detrás de la función de probabilidad de Weibull. Se explica que significan sus parámetros cuando son aplicados al mantenimiento, y el método matemático utilizado para calcularlos.

Se hace una breve introducción de las palas electromecánicas que operan en faena y de los elementos de desgaste que están presentes en los baldes.

Se analiza la estrategia de mantenimiento existente en los elementos de desgaste y se cuantifican sus costos. Luego se hace un análisis de los principales focos de mejora, en donde se encontró que la estrategia de mantenimiento existente pretende obtener un máximo de utilización del diente y a la vez evitar la caída de elementos de desgaste que luego se transforman en elementos inchancables, lo cual repercute de manera negativa al aumentar las inspecciones y detenciones para reparaciones.

Finalmente, se tiene como resultado de la estrategia propuesta, que al realizar el remplazo de la totalidad de los dientes marca MTG en palas P&H luego de 185 horas de funcionamiento, genera una disminución en costos de mantenimiento y un aumento en la confiabilidad de los dientes.

Abstract

This title work was developed in the Superintendence of Power Shovels in Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM.

The final purpose is delivering a maintenance proposal that is different to the already existence maintenance for grounded engaging tools (GETS), specifically the bucket teeths in electrical power shovels. The study consists to find a replacement time that minimize maintenance costs, while finds improve the reliability of teeths.

At beginning it is specifying objectives and achievements, for then give context to the process and the company where title work was made. Besides, a brief summary of the management model of the company is made.

Then, theory behind the study is presented, starting with a brief explication of maintenance and the mathematics behind the Weibull probability function. An explication it is made of what these parameters means when are applying to the maintenance, and the mathematic method for calculate them.

A brief introduction it is done of the electromechanical power shovels operating in chore and the GETS presents in the buckets. The maintenance strategy already existent in the GETS it is analyzed and their costs are quantified. Then, an analysis of the main focus of improvement it is made, where it was found that the maintenance strategy already existent pretends to obtain the maximum utilization of the teeth while avoiding the falling of GETS, which then become in uncrushables, which has a negative impact by increasing inspections and detentions to repairs.

Finally, it has as result of the proposed strategy, when all the MTG brand teeths in P&H power shovels after 185 hours running, generates a decrease in maintenance costs and an increase of the reliability of the teeths.

Índice general

1. Introducción 1
   - 1.1. Objetivos . . . 3
     - 1.1.1. Objetivo General . . . 3
     - 1.1.2. Objetivos Específicos . . . 4
   - 1.2. Alcances y Plan de trabajo . . . 4
   - 1.3. Descripción de la Compañía . . . 5
     - 1.3.1. Antecedentes Generales: . . . 5
     - 1.3.2. Historia de la Compañía . . . 5
     - 1.3.3. Producción y Ventas . . . 5
   - 1.4. Proceso . . . 6
   - 1.5. Ciclo Gestión de Riesgos . . . 7

2. Marco Teórico 12
   - 2.1. Mantenimiento . . . 12
     - 2.1.1. Indicadores de mantenibilidad . . . 12
     - 2.1.2. Estrategias de Mantenimiento . . . 13
     - 2.1.3. Historia del Mantenimiento . . . 15
   - 2.2. Distribución de Probabilidad de Weibull . . . 16
     - 2.2.1. Características generales . . . 16
     - 2.2.2. Confiabilidad Weibull . . . 17
     - 2.2.3. Función tasa de falla de Weibull . . . 18
     - 2.2.4. Tiempo medio entre fallas . . . 19
     - 2.2.5. Comportamiento equipos/mecanismos . . . 19
     - 2.2.6. Cálculo de parámetros . . . 20
   - 2.3. Elección de estrategia de mantenimiento . . . 22
   - 2.4. Aspectos mineros/geológicos . . . 26

3. Descripción de palas electromecánicas en faena 28
3.1. Tipos de palas electromecánicas . . . 29
3.2. Sistemas principales . . . 30
3.3. Baldes de palas electromecánicas . . . 31
3.3.1. Elementos de desgaste . . . 31
3.3.2. Marcas de elementos de desgaste en faena . . . 34

4. Análisis de estrategia de mantenimiento actual 35
4.1. Estrategia actual . . . 35
4.2. Indicadores de mantenibilidad . . . 38
4.3. Caso de oportunidad . . . 39
4.3.1. Fase de operación . . . 40
4.4. Costos . . . 41
4.4.1. Costo de repuestos . . . 42
4.4.2. Costos por pala detenida . . . 42
4.4.3. Costos de inspección . . . 43
4.4.4. Costo total . . . 44
4.5. Disponibilidad . . . 44

5. Propuesta de mantenimiento de dientes de balde 45
5.1. Análisis situación actual . . . 45
5.2. Estudio . . . 46
5.2.1. Parámetros Weibull . . . 46
5.2.2. Análisis Estudio . . . 47
5.2.3. Disponibilidad . . . 52
5.3. Propuesta . . . 52
5.4. Efecto de las condiciones ambientales de operación . . . 56

6. Conclusión 57
6.1. Recomendaciones . . . 58

A. Principales partes de palas electromecánicas 60

B. Protocolo de gestión de inchancables 63

C. Detalle de daños al chancador primario 71

Índice de figuras

1.1. Valores anuales del precio del cobre refinado durante el periodo 2011-2018. Fuente Cochilco 2
1.2. Valores mensuales del precio del cobre refinado durante el año 2018. Fuente Cochilco 2
1.3. Cadena de valor con sus procesos productivos. 7
1.4. Ciclo de Deming 8
1.5. Cilo Gestión de Riesgo 9

2.1. Representación gráfica del funcionamiento y fallas de un equipo con indicadores 13
2.2. Diagrama de tipos de mantenimiento 14
2.3. Generaciones del mantenimiento 15
2.4. Función densidad de probabilidad Weibull para varios valores de β. . . 17
2.5. Confiabilidad Weibull para valores de η y β. 18
2.6. Tasa de falla de Weibull para distintos valores de η y β. 18
2.7. Elección de estrategia de mantenimiento según estado del ciclo de vida. 22
2.8. Curvas de costo de mantenimiento 23

3.1. Pala electromecánica cargando CAEX 29
3.2. Pala electromecánica Bucyros modelo 495HR 29
3.3. Pala electromecánica P&H modelo 4100XPC 30
3.4. Dientes y Tapa de desgaste A) Diente; B) Tapa de desgaste 32
3.5. Guarderas de lado izquierdo y derecho 32
3.6. Entrediente. A ambos lados hay dientes 33
3.7. A) Adaptador; B) Abrazadera de cierre; C) Cuña; D) Perno cuña 33

4.1. Planilla para registrar medición de elementos de desgaste 36

4.2. Diagrama de flujo del mantenimiento actual de los dientes 37
4.3. Personal de mantenimiento realizando inspección a dientes 37
4.4. $MTBF$ de principales GETS ordenados por marca 39
4.5. Fases del rajo Rosario. 41
4.6. Disponibilidad de la pala n°11 durante el periodo de en cuestión. 44

5.1. Costo de mantenimiento de posición n°4 50
5.2. Confiabilidad de dientes en la posición n°4 50
5.3. Tasa de falla de dientes en la posición n°4 51
5.4. Función densidad de probabilidad de dientes en en la posición n°4 . . . 51
5.5. Disponibilidad de pala °11 con estrategia propuesta 52
5.6. Diagrama de flujo de la estrategia propuesta 53

A.1. Pala electromecánica Bucyros modelo 495HR 61
A.2. Pala electromecánica P&H modelo 4100XPC 62

C.1. Cuantificación de costos producto de daños al chancador 72

Índice de tablas

1.1. Exportaciones de concentrado de cobre de la Compañía 6

3.1. Elementos de desgaste más característicos en un balde 31
3.2. Marcas de elementos de desgaste de las palas electromecánicas en faena 34

4.1. Valores promedios y budget de disponibilidad de palas electromecánicas durante el 2017 39
4.2. Detalle de disponibilidad de Figura-4.6. 44

5.1. Parámetros Weibull de cada posición de diente durante el periodo 47
5.2. Confiabilidad al finalizar la vida promedio en cada posición 47
5.3. Tiempo en que el costo de mantenimiento de los dientes se minimiza para cada posición y $MTBF$ natural de cada posición 48
5.4. Tiempo de recambio, costo de mantenimiento y confiabilidad 49
5.5. Confiabilidad calculada luego de 185 horas de funcionamiento 49
5.6. Detalle de disponibilidad de Figura-5.5. 52
5.7. Tabla comparativa entre la actual estrategia de mantenimiento y la estrategia propuesta 54
5.8. Riesgos de instaurar nueva estrategia con sus respectivos controles . . . 55

Capítulo 1

Introducción

La minería es uno de los principales activos que posee Chile y participa de forma relevante en la economía nacional. Tan solo la minería del cobre, durante el año 2018, representó un 8,9 % [1] del PIB nacional. Por ese mismo motivo, es que al ser tan importante para el país, sus costos repercuten fuertemente en la economía nacional.

Además de sus costos propios de la minería, la tendencia en el precio del cobre refinado ha estado desde hace unos años a la baja (ver Figura-1.1 y Figura-1.2), por lo que se deben realizar estudios para optimizar los procesos de manera que sus costos disminuyan, y aumente la producción.

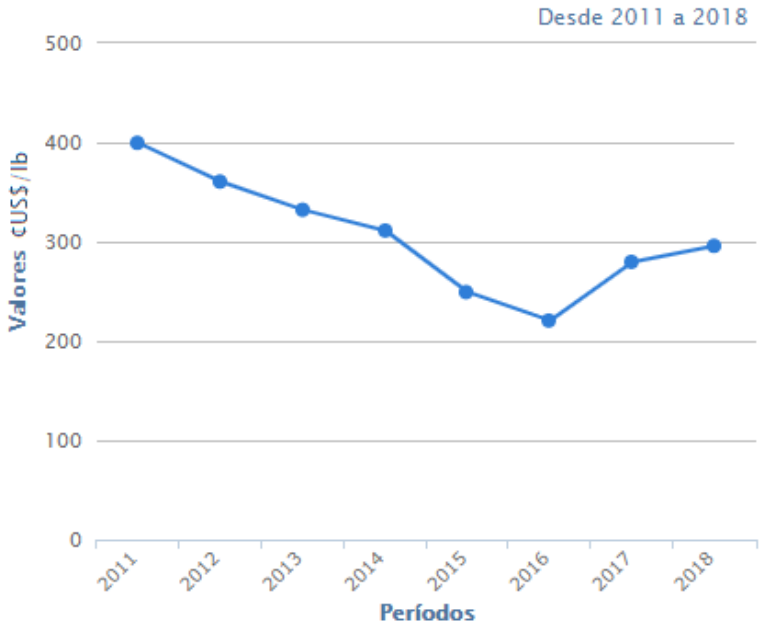


Figura 1.1: Valores anuales del precio del cobre refinado durante el periodo 2011-2018. Fuente Cochilco

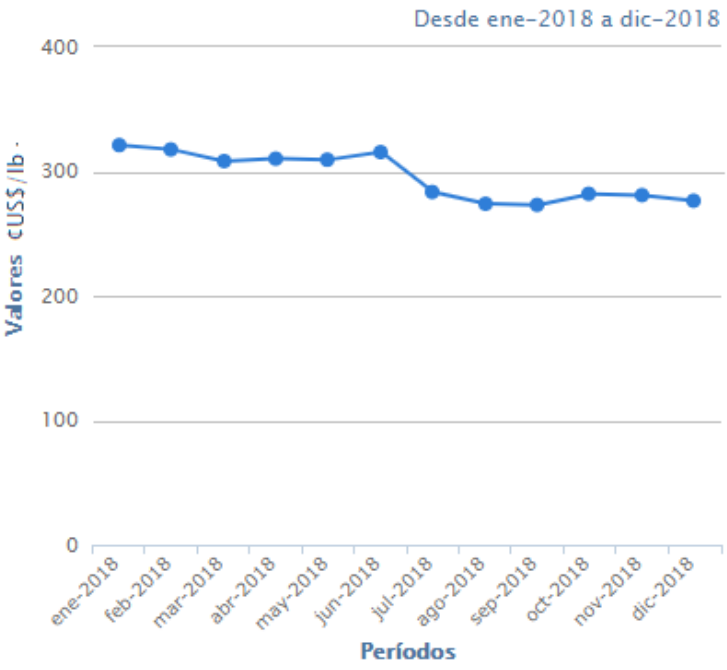


Figura 1.2: Valores mensuales del precio del cobre refinado durante el año 2018. Fuente Cochilco

Una oportunidad para disminuir estos costos en la minería es el mantenimiento. En minería hay equipos que son críticos para el proceso, destinando grandes recursos para su mantenimiento, y que constantemente presentan fallas imprevistas: perforadoras, palas electromecánicas, camiones de extracción, chancadores, molinos SAG, etc. Ante estas fallas imprevistas, las mineras dejan de producir, lo que se transforman en costos por no producir.

Las palas son parte vital de la operación en la mina. Tan así, que en el organigrama existe una superintendencia llamada Mantención Palas.

En cualquier modelo de pala, los baldes son los encargadoros de extraer el material del banco y depositarlo en los camiones de extracción, por tanto ante una falla en el balde, la pala deja de operar.

Los baldes están blindados con los elementos de desgaste o GETS (Ground Engaging Tools), elementos que están especialmente diseñados para que sean estos los que sufran el desgaste producido por el continuo carguío hacia los camiones, y protejan a la estructura base. Estos elementos de desgaste poseen frecuencias de fallas muy altas, dependiendo del material del que estén hechos, o de la dureza de los minerales que se estén extrayendo.

Este estudio presentará una propuesta de estrategia de mantenimiento alternativa a la que actualmente está siendo llevada a cabo en el mantenimiento de los elementos de desgaste, y a una optimización del proceso de mantención, específicamente en los dientes (o puntas) de los baldes. De esta manera se pretende elegir una estrategia que sea óptima, tanto desde el punto de vista productivo como del punto de vista del mantenedor. Si bien tiene dificultades en su aplicación, propias del rajo mismo, como granulometría, dureza del mineral, dureza del frente, se pretende dar un paso inicial en la adopción de este tipo de mantenimiento en uno de los GETS que más desgaste y fallas posee.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

- Evaluar y proponer una estrategia de mantenimiento preventivo de los dientes de los baldes de palas eléctricas, que mejore los costos de mantenimiento.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Describir la empresa y sus procesos, identificando procesos claves relacionados con el mantenimiento de los dientes de baldes.

- Analizar actual estrategia de mantenimiento, analizando el proceso, costos del mantenimiento y costos por no producir.

- Evaluar costos de una estrategia de mantenimiento preventiva cíclica.

- Realizar propuesta de mejora y control de estrategia de mantenimiento con base en los costos totales.

1.2. Alcances y Plan de trabajo

El presente trabajo de título se desarrolla en la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, en faena del rajo Rosario, la cual se encuentra localizada a 135 km de la comuna de Pica, y a 248 km de la comuna de Iquique, ambas comunas pertenecientes a la I región de Tarapacá, a 4400 msnm.

La memoria tiene como fin generar una evaluación de una nueva estrategia de mantenimiento en los elementos de desgaste (GETS) de los baldes de palas eléctricas, específicamente los dientes de los baldes. Para poder realizar la evaluación, se tomó los datos de una pala específica, con una marca específica de dientes, para así acotar el trabajo de título, y en caso de que las conclusiones sean beneficiosas, queda la opción a la empresa de extender el estudio al resto de la flota de palas eléctricas, o al resto de GETS, o a otros componentes de las palas. La pala a estudiar fue la pala n °11 P&H 4100XPC, con dientes MTG MA500RSX, ya que era la unica pala que contaba con data suficiente para ser analizada.

Para proceder en este trabajo de título, en un comienzo se presentará la teoría utilizada que se encuentra detrás de los cálculos. Se identificarán los principales indicadores utilizados en mantención. También se presentarán las distintas estrategias de mantenimiento y teoría detrás de la distribución de Weibull, así como también teoría necesaria para calcular costos. Luego se presentarán los resultados obtenidos, y finalmente las propuestas y conclusiones de este trabajo.

1.3. Descripción de la Compañía

1.3.1. Antecedentes Generales:

Razón social: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.
Rut: 89.468.900-5
Teléfono: (2) 3626500
Sitio Web: https://www.collahuasi.cl
Dirección: Baquedano 902, Región de Tarapacá, Comuna de Iquique.

1.3.2. Historia de la Compañía

El distrito minero Collahuasi inicia sus actividades en 1880 con explotación de vetas de cobre y plata de alta ley. Esta operación se mantuvo hasta 1932, a raíz de la crisis económica mundial. Las actividades mineras volvieron a resurgir en el año 1978, año en cual se identificaron los componentes claves del yacimiento Rosario.

Posteriormente, en 1991, una combinación de estudios basados en imágenes satelitales, levantamientos aerofotogramétricos, terrestres y actividades de perforación de sondajes, dio como resultado el descubrimiento del yacimiento Ujina. Los estudios de factibilidad y de impacto ambiental del Proyecto Collahuasi fueron aprobados en 1995. A fines de 1996, habiéndose suscrito los acuerdos relativos al financiamiento y comercialización, se dio inicio a la etapa de desarrollo y construcción.

La Compañía inauguró su operación comercial el 7 de abril de 1999, y desde entonces se propuso desarrollar su actividad en base a políticas y prácticas de excelencia y que contribuyan al bienestar de la sociedad, el desarrollo económico y cuidado del medio ambiente.

1.3.3. Producción y Ventas

La compañía está dedicada a la extracción y producción de concentrado de Cu, con subproductos de Au, Ag, cátodos de cobre y concentrado de molibdeno. La explotación del mineral es a rajo abierto y hoy está concentrado en los yacimientos de Rosario y Ujina, situados en la comuna de Pica, Región de Tarapacá.

En la actualidad, Collahuasi cuenta con un gran potencial sustentado en su base de recursos mineralos, los que alcanzan a 10.126 millontes de toneladas con una ley de cobre media de 0,79 %, dentro de las cuales existen 3.131 millones de toneladas en

reservas con una ley de cobre media de 0,93 %. Como minera extractiva, Collahuasi no comercializa productos terminados para su consumo directo. Su principal producto es el concentrado de cobre, siendo este una materia prima semielaborada que es entregada para su elaboración final en fundiciones en distintas latitudes. Las ventas de concentrado de cobre tuvieron el año 2017 como principales destinos, expuestos en la Tabla-1.1.

Tabla 1.1: Exportaciones de concentrado de cobre de la Compañía

País	**TMS**	**%**
China	652.564	$33,4\,\%$
Chile	483.281	$24,7\,\%$
India	222.822	$11,4\,\%$
Corea del Sur	133.463	$6,8\,\%$
España	73.933	$3,8\,\%$
Brasil	59.596	$3,1\,\%$
Japón	58.305	$3,0\,\%$
Finlandia	58.005	$3,0\,\%$
Perú	54.258	$2,8\,\%$
Filipinas	53.507	$2,7\,\%$
Rusia	32.059	$1,6\,\%$
Bulgaria	31.942	$1,6\,\%$
Alemania	18.077	$0,9\,\%$
Australia	10.901	$0,6\,\%$
Malasia	10.058	$0,5\,\%$
TOTAL	**1.952.771**	**100 %**

1.4. Proceso

El proceso de producción se muestra de manera gráfica en la Figura-1.3. Se debe aclarar que la linea de óxidos está totalmente inoperativa. Actualmente los óxidos que se extraen de los rajos se apilan, para así en un futuro reabrir la linea de óxidos y procesarlos. Por tanto la única línea operativa es la línea de sulfuros.

El proceso de producción comienza en el rajo. Los bancos son perforados y luego tronados, para que las palas carguen el material a los camiones de extracción CAEX. Dependiendo de si el material es mineral o lastre, se lleva a los chancadores o a los botaderos, respectivamente. Una vez que el material es chancado, pasa a una pila de almacenamiento y luego a los molinos de bolas SAG. De los molinos, sale el mineral

con una granulometría de aproximadamente 0,18[mm], y posteriormente es sumergido en las celdas de flotación. Desde el fondo de las celdas de flotación se bombea aire para generar burbujas, y debido a reactivos que se añaden a las celdas, el cobre (y también el molibdeno) ingresa a estas burbujas, que rebalsan las celdas. Este es el concentrado de cobre, el cual es transportado por un mineroducto de 190 km al Puerto de Patache, comuna de Iquique, donde también se encuentra la planta de molibdeno. Desde aquí, el concentrado se carga en barcos para su exportación. Ver Figura-1.3.

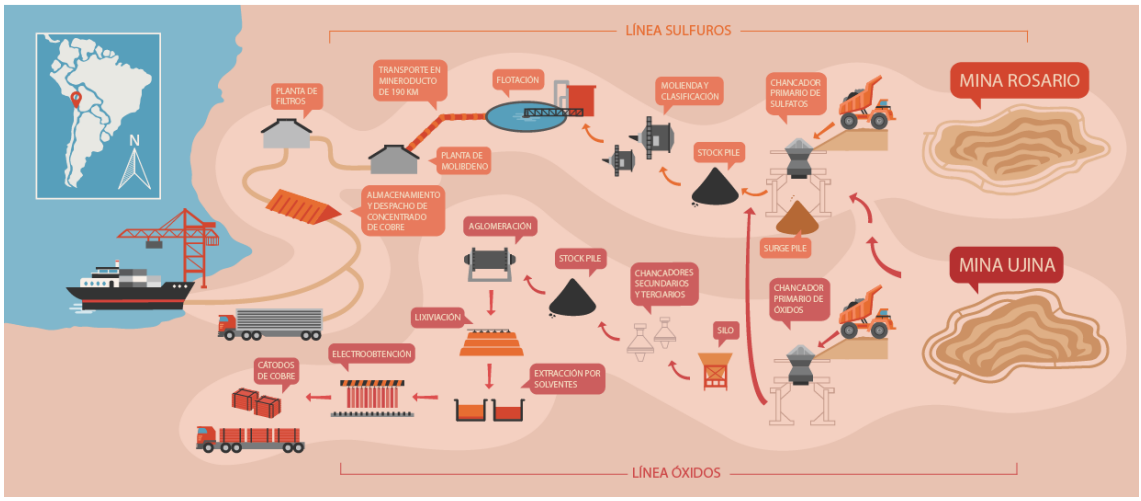


Figura 1.3: Cadena de valor con sus procesos productivos.

Fuente: www.Collahuasi.cl

1.5. Ciclo Gestión de Riesgos

Para la gestión de la optimización en la operación, la Compañía ha mantenido tres focos de gestión que están interrelacionados entre sí:

- Gestión por Procesos
- Gestión de Activos
- Ciclo de Gestión de Riesgos

Este último foco, el Ciclo de Gestión de Riesgos (desde ahora CGR) tiene como pilares estructurales para su desarrollo y aplicación a los dos focos anteriores.

El CGR es el modelo de mejoramiento continuo, y es el modelo de gestión de la Compañía. Su filosofía de trabajo asegura minimizar la variabilidad de los procesos y, como consecuencia, permite obtener mejores resultados en diversos ámbitos como la seguridad a las personas, la continuidad operacional, el resguardo del medio ambiente y el desarrollo del negocio. Su metodología se caracteriza por ser simple, transversal, persistente y participativa.

El Ciclo de Gestión de Riesgos (CGR) fue diseñado para controlar la incertidumbre o variabilidad de los procesos que pueden impactar el éxito del negocio. Es un proceso dinámico que consta de cuatro áreas y seis etapas, representadas en cajas, todos con base en el Ciclo de Deming PDCA o PHVA (Planear, Hacer, Verificar, Actuar), mostrado en la Figura-1.4.

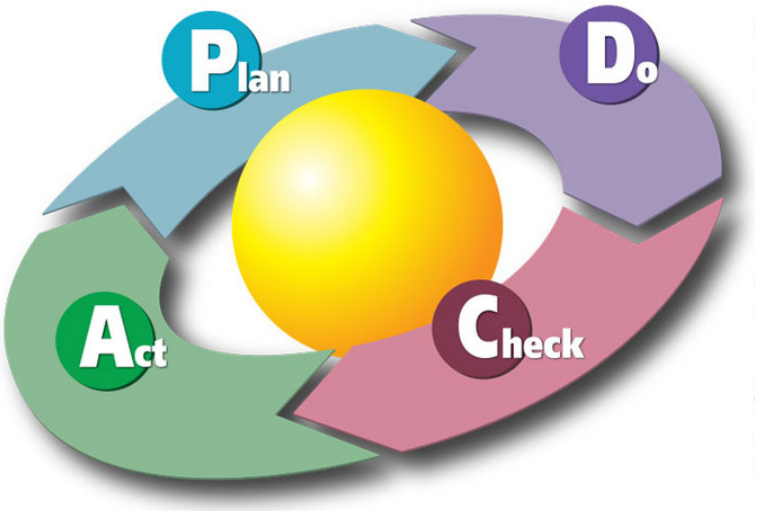


Figura 1.4: Ciclo de Deming

El CGR busca mantener el control de los procesos y activos, atendiendo a la alta variabilidad de los mismos, donde los incidentes pueden aparecer en cualquier fase del proceso. Un incidente es algo que se produce en el transcurso de un proceso y que repercute en él, alterándolo o interrumpiéndolo. Los incidentes explican la brecha entre el desempeño efectivo y el desempeño esperado por la compañía, y pueden afectar a las personas, los equipos, el medio ambiente o las comunidades y alterar la continuidad de los procesos productivos, dañando finalmente los resultados de negocio y generando impactos negativos a los grupos de interés. Todo proceso al interior de la Compañía debe estar organizado según el CGR. Por tanto, cualquier falla o desviación en un proceso, se debe a una falla en el CGR.

Las seis cajas del CGR se pueden apreciar en la Figura-1.5



Figura 1.5: Cilo Gestión de Riesgo

Fuente: www.Collahuasi.cl

Según [5], en cada caja del CGR se debe dar cumplimiento de lo siguiente:

a) Planificación

- Caja 1, Mapa del Proceso: Confección e identificación de sus mapas de proceso (identificación de su producto o servicio, definición de sus respectivos procesos, subprocesos, actividades, tareas, con sus respectivas entradas y salidas). Se debe utilizar algún instructivo para la confección de mapas de procesos en las áreas de trabajo de la Compañía, usualmente suele ser SIPOC.
- Caja 2, Matriz de Riesgos: Confección de matriz de identificación de peligros y evaluación de riesgos asociados a los procesos constructivos a desarrollar, acorde al procedimiento "Procedimiento CEO-PES-003 confección matriz de identificación de peligros y evaluación de riesgos CMDIC" de evaluación de riesgos de la Compañía. Se requiere que esta matriz a lo menos incluya por cada proceso, subproceso y/o actividad los riesgos asociados a su respectiva criticidad, ámbito, incorporando controles blandos y

duros, según jerarquía de control de riesgos y comprometiendo su efectividad, insertando en su programa aquellas actividades que resulten de revisar requerimientos EPF (Estándares de Prevención de Fatalidades), aprendizaje de incidentes que difunda la vicepresidencia de procesos a través del documento "Aprendizaje de los principales accidentes e incidentes ocurridos en CMDIC asociados a actividades posibles".

- Caja 3, Planes de Mitigación y Control: El responsable debe, como resultado de la identificación de peligros y riesgos, confeccionar planes, programas y procedimientos de trabajos e instructivos específicos para asegurar el desarrollo de actividades en terreno incorporando los controles propuestos en Caja N°2, generando lo necesario para controlar los riesgos identificados.

b) Ejecución

- Caja 4, Procedimientos de Trabajo: El dueño del proceso deberá asegurar al inicio de la actividad la documentación requerida por el CGR (mapa de procesos, matriz de riesgos, procedimientos y/o instructivos) asegurando la materialización de los compromisos y garantizando el entendimiento por parte del personal que ejecuta la actividad. En esta etapa, que es el desarrollo y ejecución de lo contratado, debe generarse acorde a lo planificado y acorde a la necesidad de desarrollo de la construcción, montaje e implementación de los servicios contratados u otra actividad asociada.

c) Verificación

- Caja 5, Verificación y Autorización: El dueño de área deberá aplicar la herramienta de verificación y de control necesarias para dar fiel cumplimiento a lo contratado y que es reflejo de la planificación previa como ejecución posterior de los trabajos. Se deben considerar alertas preventivas y de gestión oportuna, a lo menos las que se establecen como "Verificación y Autorización de Trabajo Seguro" (VATS), documento a través del cual, la supervisión solicitante, ejecutora y dueño de área y/o equipos verifican que los controles establecidos en la etapa de "planificación" del ciclo de gestión de riesgos permiten la ejecución de la actividad con los riesgos controlados y dentro de las herramientas de gestión requeridas y solicitadas por la

Compañía a lo menos y no excluyentes, las de gestión de riesgos en terreno (GRT), y las identificadas en estándares de construcción.

d) Conocimiento, aprendizaje, comunicación

- Caja 6, investigación incidentes: El dueño de área deberá asegurar en el desarrollo de sus procesos la caja N°6 como parte integral donde se debe entregar los aprendizajes tanto propios como los que la Compañía difunda a través de su organización, tal como 9 los del documento "Aprendizaje de los principales accidentes e incidentes ocurridos en CMDIC asociados a actividades posibles en vicepresidencia de procesos u otra área de la compañía". Es de vital importancia aplicar esta caja en cada actividad entendiendo que el CGR requiere una etapa de maduración en la internalización por cada persona involucrada en el servicio, por lo que debe ser constante y metódico, de manera tal que se asegure la identificación de mejoras y las correctas prácticas. Es por ello, que una de las herramientas preventivas donde se puede aplicar estas difusiones y controles es en la "Reunión de Inicio de Turno Seguro" (RITUS), herramienta clave en el ciclo de gestión de riesgos, con foco en el control de actividades y tareas derivadas de la Planificación y con una visión más preventiva y de identificación de riesgos y sus mejoras en prácticas similares, por ejemplo, la difusión de las alertas de aprendizajes, resultantes de todos los procesos de investigación de incidentes con la finalidad de evitar repeticiones en áreas de trabajos.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se presentarán los conceptos y teoría utilizada en el desarrollo de la memoria de título, así como también los conceptos y teoría, para que el lector comprenda tanto el desarrollo como los resultados obtenidos del tema.

La teoría utilizada comprende aspectos relativos al Mantenimiento, tales como sus conceptos, tipos y evolución en el tiempo. Incluye también aspectos de probabilidad y confiabilidad, y el método utilizado para escoger el momento oportuno en que realizar mantenimiento a los dientes.

2.1. Mantenimiento

2.1.1. Indicadores de mantenibilidad

Los indicadores de mantenibilidad son de uso común en todas las empresas con un área de mantención, y son de gran utilidad (si son bien utilizados) para comprender el comportamiento de las máquinas en relación a su fallabilidad y a su mantenibilidad. A continuación se presentan algunos de esos indicadores:

- Tasa de falla λ: Corresponde a la frecuencia de fallas de un equipo expresado en fallos por unidad tiempo.

- Tiempo medio entre fallas $MTBF$: El $MTBF$ (por sus siglas en inglés Mean Time Between Failure), corresponde al tiempo medio entre cada ocurrencia de una parada de un equipo debido a una falla.

- Tiempo medio para reparar $MTTR$: Acrónimo de las palabras de habla inglesa Mean Time to Repair, corresponde al tiempo medio en que el equipo está detenido para su reparación. Comprende desde el cese de su operación hasta el reinicio de esta.

- Tiempo medio para fallar $MTTF$: Por las siglas Mean Time To Failure, corresponde al tiempo medio en que el equipo opera hasta su falla. En otras palabras, corresponde al tiempo comprendido desde el momento en que el equipo comienza a operar hasta que deja de hacerlo.

- Disponibilidad A: Porción del tiempo en que el equipo está en condiciones operativas. La más utilizada es la diponibilidad inherente, en la ecuación (2.1).

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \tag{2.1}$$

Por tanto según estas definiciones se puede colegir la ecuación (2.2).

$$MTBF = MTTR + MTTF \tag{2.2}$$

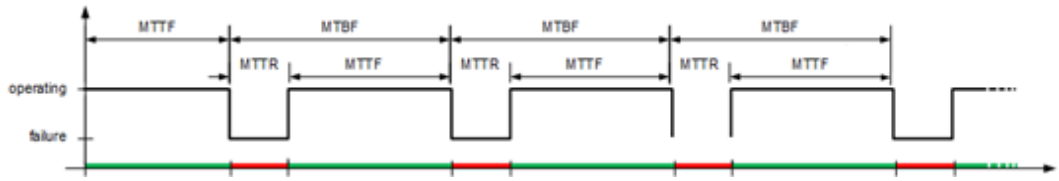


Figura 2.1: Representación gráfica del funcionamiento y fallas de un equipo con indicadores

2.1.2. Estrategias de Mantenimiento

A lo largo de la historia de las empresas en la industria se ha estado cambiando las estrategias de mantenimiento de los equipos, según la manera en que estos se comporten, adecuándose a los costos de la empresa y a la competitividad.

- Mantenimiento Correctivo, efectuado después de la falla para reparar averías.

- Mantenimiento Preventivo, efectuado con intención de reducir la probabilidad del fallo, de que existen dos modalidades:

1. Mantenimiento Preventivo sistemático, efectuado a intervalos de tiempo según programa establecido y teniendo en cuenta la criticidad de cada máquina y la existencia o no de reserva.
2. Mantenimiento Preventivo condicional o según condición: subordinado a un acontecimiento predeterminado. Al equipo equipo se le está constantemente monitoreando paramétros expecíficos, y una vez que estos se salen de sus rangos de operación normales hasta niveles críticos se procede a realizar mantención.

- Mantenimiento Predictivo, que más que un tipo de mantenimiento, se refiere a las técnicas de detección precoz de síntomas para ordenar la intervención antes de la fecha a la cual se predice un fallo.
- Mantenimiento Proactivo, que se refiere a una filosofía de mantenimiento, está dirigida fundamentalmente a la detección y corrección de las causas que generan el desgaste y que conducen a la falla de la maquinaria. Una vez que las causas que generan desgaste se han localizado, no se debe permitir que estas sigan presentes en la maquinaria, ya que de hacerlo, su vida y desempeño se verán reducidos [3].

La Figura-2.2 presenta un diagrama para seleccionar el tipo de mantenimiento basado en el tipo de fallo y en la posibilidad de vigilancia.

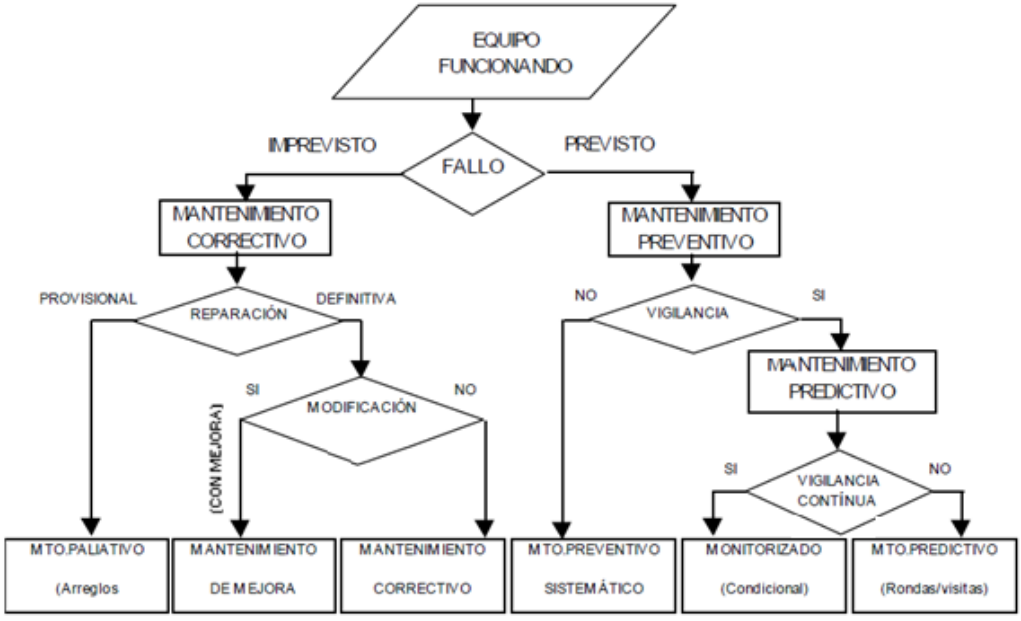


Figura 2.2: Diagrama de tipos de mantenimiento

2.1.3. Historia del Mantenimiento

El mantenimiento es una disciplina dinámica: desde que existe que ha estado en constante cambio, debiéndose estos cambios principalmente al gran aumento en número y variedad de activos físicos que deben ser mantenidos en todas las empresas, a diseños más complejos, a nuevos métodos de mantenimiento, y a una constante y cambiante manera de organizar el mantenimiento, a sus responsabilidades y responsables.

El mantenimiento no solo responde a los cambios mencionados anteriormente, también responde a expectativas que son cambiantes en el tiempo. Estas expectativas están relacionadas con la toma de consciencia de hasta qué punto las fallas en los equipos afectan a la seguridad del personal y al medioambiente, toma de consciencia de la relación entre mantenibilidad y calidad del producto, y presión de alcanzar una alta disponibilidad en la planta y mantener el costo acotado.

Dado el aspecto dinámico del mantenimiento es que presenta constantes desafíos, que lleva al límite a las actitudes y habilidades en todas las ramas de la industria. El personal de mantenimiento se ve obligado a adoptar nuevas maneras de pensar, al mismo tiempo que las limitaciones de los sistemas de mantenimiento se vuelven más evidentes y relevantes.

En la Figura-2.3 se puede apreciar la historia y las transiciones que ha tenido la manera de realizar mantenimiento.

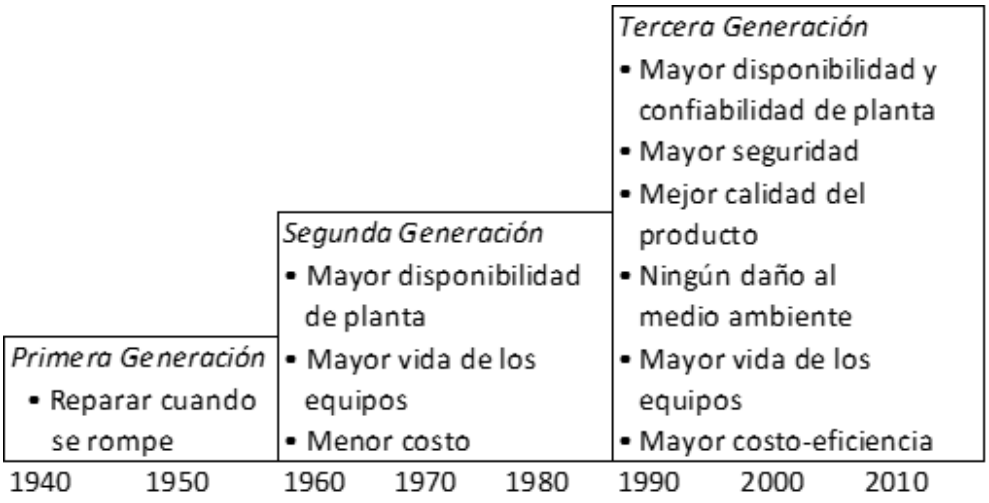


Figura 2.3: Generaciones del mantenimiento

2.2. Distribución de Probabilidad de Weibull

La Distribución de Weibull es una distribución de probabilidad continua y definida por tres parámetros. Es la más utilizada en el campo de la confiabilidad. La Distribución de Weibull es ampliamente utilizada en ingeniería, y uno de sus usos es en análisis de confiabilidad.

La versatilidad de dicha función radica en las diferentes formas que adopta dependiendo de los valores que toman sus parámetros. Las implicaciones físicas, teóricas, algebraicas, y gráficas son algunos aspectos interesantes que generan y dan lugar a una gran variedad de trabajos [8].

Físicamente, los valores extremos de la función de Weibull están ligados a la vida útil de los productos en estudio, y han generado toda una filosofía o iniciativas de perfeccionamiento relacionado con los círculos de calidad, o de cero falla entre otros. Teóricamente, se puede observar que los cambios de los parámetros generan una familia de distribuciones cuyos casos específicos coinciden con otras distribuciones, como la exponencial, gaussiana, o chi-cuadrada, entre muchas otras [8].

2.2.1. Características generales

La función densidad de probabilidad está dada por la ecuación (2.3).

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\frac{t-\gamma}{\eta}^{\beta}} \tag{2.3}$$

Sus parámetros son:

- Factor de forma β: Es adimensional y siempre mayor a cero. Indica el mecanismo de falla del equipo.

- Factor de localización γ: También llamado vida intrínseca, es un parámetro que se mide en unidades de tiempo y es en cierta medida un indicador de calidad del equipo. En la literatura también es posible encontrarlo como t_0. Indica el instante en que la distribución comienza a tomar validez, en otras palabras, desplaza la curva de confiabilidad hacia la izquierda o derecha. Usualmente se asume $\gamma = 0$, lo cual implica asumir un cierto error de cálculo, sin embargo existen distintos métodos para calcularlo. Este parámetro puede tomar valores tanto mayores como menores a cero.

- Factor de escala η: También llamado vida característica, tiene la utilidad de darle una referencia de tiempo al examinador: al instante en que $t - \gamma = \eta$, se tendrá una confiabilidad exacta de un $36,8575\,\%$. Posee unidades de tiempo.

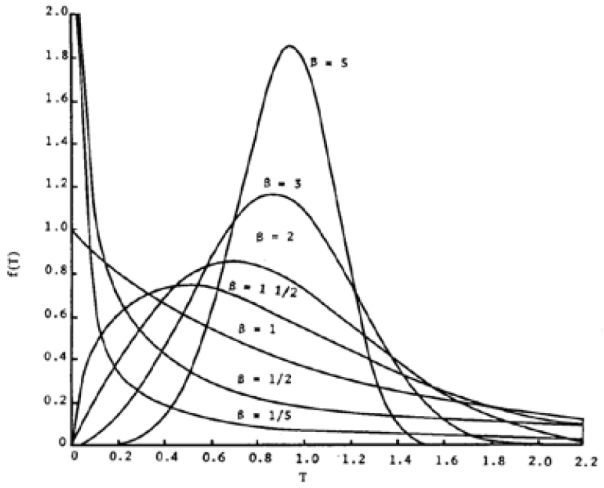


Figura 2.4: Función densidad de probabilidad Weibull para varios valores de β.

Fuente: [8]

2.2.2. Confiabilidad Weibull

La probabilidad acumulada de falla se muestra en la ecuación (2.4).

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} = 1 - R(t) \tag{2.4}$$

De esta se deduce la función de confiabilidad de tres parámetros de Weibull en la ecuación(2.5).

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \tag{2.5}$$

La Figura-2.5 muestra la confiabilidad para distintos valores de β y η.

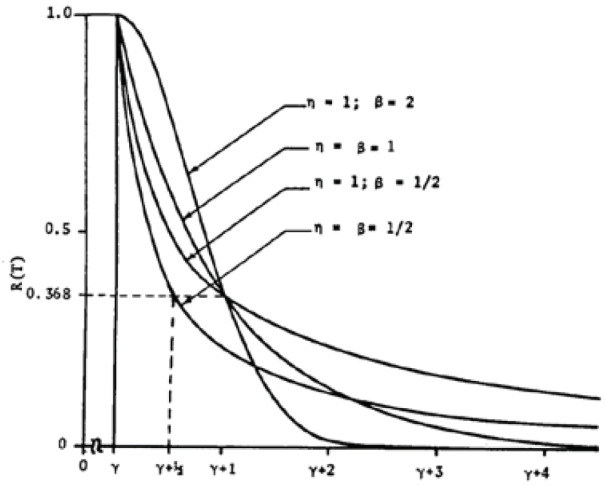


Figura 2.5: Confiabilidad Weibull para valores de η y β.

Fuente: [8]

2.2.3. Función tasa de falla de Weibull

La función de tasa de falla se muestra en la ecuación (2.6) y en la Figura-2.6.

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{2.6}$$

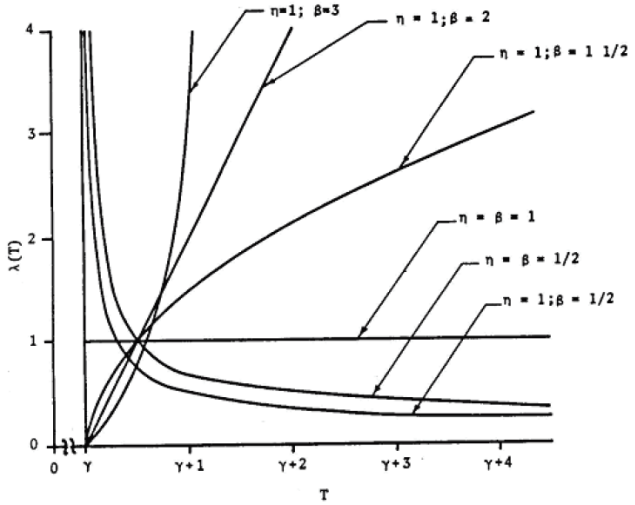


Figura 2.6: Tasa de falla de Weibull para distintos valores de η y β.

Fuente: [8]

2.2.4. Tiempo medio entre fallas

Matemáticamente el $MTBF$ de la distribución de Weibull, ecuación (2.7), corresponde a la esperanza (E) de la distribución de probabilidad.

$$MTBF = \int_{-\infty}^{+\infty} tf(t)dt = \gamma + \eta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \tag{2.7}$$

En donde Γ corresponde a la función Gamma.

2.2.5. Comportamiento equipos/mecanismos

Dada la versatilidad de la distribución Weibull, según los valores de sus parámetros esta se puede asemejar a otras distribuciones de probabilidad, lo que para un equipo implica distintas maneras de fallar y otros aspectos acerca de este.

Según [2], se tiene lo siguiente:

Si $\gamma = 0$, el mecanismo no tiene una duración de confiabilidad intrínseca, y:

- $\beta < 1$, la tasa de fallos disminuye sin llegar a cero, por lo que se puede suponer que se está en la juventud del componente con un margen de seguridad bajo, dando lugar a fallos por tensión de rotura.
- $\beta = 1$, la tasa de fallo se mantiene constante lo que indica una característica de fallos aleatoria o pseudo-aleatoria. En este caso la distribución de Weibull es igual a la exponencial.
- $\beta > 1$, la tasa de fallo se incrementa con la edad de forma continua lo que indica que los desgastes empiezan en el momento en que el mecanismo se pone en servicio.
- $\beta \approx 3,44$ se cumple que la media es igual a la mediana y la distribución de Weibull es sensiblemente igual a la distribución Normal.

Si $\gamma > 0$, el mecanismo es intrínsecamente fiable desde el momento en que fue puesto en servicio hasta que $t = \gamma$, y además:

- $\beta < 1$,hay fatiga u otro tipo de desgaste en el que la tasa de fallo disminuye con el tiempo después de un súbito incremento hasta γ; valores de β bajos ($\beta \sim 0,5$) pueden asociarse con ciclos de fatigas bajos y los valores de β más elevados ($\beta \sim 0,8$) con ciclos más altos.

- $\beta > 1$, hay una erosión o desgaste similar en la que la constante de duración de carga disminuye continuamente con el incremento de la carga.

Si $\gamma < 0$ Indica que el mecanismo fue utilizado o tuvo fallos antes de iniciar la toma de datos. Además:

- $\beta < 1$, podría tratarse de un fallo de juventud antes de su puesta en servicio, como resultado de un margen de seguridad bajo.
- $\beta > 1$, se trata de un desgaste por una disminución constante de la resistencia iniciado antes de su puesta en servicio, por ejemplo debido a una vida propia limitada que ha finalizado o era inadecuada.

2.2.6. Cálculo de parámetros

Para calcular los tres parámetros de la distribución, existen diversos métodos. El método que se expondrá a continuación corresponde al Método de los Mínimos Cuadrados o Método Gráfico.

Para este método se requieren los TTF ordenados de forma ascendente y los TTR correspondientes a cada TTF del equipo. A cada TTF se le asigna un número i correspondiente a su orden. El primer TTF tendrá un $i = 1$, el segundo tendrá $i = 2$ y así sucesivamente.

Mediante el estimador de la función de distribución acumulada, ecuación (2.8), y la ecuación(2.4) se puede estimar la confiabilidad $R(t)$ correspondiente a cada TTF.

$$F = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} \tag{2.8}$$

En donde N corresponde al número de datos, es decir $N = max\{i\}$.

Mediante una linealización de la confiabilidad de Weibull, ecuación (2.5), con logaritmo natural, se llega a la ecuación (2.9).

$$ln\left(ln\left(\frac{1}{R(t)}\right)\right) = \beta ln\left(t - \gamma\right) - \beta ln\left(\eta\right) \tag{2.9}$$

La cual es una recta con la forma

$$Y = m \cdot X + b \tag{2.10}$$

Al igualar los términos de la ecuación (2.9) con los de la ecuación (2.10) se obtiene:

$$Y = ln\left(ln\left(\frac{1}{R(t)}\right)\right) \tag{2.11}$$

$$X = ln\left(t - \gamma\right) = ln\left(TTF - \gamma\right) \tag{2.12}$$

$$m = \beta \tag{2.13}$$

$$b = -\beta ln(\eta) \tag{2.14}$$

En un comienzo se asumirá $\gamma = 0$.

Ya que se tienen los valores de Y y X, se forma una recta y se calcula su pendiente ,su intercepto con el eje , y su coeficiente de correlación, visibles en ecuación (2.15), ecuación (2.16), y ecuación (2.17) respectivamente.

$$m = \frac{\sum XY - \frac{(\sum X)(\sum Y)}{N}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}} \tag{2.15}$$

$$b = \frac{\sum Y}{N} - m\frac{\sum X}{N} \tag{2.16}$$

$$R^2 = \left(\frac{S_{XY}}{S_X S_Y}\right)^2 \tag{2.17}$$

En donde S_X corresponde a la desviación estándar de la variable X, S_Y corresponde a la desviación estándar de la variable Y, y S_{XY} es la desviación estándar de $X \cdot Y$.

Estos valores pueden calcularse fácilmente con las funciones de Excel PENDIENTE(), INTERSECCION(), y COEFICIENTE.R2().

Una vez obtenidos estos valores, se pueden calcular los parámetros de Weibull. La pendiente se deduce con la ecuación (2.13).

De la ecuación (2.14), se deduce

$$\eta = e^{-b/\beta} \tag{2.18}$$

Para calcular γ, se utiliza la función SOLVE de Excel. Con esta función se pretende maximizar R^2, de manera que se cumpla que siempre $R^2 < 1$, y además $\gamma < min\{TTF\}$.

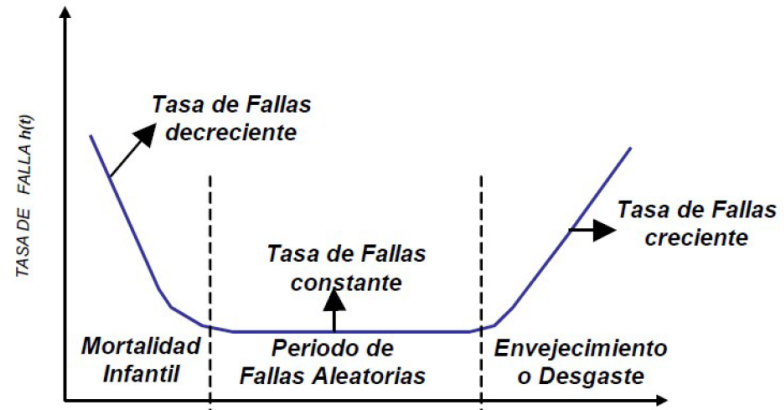
2.3. Elección de estrategia de mantenimiento

A partir de los costos se puede definir qué estrategia de mantenimiento utilizar al equipo en cuestión, dependiendo de las características de este.

La elección de la estrategia de mantenimiento queda determinada por tres criterios básicos:

1. La factibilidad técnica de la inspección
2. La criticidad de la falla
3. La relación entre la tasa de falla y los costos

Ya se mostró en la Figura-2.2 un diagrama para decidir la estrategia de mantenimiento. Otra forma de decidir es mediante la Figura-2.7, la cual tiene como bases de decisión, la forma de la curva tasa de falla y una comparación de distintos costos.



Correctiva	Correctiva	Correctiva	$C_{GC} < C_{GP}$
Correctiva	Preventiva cíclica	Preventiva cíclica	$C_{GC} > C_{GP}$ $C_I > (C_{GC} - C_{GP})$
Predictiva	Predictiva	Preventiva cíclica o Predictiva	$C_{GC} > C_{GP}$ $C_I < (C_{GC} - C_{GP})$

Figura 2.7: Elección de estrategia de mantenimiento según estado del ciclo de vida.

Fuente: [4]

En donde:

- C_{GC}: Costo global de mantención correctiva
- C_{GP}: Costo global de mantención preventiva
- C_I: Costo de inspección

El modelo que se presentará a continuación, está estrictamente basado en los costos de los mantenimientos, tanto de los mantenimientos correctivos como de los mantenimientos preventivos.

Para un equipo al que se le realice mantención correctiva, los costos de mantenimiento serán cada vez mayores mientras el equipo tenga más tiempo operando. Lo contrario sucede si a este mismo equipo se le realiza un mantenimiento predictivo: mientras mayor sea el intervalo de tiempo cada cuanto se le realice mantenimiento ($MTBF$), menor será el costo de mantenimiento. Al sumar estas dos curvas, se tendrá una curva del costo global, la cual, de tener esta un valor mínimo, este valor corresponde a la frecuencia con la que se le debe realizar mantenimiento al equipo, es decir, su $MTBF$. Por el contrario, si la curva no presenta un mínimo, al equipo se le debe realizar un mantenimiento correctivo a la falla. Esto se puede ver reflejado en la Figura-2.8.

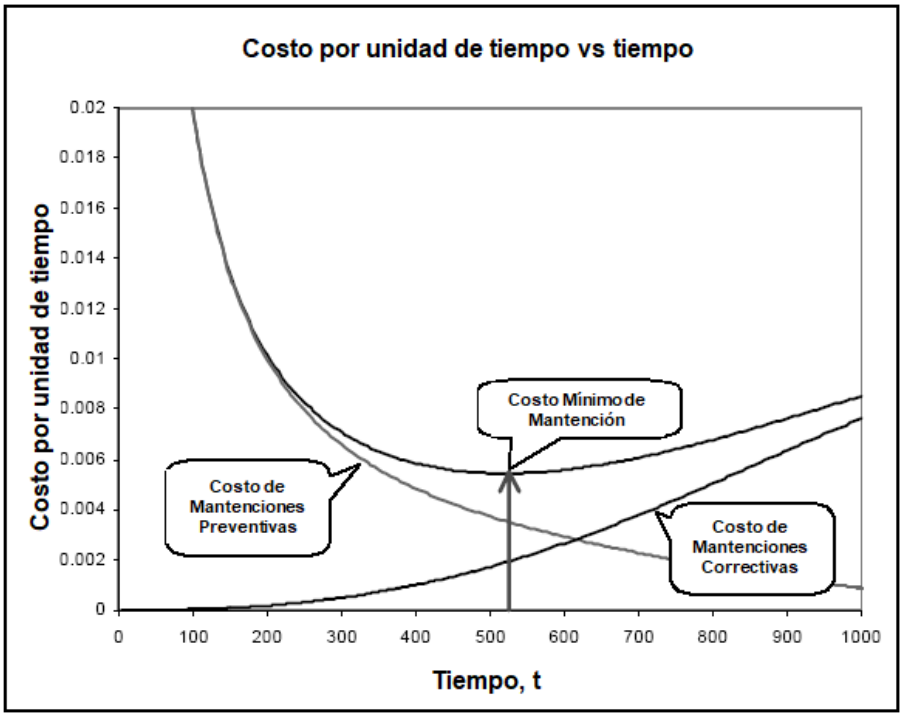


Figura 2.8: Curvas de costo de mantenimiento

Para que a un equipo sea económicamente conveniente realizarle mantenimiento preventivo a edad constante, se deben cumplir dos condiciones:

1. La tasa de fallas debe ser creciente
2. Los costos de la intervención de emergencia/correctiva deben ser mayores que la intervención preventiva.

La ecuación de costo de mantenimiento por unidad de tiempo se ve en la ecuación (2.19).

$$E_C = \frac{C_P \cdot R(t) + C_E \cdot (1 - R(t))}{MTBM_t + MTTR_t} \tag{2.19}$$

En donde:

C_P: Costo total de cada intervención preventiva, ecuación (2.20).

C_E: Costo total de cada intervención de emergencia/correctiva.

$MTBM_t$: Tiempo medio que opera el equipo entre mantenimientos (correctivos o preventivos) al tiempo t (equación (2.23).

$MTTR_t$: Tiempo medio en que el equipo está detenido por mantención en el tiempo t, ecuación (2.26).

$$C_P = MTTR_P \cdot C_{MO} + C_i \cdot MTTR_P + C_{R,P} \tag{2.20}$$

Donde:

$MTTR_P$: Tiempo medio en que el equipo está detenido por intervención preventiva.

C_{MO}: Costo de la mano de obra por unidad de tiempo.

$C_{R,P}$: Costo de los repuestos que se utilizan de manera preventiva

$$C_E = MTTR_C \cdot C_{MO} + C_{R,E} + C_M + C_i \cdot MTTR_C \tag{2.21}$$

Donde:

$MTTR_C$: Tiempo medio en que el equipo está detenido por intervención correctiva/emergencia.

C_i: Costo de ineficiencia; costo al que se incurre cuando el equipo deja de operar, ecuación (2.22).

C_M: Costo de la multa que tiene por excederse del tiempo presupuestado para el mantenimiento.

$C_{R,E}$: Costo de los repuestos que se utilizan durante imprevisto.

$$C_i = F - C_v \tag{2.22}$$

Donde:

F: Facturación, lo que se gana mientras el equipo opera.

C_v: Costos variables; costos en los que se deja de incurrir cuando el equipo deja de operar.

$$MTBM_t = R(t) \cdot t + MTBF_t \tag{2.23}$$

Donde:

$MTBF_t$ Tiempo medio entre fallas al tiempo t, ecuación (2.24).

$$MTBF_t = \frac{\int_0^t t \cdot f(t)dt}{F(t)} \tag{2.24}$$

Dado que la ecuación (2.24) incluye una integral y se está trabajando con datos discretos, se aproxima mediante una sumatoria a lo mostrado en la ecuación (2.25).

$$MTBF_t \approx \frac{\sum_0^t \{[(F(t_i) - F(t_{i-1})] \cdot \frac{t_i + t_{i-1}}{2}\}}{F(t)} \tag{2.25}$$

$$MTTR_t = R(t) \cdot MTTR_P + F(t) \cdot MTTR_C \tag{2.26}$$

En teoría, para hallar el mínimo costo de mantenimiento, la ecuación (2.19) se debe derivar e igualar a cero para hallar el tiempo t_P en que el costo se minimiza, pero dado que en la práctica eso es imposible, se itera con Excel y se encuentra el tiempo en que el costo es mínimo.

En la práctica, debe cumplirse que el tiempo t_P al cual el costo de mantenimiento es mínimo, debe ser menor que el $MTBF$ de la distribución de probabilidad (también llamado $MTBF$ natural) de la ecuación (2.7).

$$t_P < MTBF \tag{2.27}$$

2.4. Aspectos mineros/geológicos

Dado que el trabajo de memoria fue realizado en una minera, y tiene cercana relación con la variable minera/geológica, es que en este capítulo se darán ciertas definiciones y explicaciones que serán de utilidad más adelante.

- Secuencia de explotación:

  Se denomina secuencia de explotación o estrategia de consumo de reservas, a la forma en que se extraen los materiales desde el rajo, durante el período comprendido entre el inicio de la explotación hasta el final de ella. La extracción del material se realiza en sucesivos rajos intermedios, los que reciben el nombre de Fases o Expansiones.

  La secuencia de extracción de las distintas fases tiene una estrecha relación con la distribución de las variables geológicas, geomecánicas, metalúrgicas y económicas del yacimiento.

- Índice geológico de resistencia GSI:

  El índice geológico de resistencia es un sistema de caracterización de macizos rocosos que ha sido desarrollado en la ingeniería de mecánica de rocas para satisfacer la necesidad de datos de entrada confiables relacionados con las propiedades del macizo rocoso requeridos para el análisis numérico o soluciones de diseño para el diseño de túneles, taludes, o cimentación de rocas. El carácter geológico del material rocoso, junto con la valoración visual del mismo, son usados directamente como datos de entrada para la selección de los parámetros para predecir la resistencia y deformabilidad del macizo rocoso. Esto también provee un método en campo para caracterizar macizos rocosos difíciles de describir [6].

- Criterio de rotura lineal Mohr-Coulomb C:

  Esta teoría sostiene que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no de cualquier esfuerzo máximo normal o cortante puro. Por lo tanto, la relación funcional entre el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante en un plano de falla se puede expresar en la forma

$$\tau = f(\sigma). \tag{2.28}$$

En ingenieria geotécnica se utiliza para definir resistencia al corte de suelos y rocas en diferentes casos de tensión efectiva.

Para el yacimiento de Collahuasi, este criterio puede ser estimado por tablas internas de la Compañía, teniendo como datos de entrada la unidad litológica y el GSI.

Capítulo 3

Descripción de palas electromecánicas en faena

En este capítulo se describirá las palas electromecánicas que operan en faena de la Compañía. Se nombrará los tipos de palas que operan, sus sistemas, y sus elementos de desgaste.

En estas palas su fuente de energía para operar es la electricidad. Las palas son alimentadas con cables de $13[kV]$. Tienen la función de sacar el material tronado, ya sea mineral o lastre, y cargarlo en los camiones de extracción CAEX (Figura-3.1), los cuales llevan el mineral a los chancadores para su posterior molienda, o llevan el lastre a los botaderos.

Cualquier mina a rajo abierto depende exclusivamente de sus palas. La disponibilidad y confiabilidad de las palas hace depender a todo el proceso de ellas.



Figura 3.1: Pala electromecánica cargando CAEX

3.1. Tipos de palas electromecánicas

En faena operan dos tipos de palas electromecánicas.

1. Pala marca Bucyros, modelo 495HR, Figura-3.2.
2. Pala marca P&H, modelo 4100XPC, Figura-3.3.



Figura 3.2: Pala electromecánica Bucyros modelo 495HR



Figura 3.3: Pala electromecánica P&H modelo 4100XPC

Ambas palas comparten la mayoría de sus características de diseño, tanto estructurales como funcionales. En la Figura-A.1 y Figura-A.2 en el Anexo A se pueden ver los componentes principales de cada pala.

3.2. Sistemas principales

Los sistemas de las palas se dividen según la función que desempeñan al operar.

- Sistema de empuje (Crowd): Encargado del movimiento del mango del balde en dirección hacia el frente o hacia atrás, controlando de esta manera la profundidad de penetración del balde en el banco.

- Sistema de levante (Hoist): Es el sistema encargado de realizar los movimientos ascendentes y descendentes del balde durante la operación en el frente.

- Sistema de propulsión (Propel): Sistema encargado de realizar el traslado de la pala de una ubicación a otra, a través de dos motores que se encargan de realizar el movimiento de las orugas.

- Sistema de giro (Swing): Sistema encargado de realizar el giro de la estructura, utilizado para excavar en el frente y para cargar los camiones a los costados.

3.3. Baldes de palas electromecánicas

Como se ha mencionado anteriormente, los baldes de las palas son vitales para la operación, y estos están blindados para proteger a la estructura del balde. Se blindan con elementos de desgaste, o GETS.

A continuación se presentan en la Tabla-3.1 los elementos de desgaste, y su cantidad existente por cada balde.

Tabla 3.1: Elementos de desgaste más característicos en un balde

Elemento de desgaste	Cantidad
Diente	9
Seguro diente	9
Adaptador	9
Abrazadera de cierre (Wear Cap)	9
Cuña	9
Perno cuña	9
Cuña invertida	9
Tapa de desgaste	9
Cubierta de labio	6
Cubiertas laterales	2
Guardera	1
Seguro guardera	16
Estructura soporte entredientes	16

3.3.1. Elementos de desgaste

A continuación se mostrarán los elementos de desgaste presentes en un balde.

Dientes y Tapa de desgaste:

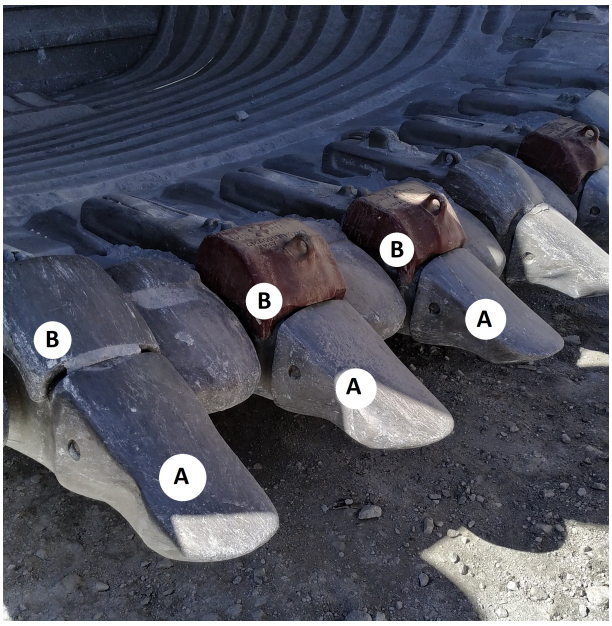


Figura 3.4: Dientes y Tapa de desgaste A) Diente; B) Tapa de desgaste

Guarderas:



Figura 3.5: Guarderas de lado izquierdo y derecho

Entrediente:



Figura 3.6: Entrediente. A ambos lados hay dientes

Adaptador junto a los elementos para adosarlo al balde: abrazadera de cierre, cuña y perno cuña:

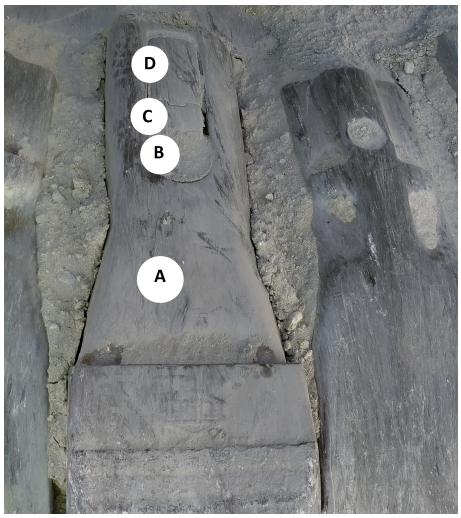


Figura 3.7: A) Adaptador; B) Abrazadera de cierre; C) Cuña; D) Perno cuña

3.3.2. Marcas de elementos de desgaste en faena

En la actualidad en faena de la Compañía operan 4 marcas de elementos de desgaste en palas electromecánicas, los cuales se presentan en la Tabla-3.2.

Tabla 3.2: Marcas de elementos de desgaste de las palas electromecánicas en faena

Pala	**N°de Pala**	**Marca GETS**	**Representante**
Bucyros 495HR	6	Hensley	Komatsu
	8		
	9		
	10		
P&H 4100 XPC	11	Berkeley Forge	Komatsu
	12		
	13	Esco	Elecmetal
	14	MTG	Minetec

Capítulo 4

Análisis de estrategia de mantenimiento actual

En el presente capítulo se presentará y analizará la estrategia actual de mantenimiento que poseen los dientes, la manera en que se realizan estos mantenimientos, y sus respectivos costos.

4.1. Estrategia actual

El total de dientes mostrados en la Tabla-3.2 se mantienen bajo la misma estrategia de mantenimiento.

Los dientes presentan en promedio un largo aproximado de 25 pulgadas, y mientras las palas están en operación, el largo de los dientes es constantemente medido por personal en turno. Para esto el personal interrumpe la operación, realiza la medición anotando los datos en una planilla (Figura-4.1). Debido a la constante extracción de material del banco, los dientes se desgastan, y se deben reemplazar antes de que se comience a desgastar el Adaptador, pieza encargada de hacer la unión entre el balde y el diente.

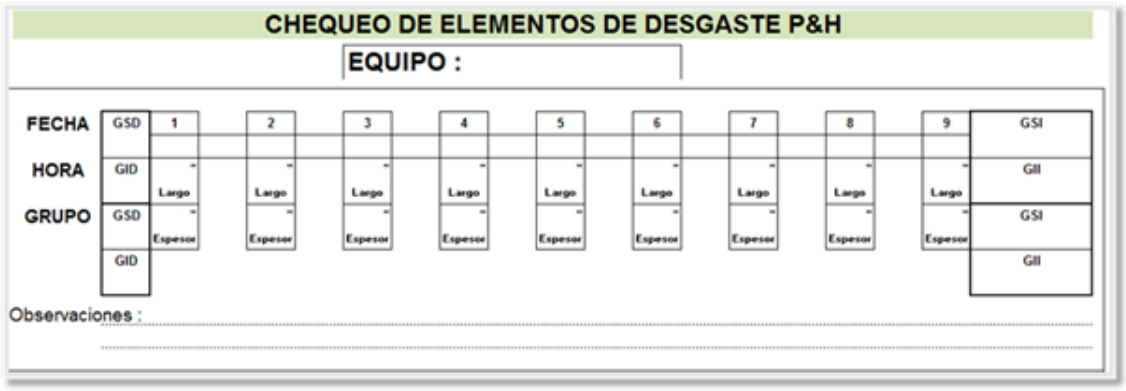


Figura 4.1: Planilla para registrar medición de elementos de desgaste

La planilla de la Figura-4.1 está considerada para dos turnos, día y noche, grupo par o turno A, y grupo impar o turno B. Cada grupo tiene una jornada laboral de 12 horas, y su turno es siete días de trabajo en faena y siete días de descanso. El turno A inicia sus labores a las 20:00 y finaliza a las 08:00 del día siguiente. El turno B inicia sus labores a las 08:00 y finaliza a las 20:00.

El proceso de mantenimiento de los dientes se puede resumir mediante la Figura-4.2: el personal se dirige a la pala en operación para hacer la medición de los dientes. El personal se pone en contacto con el operador de la pala para realizar un breve cese de la operación.

Si los dientes tiene un largo aproximado mayor a 14 pulgadas, el reporte con las mediciones registradas es enviado al jefe de turno al finalizar el turno. Por el contrario, si algún diente posee un largo aproximadamente igual o menor a 14 pulgadas, este se debe cambiar. Para poder realizar el cambio, el personal de mantenimiento se pone en contacto con Despacho Mina, para poder fijar una hora próxima en que el mantenimiento se realice. Luego Despacho Mina informa de la hora disponible al personal de mantenimiento. Con anticipación a la hora fijada, el personal se dirige al pañol a buscar las herramientas necesarios junto con el camión pluma articulado, necesario para realizar el transporte e izaje de los dientes mediante eslingas. Junto con el camión y las herramientas el personal se dirige a la bodega ”Shelter 1”, en donde se encuentran almacenados los dientes. Se cargan los dientes y el personal se dirige hacia la pala detenida. Ya en el lugar de la pala, el personal realiza el cambio de los dientes desgastados, y se envía un reporte al jefe de turno.

En la Figura-4.3 se aprecia a personal en rutina de inspección de dientes midiendo diente en la posición n°1 con flexómetro.

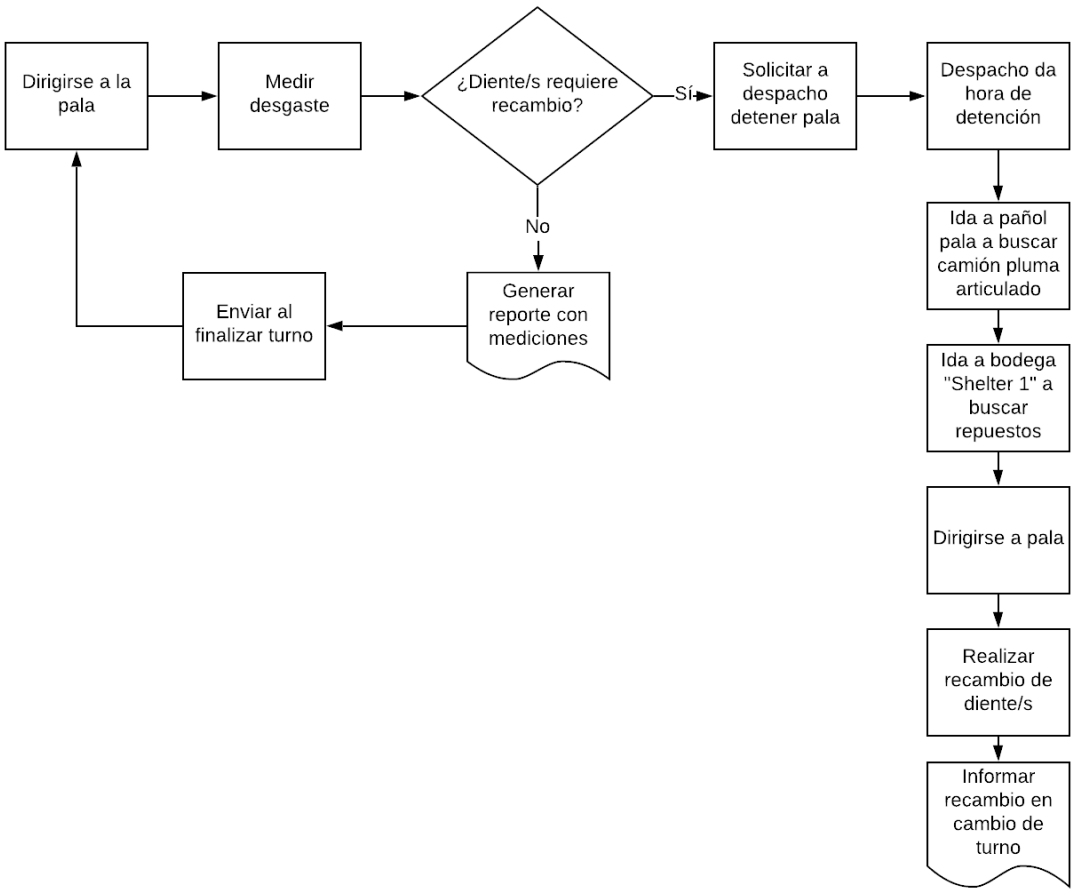


Figura 4.2: Diagrama de flujo del mantenimiento actual de los dientes



Figura 4.3: Personal de mantenimiento realizando inspección a dientes

Por la descripción anterior, es que es posible clasificar el mantenimiendo de los dientes como una estrategia de mantención preventiva basada en condición, CBM.

Los métodos usualmente utilizados de diagnóstico de la condición que se tienen son por vibración, termografía, ensayos no destructivos, tribología, etc. Para el presente caso, para diagnosticar la condición se recurre a la medición de los dientes.

Todo el proceso de mantenimiento se realiza con la finalidad de evitar el envío de elementos inchancables al chancador. En Anexo-B se puede encontrar la definición que la Compañía da a Ïnchancable", dentro de la cual se encuentran los elementos de desgaste como elementos inchancables. Estos se producen cuando el diente se cae debido a una mala sujeción al Adaptador, o el diente se quiebra producto de sobreesfuerzos.

Ha ocurrido con anterioridad que dientes u otro elemento de desgaste se cae o quiebra en operación, y el GET es cargado por la misma pala al CAEX. Luego el CAEX cargado deposita el material en el chancador, y por este pasa el elemento inchancable, dañando componentes del chancador y provocando millonarias pérdidas a la Compañía. El caso más llamativo fue durante Octubre de 2017, en donde un diente y un adapter provocaron detención y daño de un chancador primario, generando pérdidas de más de treinta millones de dólares. Más detalles se pueden ver en Anexo, Figura-C.1.

Dada la manera que se mantiene los dientes, se puede catalogar la actual estrategia de mantenimiento, como una estrategia de mantenimiento preventiva basada en condición, en donde se realiza un constante monitoreo al largo que presentan los dientes, y cuando este se sale de los parámetros, se procede a su reemplazo.

Esta estrategia no fue elegida fruto de algún estudio de costos o confiabilidad. Fue elegida para evitar elementos inchancables y evitar grandes pérdidas para la compañía, motivo mismo por el que no se elige una estrategia de mantenimiento correctiva.

Esta estrategia se realiza sin contabilizar ni escatimar en los costos que produce a la Compañía.

4.2. Indicadores de mantenibilidad

Si bien el registro que se lleva en cuanto a indicadores de mantenibilidad de GETS en la compañía es mínimo y/o incompleto, desde el software Dispatch®se puede extraer cierta información de utilidad.

Con anterioridad en la Compañía se había realizado una extracción y limpieza de datos del software Dispatch®, con los cuales se conformó el gráfico mostrado en la

Figura-4.4, el cual muestra los $MTBF$ de GETS de distintas marcas.

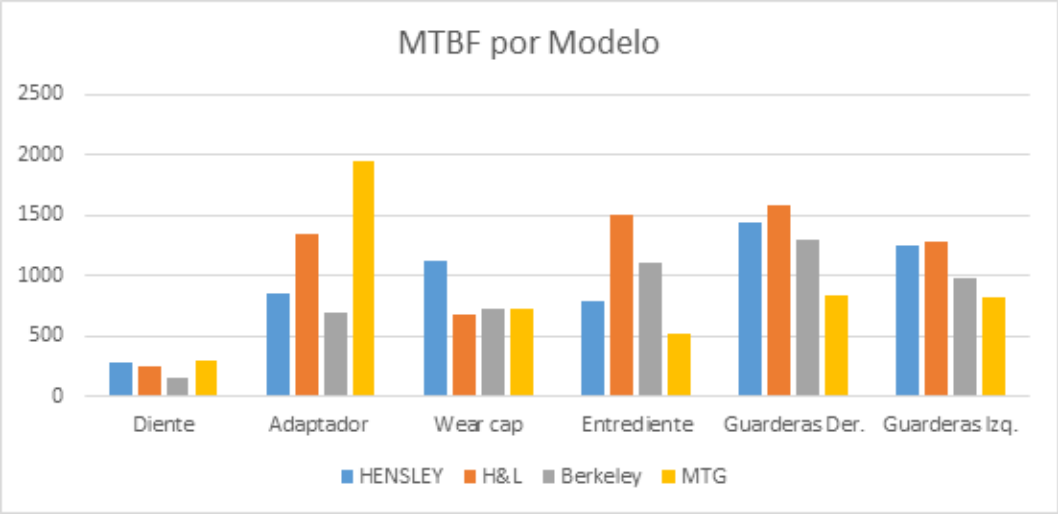


Figura 4.4: $MTBF$ de principales GETS ordenados por marca

Como se observa en la gráfica, los dientes son el elemento de desgaste que tienen el menor $MTBF$, independiente de su fabricante. Esto significa que la mayor parte de las detenciones de las palas por concepto de GETs, son debidos a los dientes.

El motivo es simple y ya explicado con anterior: los dientes son el elemento de desgaste que más sufre desgaste y sobreesfuerzos, debido a que ellos son encargados de romper el banco para que el balde cargue con el material.

Durante el periodo correspondiente, la pala en cuestión tuvo una disponibilidad igual a 74,7 %.

Tabla 4.1: Valores promedios y budget de disponibilidad de palas electromecánicas durante el 2017

	Promedio	Budget
Disponibilidad física	73,09 %	75,8 %

4.3. Caso de oportunidad

En la Superintendencia Mantención Palas se tiene una nula cultura de registrar o analizar data con el fin de optimizar procesos de mantenimiento. Existe una tendencia a realizar mantenimientos correctivos, a realizar cambios de componentes de las palas

de manera preventiva al cumplir ciertas horas de funcionamiento dadas sin estudios, o a invertir gran capital en realizar inspecciones a elementos críticos

Un caso de lo anterior es el mantenimiento que se le realiza a los GETs. Si bien no son del tipo correctivo, se invierte una gran cantidad de recursos en la inspección de estos.

Ante la incertidumbre de si aplicar una estrategia de mantemiento preventiva a edad constante para el total de la flota de palas implicará menos costos que la estrategia actual, y ante la dificultad de cuantificar los costos de inspección en los que el personal incurre, se tomaron los datos de una pala específica para realizar el estudio.

Como ya se ha mencionado anteriormente, en la Superintendencia Mantención Palas no existe una cultura de análisis de datos, por lo que estos mismo se encuentran de manera muy desorganizada y de engorroso acceso. Sin embargo, durante el periodo comprendido entre el 16 Junio de 2017 y 25 de Febrero de 2018, se le hizo seguimiento a un balde con GETS marca MTG, balde que durante las operaciones en este periodo fue instalado en la pala n°11 P&H 4100 XPC. Durante todo el periodo de operación, la pala estuvo extrayendo mineral de la fase 10A.

4.3.1. Fase de operación

Como se nombró anteriormente, la fase en la cual operó la pala fue la fase 10A. Está fase en la actualidad se encuentra a continuación del fondo mina, como se aprecia en la Figura-4.5.

Se caracteriza por ser una fase de de poca dureza. Para representar esto de mejor manera se utilizará el GSI y el criterio de rotura lineal Mohr-Coulomb C.

Según estudios geológicos internos, la fase 10A posee un $GSI = 40 - 50$, lo que según [7], corresponde a condiciones de superficie pobre, con estructura disgregada. Si bien el GSI es mayoritariamente utilizado para diseñar rajos, también puede ser utilizado para evaluar la dureza de este, al conocer la unidad litológica de la fase.

La fase 10A posee mayoritariamente una unidad litológica PQS (pórfido con alteración fílica), y a través de estudios internos en la Compañía, se puede tener una aproximación del Criterio Mohr-Coulomb P[35] de la fase 10A, el cual tendría un valor $C_{10A} = 253,9[kPa]$.

La fase 12 en el rajo es conocida por ser una fase de alta dureza, en donde los GETS tienen pocas horas de vida útil en comparación al resto de las fases. Si se hace el mismo análisis anterior, la fase 12 tiene un Criterio Mohr-Coulomb P[35] $C_{12} = 572[kPa]$,

valor que excede al de la fase de operación en un 125 %.

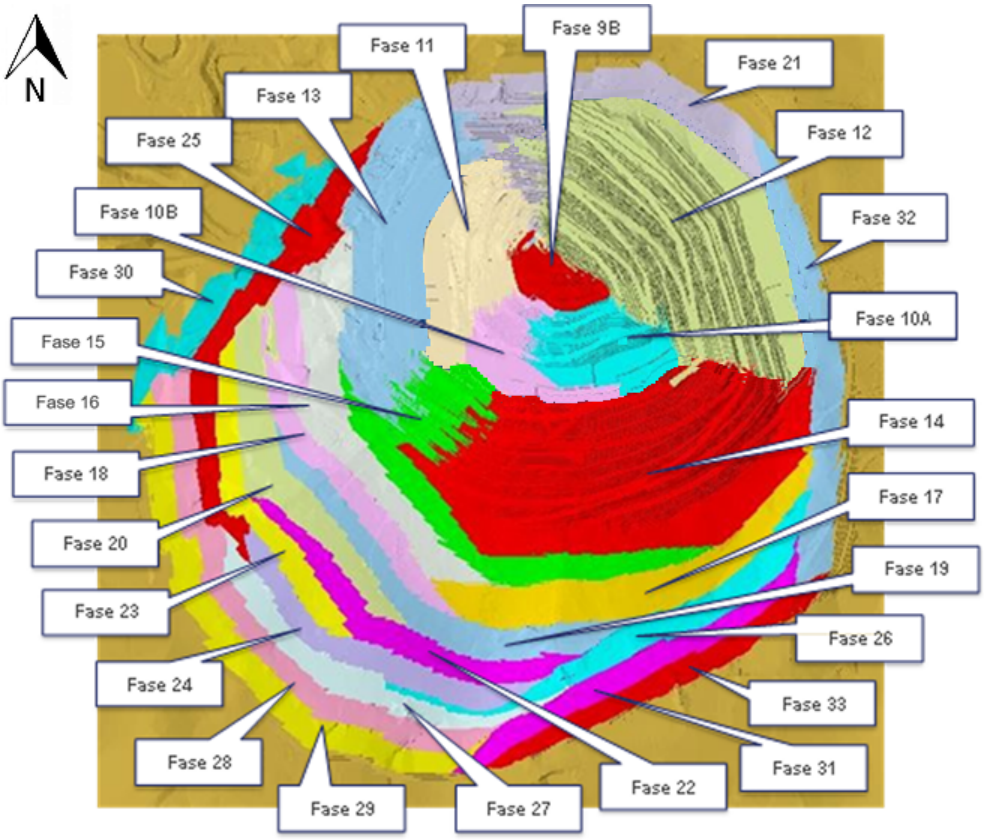


Figura 4.5: Fases del rajo Rosario.

Fuente: LomBook Collahuasi 2018

4.4. Costos

Para realizar la cuantificación de costos, la estrategia acordada con la Superintendencia Mantención Palas fue de asociar los costos de pala detenida a cobre fino. Además, dado que el periodo de toma de datos es menor a un año (254 días), todos los costos se extrapolarán al periodo de un año, para que los resultados sean comparables.

Los costos de la estrategia actual de mantenimiento de los dientes se dividieron en costos de repuesto, costos por pala detenida, y costos de inspección, los cuales sumados dan el costo total de la estrategia de mantenimiento actual.

4.4.1. Costo de repuestos

El diente que se utilizó en la pala n°11 es un diente marca MTG, modelo MA500RSX, proveído por la empresa MINETEC. Este respuesto tiene un valor de $USD\ 766,92$.

Durante el periodo de prueba, fueron registrados 148 cambios de dientes. Al extrapolar el costo de estos cambios al periodo de un año, se tiene:

$$C_{repuestos} = USD\ \ 163.106,14 \tag{4.1}$$

4.4.2. Costos por pala detenida

El costo por pala detenida corresponde a los ingresos que la Compañía deja de percibir como consecuencia de su detención.

Se tienen los siguientes ítems para obtener este costo:

- Capacidad operativa C_{op}: Corresponde al rendimiento de la pala en cuestión durante el periodo.
- Precio del cobre P_{Cu}: Corresponde al precio promedio que tuvo el cobre durante el periodo.
- Ley de cobre L_{Cu}: Es el porcentaje promedio de cobre que posee el rajo Rosario.
- Recuperación de cobre en planta R: Es el porcentaje de cobre que se recupera del proceso de flotación.
- Porcentaje mineral/estéril $\%_{M/E}$: Obtenido de la Relación Lastre/Mineral REM, generalmente expresado en forma de fracción $REM = a/1$, quiere decir que para producir una tonelada de mineral se deben cargar a toneladas de lastre. De aquí se obtiene el porcentaje mineral/estéril como $\%_{M/E} = a/(a+1)$.

Con la ecuación (4.2) se obtiene el costo de la pala detenida.

$$C_{PD} = C_{op} \cdot P_{Cu} \cdot L_{Cu} \cdot R \cdot \%_{M/E} \tag{4.2}$$

Los valores numéricos son:

- $C_{op} = 4281[t/h]$
- $P_{Cu} = 279,68[¢/lb] = 6.125,88[USD/t]$

- $L_{Cu} = 0,65\,\%$
- $R = 85\,\%$
- $REM = 4/1 \Leftrightarrow \%_{M/E} = 20\,\%$

Con estos valores se obtiene un costo de pala detenida de

$$C_{PD} = 29.168,28[USD/h] \tag{4.3}$$

Por concepto de cambio de dientes, anualmente la pala n°11 estuvo detenida $27,98[h]$. Por tanto, el costo por pala detenida anual, debido a mantenimientos de los dientes es de

$$C_{PD,anual} = 29.168,26[USD/h] \cdot 27,98[h] = USD\ 872.499,07.$$

4.4.3. Costos de inspección

Durante la operación de la pala, el personal de mantenimiento está constantemente inspeccionando y midiendo el largo de los dientes de manera preventiva.

Esta inspección se realiza en plena operación de la pala: durante la operación, el personal de mantenimiento se contacta vía radio con el operador de la pala, para que esta detenga su operación y el personal realice sus labores.

El tiempo que la pala estuvo detenida anualmente por inspección, ecuación (4.4):

$$T_i = (\#inspecciones) \cdot (duracion\ inspeccion) \cdot (disponibilidad\ pala) \tag{4.4}$$

El personal a cargo de las inspecciones de los dientes es el mismo que está a cargo del mantenimiento de estos. Ellos realizan tres inspecciones por día a los dientes, en donde los dientes se miden y se registra su medición. Cada inspección tiene una duración estimada de cinco minutos. Por tanto el tiempo anual de inspección es el siguiente:

$$T_{insp} = 3 \cdot 5\frac{[min]}{[dia]} \cdot 365\frac{[dia]}{[a]} \cdot \frac{1}{60}\frac{[h]}{[min]} \cdot 74,7\,\% = 68,1[h/a]$$

Con este tiempo calculado se calcula el costo de las inspecciones anual, C_i:

$$C_{insp} = C_{PD} \cdot T_{insp} = USD\ 1.988.219,11$$

4.4.4. Costo total

Una buena aproximación del costo total de la estrategia actual de mantenimiento de los dientes sería sumar los costos detallados anteriormente. Hay ciertos costos que se omitieron por su poco impacto y poca periodicidad.

El costo total anual es de

$$C_T = C_{repuestos} + C_{PD,anual} + C_{insp} = USD\ 3.023.824,32.$$

4.5. Disponibilidad

Como se dijo con anterioridad, la pala n°11 durante el periodo tuvo una disponibilidad de un 74,7 %. De la indisponibilidad restante, un 1,1 % del tiempo corresponde a detenciones por concepto de dientes, en donde se incluye detenciones por mantenimiento y detenciones por inspecciones.

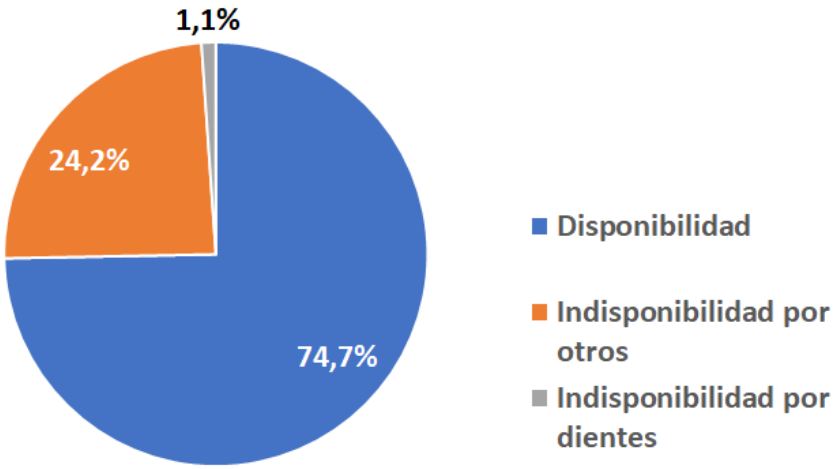


Figura 4.6: Disponibilidad de la pala n°11 durante el periodo de en cuestión.

Tabla 4.2: Detalle de disponibilidad de Figura-4.6.

Disponibilidad	74,7 %	6548,7$[h]$
Indisponibilidad por otros	24,2 %	2120,2$[h]$
Indisponibilidad por dientes	1,1 %	96,1$[h]$

Capítulo 5

Propuesta de mantenimiento de dientes de balde

En el presente capítulo se realizará una propuesta de mantenimiento para los dientes. Primeramente se realizará un análisis de la actual estrategia de mantenimiento, para luego dar paso al análisis de los resultados del estudio realizado, para finalizar con una propuesta de mantenimiento.

5.1. Análisis situación actual

Como se estipuló con anterioridad, los dientes son reemplazados cuando, producto del desgaste, llegan a un largo aproximado de 14 pulgadas. De el hecho anterior se tiene como implicancia algunas falencias:

- Dado que los dientes son llevados al límite de su vida útil, la confiabilidad de estos al momento del reemplazo es baja (ver Tabla-5.2), lo que aumenta la probabilidad de tener elementos inchancables y de activar el Protocolo de gestión de inchancables (ver Anexo-B), con sus respectivos costos.

- El largo es el único parámetro al que se le hace seguimiento. No se les realiza una inspección visual minuciosa o utilización de ensayos no destructivos para ver condición del diente.

- Dado que los dientes no se desgastan todos simultáneamente, el mantenimiento de estos no implica que se reemplacen los 9 dientes de una sola vez, lo que

significa que para cambiar todos los dientes se requieren varios traslados del personal, y mayor detención de la pala.

Desde el punto de vista de la gestión misma del mantenimiento se identificaron algunas falencias como las que siguen a continuación:

- Se destina gran cantidad de recurso humano a la inspección. El personal no solo está pendiente de los dientes, también del resto de los GETS, y de otras tareas relativas al mantenimiento.

- El personal del área Mantención Palas está centrado solo en cumplir la disponibilidad propuesta en el Budget. Dicho de otra forma, el Budget propone una disponibilidad a cumplir, pero no hace mención a los costos, lo que conlleva a que el personal no escatime en recursos para lograrla. Esto además da paso a realizar mayoritariamente mantenimientos correctivos, y de manera preventiva se realizan reemplazos de componentes de las palas por horómetro recomendados por el fabricante, sin efectuar análisis a las causas de las fallas ni a los horómetros recomendados.

5.2. Estudio

La manera de proceder se dividirá en dos partes: una que muestre los parámetros de Weibull, y otra que estará orientada a buscar el momento oportuno de mantenimiento que minimice los costos manteniendo una buena confiabilidad.

5.2.1. Parámetros Weibull

La data utilizada consiste en los TTF de los dientes en las nueve posiciones del balde.

Para el cálculo de los parámetros de Weibull se utilizaron los TTF que se tenían. El TTR de cada reparación, si bien no se tenía el dato correspondiente a cada reparación, en conjunto con personal se estimó en 1,5 horas.

Dado que cada diente posee una data independiente del otro, a cada posición de diente se le calcularon los parámetros de Weibull, y de esta manera fueron obtenidos 9 posibles casos.

Utilizando el método de Mínimos Cuadrados detallado en la Subsección 2.2.6, se calculó los siguientes parámetros de cada diente durante el periodo correspondiente:

Tabla 5.1: Parámetros Weibull de cada posición de diente durante el periodo

	Parámetros Weibull		
Posición diente	$\beta[-]$	$\eta[h]$	$\gamma[h]$
1	1,69	377,2	0,0
2	1,33	290,0	0,0
3	1,58	250,3	0,0
4	2,72	278,7	0,0
5	2,76	279,0	0,0
6	2,11	277,2	19,8
7	1,83	259,2	37,5
8	1,83	259,2	37,5
9	1,29	336,1	0,0

Ahora es posible calcular la confiabilidad que poseen los dientes al final de su funcionamiento, mostrados en la Tabla-5.2.

Tabla 5.2: Confiabilidad al finalizar la vida promedio en cada posición

Posición diente	Duración promedio[h]	Confiabilidad
1	330	45,1 %
2	233	47,4 %
3	208	47,4 %
4	246	49,2 %
5	246	49,5 %
6	262	47,2 %
7	264	45,9 %
8	264	45,9 %
9	290	43,7 %
Promedio	260	46,8 %

5.2.2. Análisis Estudio

Para poder calcular un tiempo de reemplazo de los dientes, es necesaria la confiabilidad. Sin embargo, se tienen 9 posibles casos a utilizar, y se generaran filtros para finalmente utilizar solo un caso que se acomode a los propósitos de esta memoria.

Con bases en la teoría, se tiene que para elementos sometidos a desgaste, se debe tener un $\beta > 1$, y para elementos que se comienzan a desgastar apenas son utilizados se tiene un $\gamma = 0$. Por tanto, se la tabla Tabla-5.1 los dientes de las posiciones 6, 7 y 8 quedan eliminados para efectuar cálculos posteriores.

Para aplicar la teoría expuesta en la Sección 2.3, se utilizaron los siguientes datos, los que se fijaron en conjunto con la Superintendencia Mantención Palas.

Se asumió $C_{MO} = 0$ y $C_M = 0$, dado que las mantenciones son realizadas por personal interno de la Compañía y no por emppresas externas. Se asumió la ecuación (2.22) como la ecuación (4.3), es decir, $C_i = 29.168,28[USD/h]$.

Para los costos de respuestos C_R, existen dos de estos costos, uno preventivo y otro de emergencia. Se ausmió así, ya que, para los mantenimientos preventivos, la propuesta considera un cambio de los 9 dientes, por lo que el costo de un mantenimiento preventivo sería el de los 9 dientes, es decir $C_{RP} = 9 \cdot C_R$. Para mantenimiento de emergencia, se sigue la misma lógica; según la data, en promedio para intervenciones de emergencia se reemplazan en promedio 2 dientes. Por tanto, $C_{R,E} = 2 \cdot C_R$.

Por último falta fijar los valores de $MTTR_P$ y $MTTR_C$. Estos valores, basados en mantenimientos anteriores se fijaron en $MTTR_P = 1[h]$ y $MTTR_C = 3,5[h]$.

Con estos datos ya es posible calcular el costo de mantenimiento por unidad de tiempo $E_C[USD/h]$ de la ecuación (2.19). Este costo fue evaluado a un intervalo de $\Delta t = 5[h]$, para encontrar el tiempo t_P que minimice los costos de mantenimiento, realizado para las 9 posiciones.

Tabla 5.3: Tiempo en que el costo de mantenimiento de los dientes se minimiza para cada posición y $MTBF$ natural de cada posición

Posición diente	$t_P[h]$	$E_C[USD/h]$	$MTBF$ natural $[h]$
1	360	287,34	336,7
2	580	379,39	266,6
3	270	434,58	224,6
4	185	318,65	247,9
5	185	316,97	248,3
6	450	366,08	274,7
7	210	327,56	267,9
8	210	327,56	267,9
9	825	326,42	311,1

Anteriormente se descartaron las posiciones 6, 7 y 8. Ahora se deben descartar otras posiciones.

El $MTBF$ natural se calcula utilizando los parámetros de la Tabla-5.1 en la ecuación (2.7). Con esto ya calculado, el t_P debe cumplir con la desigualdad mostrada en la ecuación (2.27). Con lo anterior se descartan las posiciones 1, 2, 3, 6 y 9, quedando solo como opciones las posiciones 4 y 5.

Entre las dos opciones finales, se optará por elegir la posición 4, ya que presenta un E_C mayor al de la posición 5, evitando así idealizar el costo.

Tabla 5.4: Tiempo de recambio, costo de mantenimiento y confiabilidad

Posición diente	$t_P[h]$	$E_C[USD/h]$	Confiabilidad
4	185	318,65	72 %

En la Tabla-5.5 se muestran las confiabilidades para cada posición calculada a las 185 horas con los parámetros propios de cada posición.

Tabla 5.5: Confiabilidad calculada luego de 185 horas de funcionamiento

Posición diente	Confiabilidad a $t = 185[h]$
1	74,1 %
2	57,7 %
3	53,8 %
4	72,0 %
5	72,5 %
6	60,5 %
7	70,0 %
8	70,0 %
9	62,9 %
Promedio	66,0 %

Gráficamente, en la curva de costo de mantenimiento v/s tiempo en la Figura-5.1 se aprecia el punto al cual el costo es mínimo.

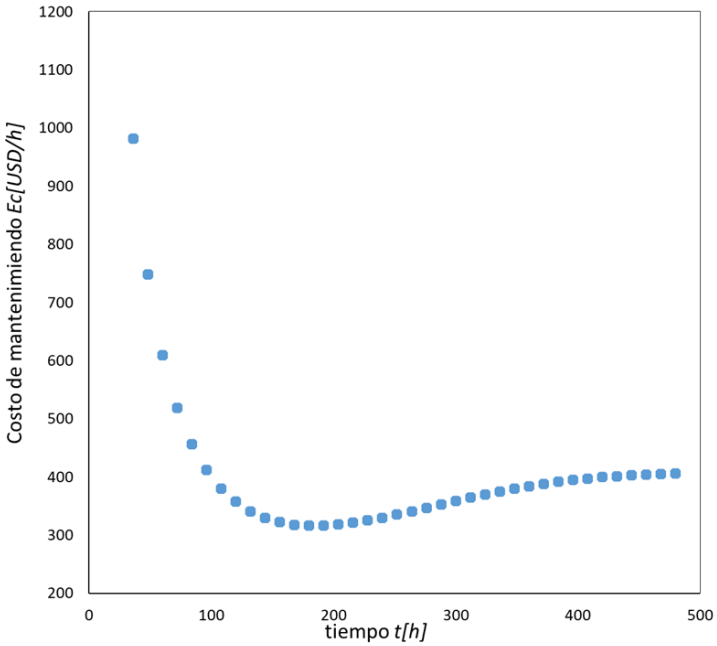


Figura 5.1: Costo de mantenimiento de posición n°4

También en la Figura-5.2, Figura-5.3, y Figura-5.4 se aprecia la confiabilidad, tasa de falla, y función densidad de probabilidad de los dientes en la posición n°4.

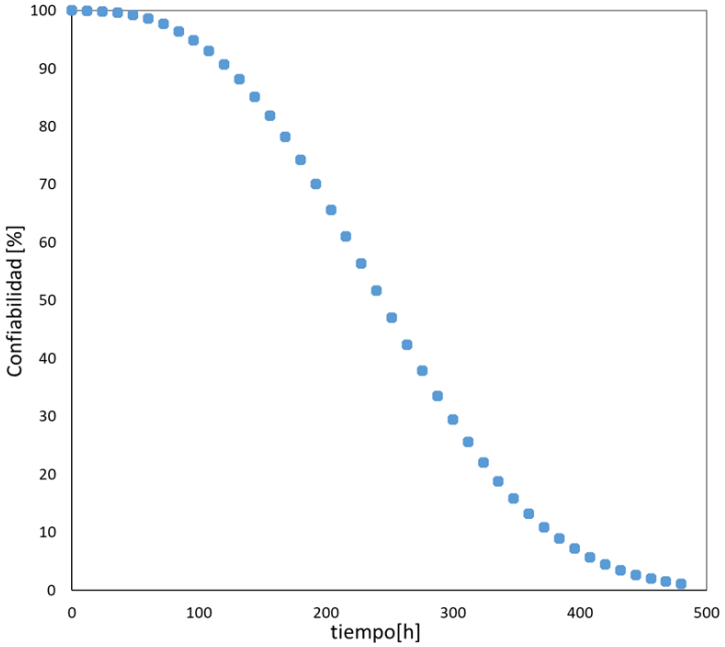


Figura 5.2: Confiabilidad de dientes en la posición n°4

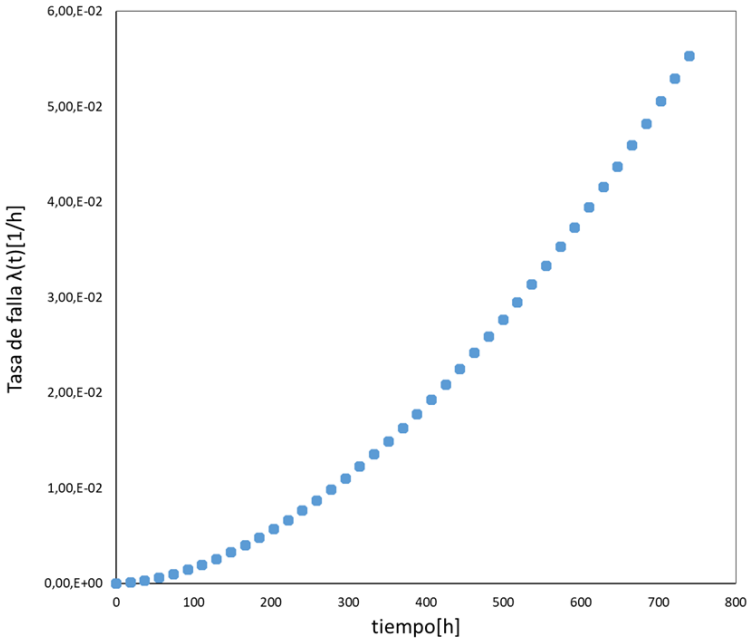


Figura 5.3: Tasa de falla de dientes en la posición n°4

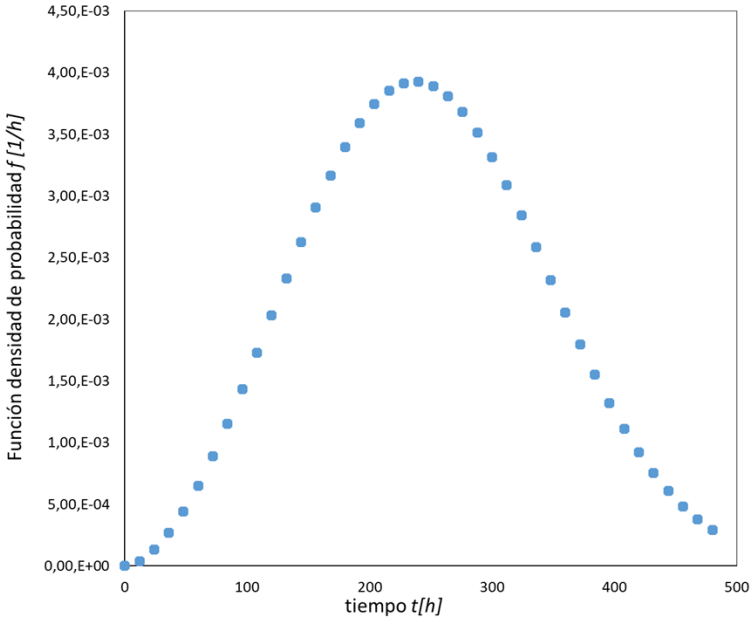


Figura 5.4: Función densidad de probabilidad de dientes en en la posición n°4

5.2.3. Disponibilidad

Con esta estrategia de mantenimiento, se prevee que la disponibilidad de la pala n°11 mejodará a 75,1 %, a la vez que la indiponibilidad por concepto de dientes disminuirá hasta un 0,7 %.

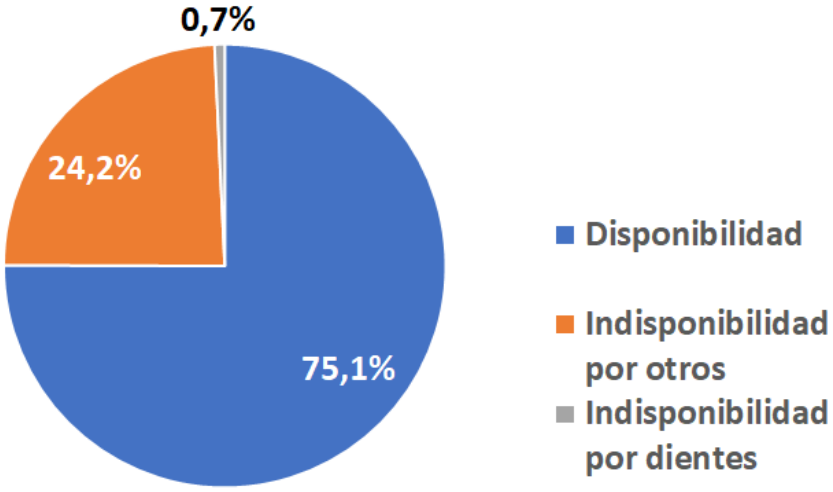


Figura 5.5: Disponibilidad de pala °11 con estrategia propuesta

Tabla 5.6: Detalle de disponibilidad de Figura-5.5.

Disponibilidad	75,1 %	6575,1$[h]$
Indisponibilidad por otros	24,2 %	2120,2$[h]$
Indisponibilidad por dientes	0,7 %	64,7$[h]$

5.3. Propuesta

El uso de una sola posición para los cálculos, es utilizado para tener representatividad de los 9 dientes del balde y para escoger la posición que más se adecue a los propósitos de esta memoria. Así, se modela de manera tal que todos los dientes se comportasen como el de la posición n°4, por tanto el costo E_C de la Tabla-5.4 considera los 9 dientes, además de considerar mantenimientos preventivos y correctivos, cantidad de repuestos, y costes por no producir.

La propuesta consiste en realizar el reemplazo de los 9 dientes en una sola intervención, de modo que al momento del mantenimiento aún tengan una buena confiabilidad, además de disminuir el tiempo en que la pala está detenida, evitando así tiempos muertos que podrían ser de funcionamiento (ver Figura-5.6).

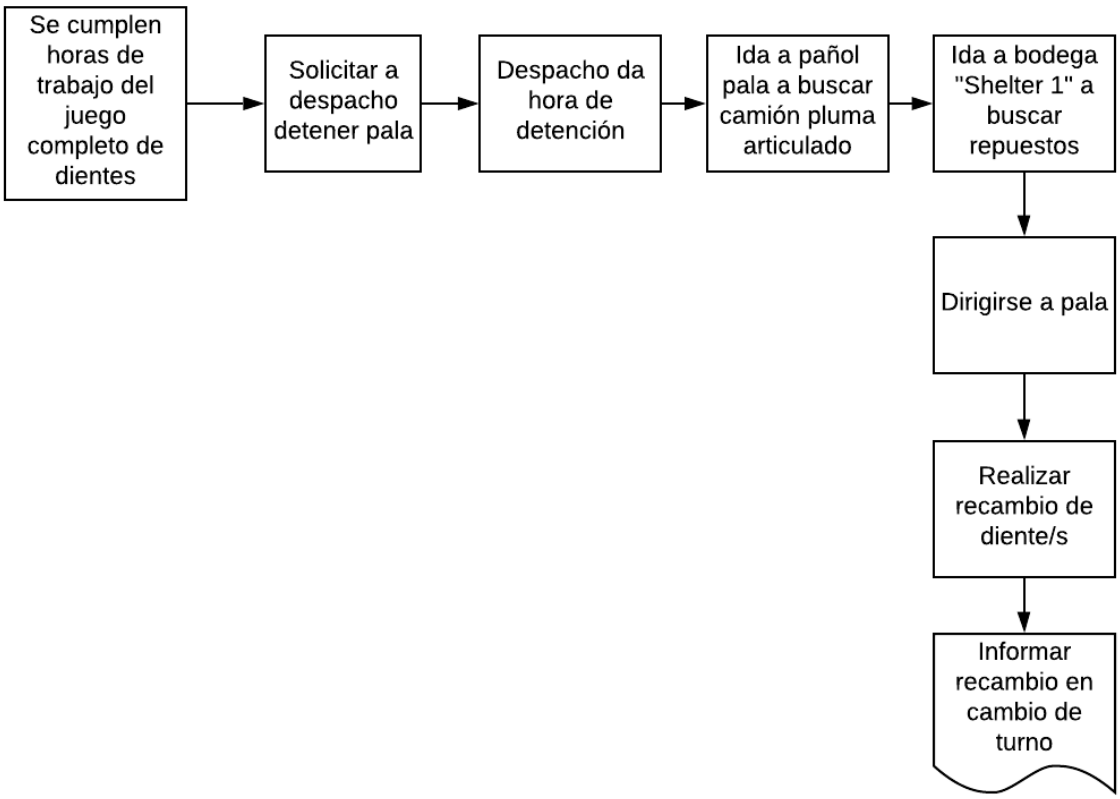


Figura 5.6: Diagrama de flujo de la estrategia propuesta

La propuesta consiste en realizar el reemplazo de los 9 dientes en una sola intervención, de modo que al momento del mantenimiento aún tengan una buena confiabilidad, además de disminuir el tiempo en que la pala está detenida, evitando así tiempos muertos que podrían ser de funcionamiento (ver Figura-5.6).

Se propone que para dientes MTG, instalados en una pala P&H, operando en una fase con características similares a la fase 10A, el mantenimiento de estos sea efectuado luego de 185 horas de operación, teniendo en este punto una confiabilidad de un 72 %.

El costo de la propuesta es de $318,65[USD/h]$. Anualmente, e incorporando a este costo la disponibilidad de la pala, el costo anual de la estrategia es mostrado en la ecuación (5.1).

$$C_{propuesta} = 318,65\frac{[USD]}{[h]} \cdot 365\frac{[dia]}{[a]} \cdot 24\frac{[24[h]}{1[dia]} \cdot 74,7\,\% = USD\ \ 2.085.182,16 \quad (5.1)$$

Para hacer una comparativa entre ambas estrategias, se presenta la Tabla-5.7.

Tabla 5.7: Tabla comparativa entre la actual estrategia de mantenimiento y la estrategia propuesta

	Estrategia propuesta	Estrategia actual
Duración$[h]$	185	260
Confiabilidad al término	72,0 %	46,8 %
Disponibilidad	74,7 %	75,1 %
Costo anual	USD 2.085.182,16	USD 3.023.824,32

Para que este trabajo esté en sintonía con el Ciclo Gestión de Riesgos, en la Tabla-5.8 se encuentran los principales riesgos que conlleva la instauración de la estrategia de mantenimiento propuesta en función de las 6M, junto con controles propuestos para gestionar cada riesgo.

Tabla 5.8: Riesgos de instaurar nueva estrategia con sus respectivos controles

6M	Riesgos	Controles
Mano de obra	Personal de mantenimiento se oponga a instaurar nueva estrategia.	Demostrar a personal que nueva estrategia involucrará menos riesgos relativos a la seguridad.
	Personal no se encuentra en condiciones para realizar cambios.	Personal debe estar en condiciones óptimas de salud y con sus elementos de protección personal.
Métodos de trabajo	Personal no puede cambiar 9 dientes.	Generar un instructivo de cambio de dientes que detalle herramientas a utilizar, cantidad mínima de personas para realizar cambio y tipos de eslingas a utilizar.
Maquinaria	Dientes se quiebran.	Aplicar protocolo de gestión de inchancables. Revisar características mineras del frente. Si características del frente no son las mismas a las de este estudio, evaluar nuevo estudio.
	Dientes se desgastan a su límite antes de las 185[h].	Durante los primeros 6 meses, realizar inspección a dientes dos veces al día durante operación. Si riesgo se mantiene, evaluar nuevo estudio.
Materia prima	Pala extrae mineral con características geológicas distintas.	Proseguir con estrategia de mantenimiento basado en condición y registrar cambios de dientes, largo, y en qué fase extrae.
Medición/inspección	Dientes mal instalados o tiempo excesivo para realizar cambios de 9 dientes.	Jefe de turno debe verificar la correcta aplicación del instructivo de cambio de dientes, y monitorear tiempo de recambio.
Medio ambiente	Dientes se quiebren por temperaturas bajas.	Si temperatura ambiente es menor a 15°C, operador de pala debe dar primeras 5 paladas con menor fuerza y menor tonelaje. Luego proceder de manera normal.

5.4. Efecto de las condiciones ambientales de operación

Ocurre con frecuencia que las palas al interior del rajo extraer mineral de distintas fases, lo que significa que los dientes no estarán operando en las mismas condiciones para las cuales se realizó el estudio, y la tasa de falla cambiará. La confiabilidad del diente será:

$$R(t) = e^{-\sum \lambda_i t_i} \tag{5.2}$$

En donde λ_i corresponde a la tasa de falla del diente asociada a cada fase o frente, y t_i corresponde al tiempo que operó.

Si bien esto no corresponde al presente caso, para calcular el tiempo al cual el costo es mínimo se debería realizar este mismo estudio en las fases involucradas.

Capítulo 6

Conclusión

El presente trabajo pretende realizar una evaluación y posterior propuesta de una estrategia de mantenimiento preventiva a edad constate para los dientes de baldes de palas electromecánicas. Para poder ser realizado, fue estudiado el modelo de gestión de la Compañía y su proceso de mantenimiento relativo a los GETS. Se analizó la estrategia de mantenimiento actualmente presente en los dientes llevando todo a costos. Posteriormente se evaluó una nueva estrategia de mantenimiento para aplicar a los dientes, y se generó una propuesta.

El Ciclo Gestión de Riesgos es una excelente herramienta de gestión basado en el mejoramiento continuo. Al aplicarlo de manera correcta a cada proceso, se asegura la eliminación de los riesgos y la realización de la actividad. Incluso si durante la actividad surge un imprevisto, mediante el uso del CGR pueden resolverse y continuar con la actividad. El CGR es fundamental para procesos de mantenimiento, y debe ser aplicado constantemente para entender el motivo de las fallas y soluciones que sean efectivas y eficaces.

La estrategia de mantenimiento actual está enfocada en evitar el envío de elementos inchancables, y al mismo tiempo sacarle un máximo provecho a los dientes, teniendo el personal que movilizarse en todo el rajo para realizar mantenimientos e inspecciones a los dientes durante el turno, y comprometiendo buena parte de la confiabilidad de los dientes. Esta estrategia consume buena parte de capital humano, que se encuentra realizando tareas de inspección. Al llevar estas inspecciones a costos, resultan ser las que más impactan en el costo total de la estrategia actual. Se concluye que es una estrategia efectiva pero poco eficiente.

Para poder evaluar los costos de una estrategia de mantenimiento preventiva cíclica

de los dientes, se tomó la data de un diente y se modeló de manera que todo el balde se hubiese comportado como ese diente. Este proceso fue realizado con cada diente, generando 9 posibles casos, de entre los cuales se escogió el de la posición n°4. Al comparar los costos totales de ambas estrategias, resultó ser que el costo de la estrategia propuesta es un 31,0 % menor que la estrategia actual, a la vez que la confiabilidad de la estrategia propuesta es un 42,5 % mayor que la estrategia actual.

Basados en costos totales de mantenimiento, facturación, y confiabilidad, se propone que para dientes MTG MA500RSX instalados en pala P&H 4100XPC, operando en frentes con características similares a la fase10A, se realice el cambio del set de los 9 dientes, una vez que estos hayan cumplido 185 horas de funcionamiento. Para controlar de manera adecuada la instauración de esta estrategia, se propone una inspección durante los primeros 6 meses.

Si bien el campo de aplicación de este estudio es acotado, si queda demostrado que esta estrategia de mantenimiento es aplicable a los dientes y al resto de elementos de desgaste, incluso a otros elementos de las palas electromecánicas que estén sometidos a desgaste, siempre y cuando exista la data necesaria para realizar el estudio.

6.1. Recomendaciones

Las cintas transportadoras que se dirigen con material hacia los chancadores tiene un electroimán que extrae elementos ferromagnéticos que podrían causar daños al chancador, sin embargo no son lo suficientemente potentes para extraer los elementos de desgaste. Complementario a la instauración de la estrategia propuesta, se recomienda una mejora en el sistema descrito.

Bibliografía

[1] SERNAGEOMIN 2019. Anuario de la minería de chile 2018. 269p. Santiago.

[2] José M^{a} Tamborero del Pino. Ntp 331. fiabilidad: la distribución de weibull. 1994.

[3] A Doniz Magallon. Implementación de mantenimiento preventivo/predictivo en equipo biomédico en el instituto mexicano del seguro social. México: Uttt, 2011.

[4] E Fuenmayor. Calculando la frecuencia óptima de mantenimiento o reemplazo preventivo. 2017.

[5] Carolina Alejandra Jara Galleguillos. Desarrollar y validar una metodología de implementación de proyectos operacionales en la vp procesos, que responda al ciclo de gestión de riesgos de compañía minera doña inés de collahuasi. 2017.

[6] P Marinos, V Marinos, and E Hoek. El índice de resistencia geológica (gsi): Una herramienta de caracterización para la evaluación de las propiedades ingenieriles de macizos rocosos. Canadá: Rocscience, 2007.

[7] VIII Marinos, P Marinos, and Evert Hoek. The geological strength index: applications and limitations. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 64(1):55–65, 2005.

[8] Raquel Salazar Moreno, Abraham Rojano Aguilar, Esther Figueroa Hernández, and Francisco Pérez Soto. Aplicaciones de la distribución weibull en ingeniería de confiabilidad. Memoria del XXI Coloquio Mexicano de Economía Matemática y Econometría, page 148, 2011.

Anexo A

Principales partes de palas electromecánicas

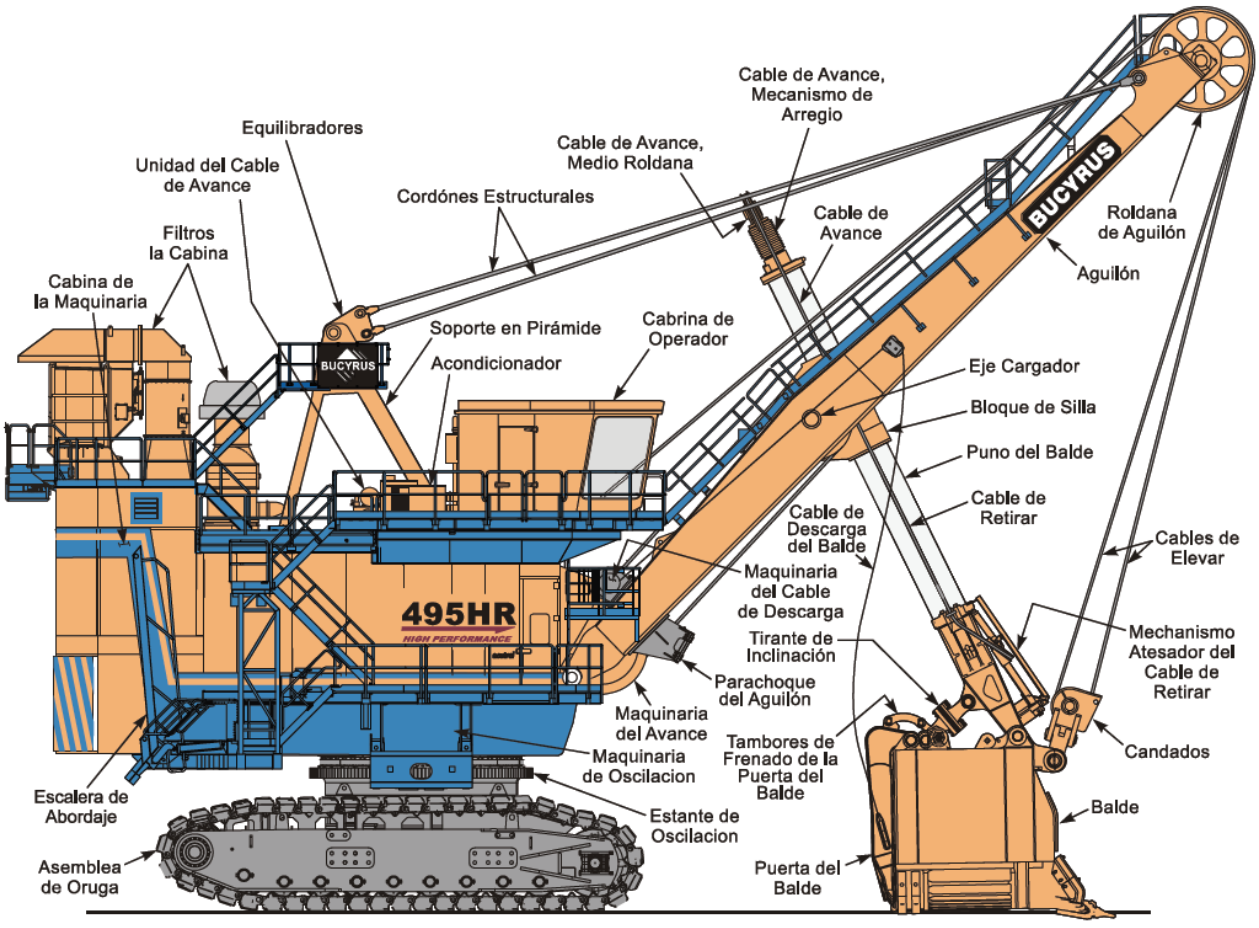
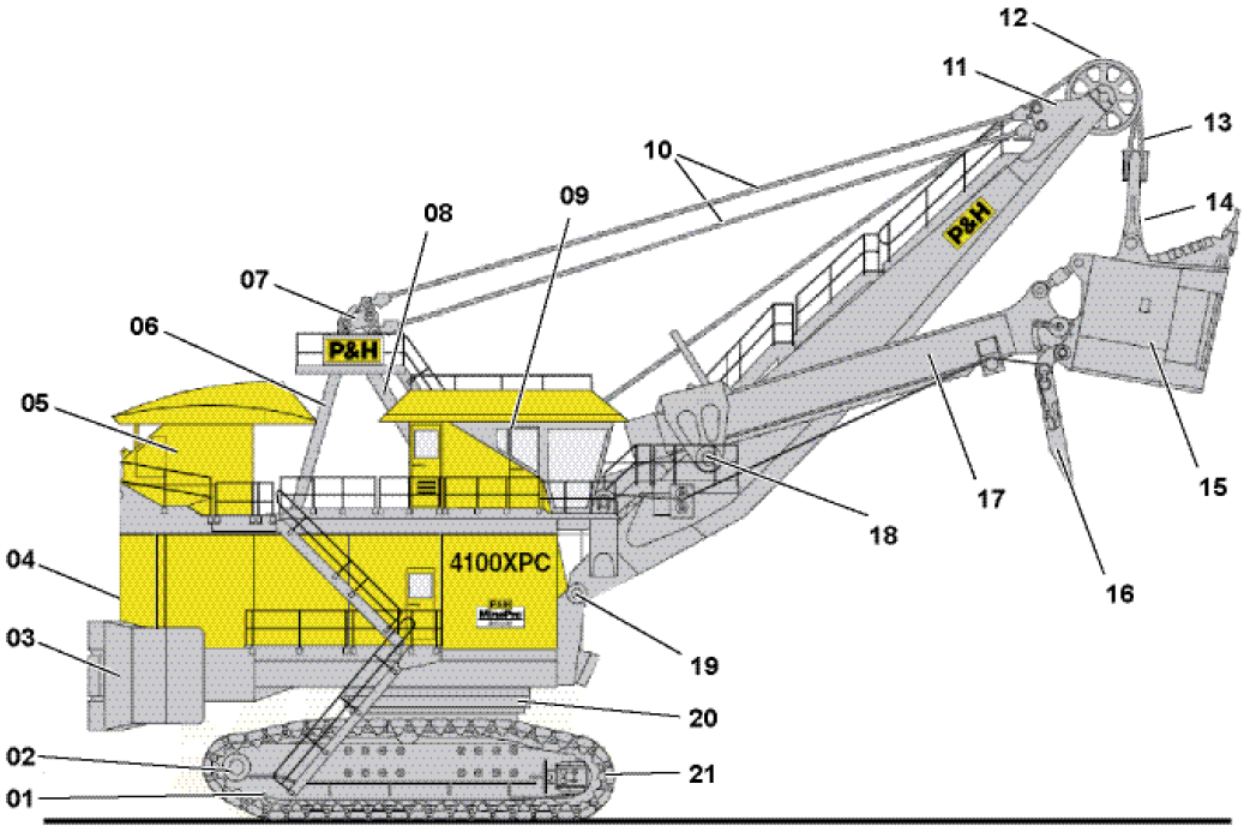


Figura A.1: Pala electromecánica Bucyros modelo 495HR



LEYENDA

01. Bastidor lateral de la oruga
02. Mecanismo de propulsión
03. Contrapeso
04. Sala de máquinas
05. Sistema de filtración / presurización de aire
06. Miembro de tensión del gantry
07. Ecualizadores de los cables de suspensión de la pluma
08. Miembro de compresión del gantry
09. Cabina del operador
10. Cables de suspensión de la pluma
11. Ecualizadores de la punta pluma
12. Poleas de la punta pluma
13. Cables de levante
14. Ecualizador de los cables de levante
15. Cuerpo de balde
16. Tapa del balde
17. Mango del balde
18. Mecanismo de empuje
19. Pasadores de montaje de la pluma
20. Corona de giro
21. Tren de orugas

Figura A.2: Pala electromecánica P&H modelo 4100XPC

Anexo B

Protocolo de gestión de inchancables

1. OBJETIVO

Describir las actividades y responsabilidades de toda la organización que interviene en la operación minera, que permitan evitar la generación de inchancables y eliminar o minimizar eventos de descarga en chancadores, alineado al ciclo de gestión de riesgos.

2. ALCANCE

Todas las áreas asociadas a la generación y control de inchancables en la operación minera.

3. RESPONSABILIDADES

3.1 Áreas que realizan trabajos o servicios en Area Mina

1. Responsable de incluir en su proceso los controles necesarios que permitan evitar la generación de inchancables, retiro de inchancables e informar ubicación de inchancables que no fueron retirados.
2. Coordinar el registro en base de datos de inchancables.
3. Incorporar oportunidades de mejoramiento a su proceso para evitar generación de inchancables o asegurar su retiro.

3.2 Despacho Mina

1. Ante caída de elemento de desgaste detener la operación del equipo de carguío involucrado y desvío de camiones del circuito de ese equipo de carguío que se estén dirigiendo al Chancador o stock, a vaciar a un lugar especialmente habilitado en zona de botaderos, stock de inchancables u otros que permitan buscar y recuperar el elemento perdido.
2. Ante caída de elemento de desgaste, validar con operadores de camiones que antecedieron en secuencia al último cargado, si tienen la certeza que éste se encontraba con todas sus componentes, ante la duda del operador se destinará a lugar de revisión.
3. Coordinar el envío a stock de inchancables por carguío en zonas con riesgos de inchancable o por inchancables identificados en plan.

3.3 Planificación Corto Plazo

1. Será responsable de la actualización de la Base de Datos de inchancables presentes en área Mina.
2. Será responsable de incorporar en Plan Minero la identificación de inchancables en zonas productivas de mineral y coordinará su demarcación topográfica en terreno.

3.4 Topografía

1. Será responsable de efectuar las marcaciones en terreno de inchancables identificados en Plan u otras solicitadas (caída elemento desgaste en la frente, etc).

3.5 Supervisor Operaciones Mina

1. Será responsable de coordinar la búsqueda del elemento de desgaste.
2. Será responsable de autorizar el reinicio del carguío y transporte de mineral a chancado o stock posterior a detección de pérdida de elemento de desgaste.

3.6 Operador Camión

1. El operador camión será responsable de chequear elementos de desgaste de equipos de carguío en sectores de mineral, "camión cargado balde chequeado", que consiste en chequear visualmente el balde cada vez que termina una carga.

3.6 Operador Equipo Carguío

1. Informar de inmediato vía radial al darse cuenta o al ser informado de la falta de alguno de los elementos de desgaste en equipos de carguío.
2. Permitir labor de chequeo de elementos de desgaste, mostrando el balde para la inspección visual al operador del camión cada vez que termine de cargar el camión.
3. Cuando se realice un cambio de frente de carguío (desde estéril a frente de mineral o desde frente dura a blanda), el operador de equipo de carguío solicitará chequeo de estado de los elementos de desgaste a personal de mantención.

3.7 Entrenamiento Mina

1. El instructor mina ante la caída de un elemento de desgaste coordinará la descarga de los camiones en sector habilitado y procederá a la búsqueda del elemento desgaste extraviado.
2. El área de entrenamiento Mina será responsable de incluir en su programa de instrucción de operadores todas las disposiciones contenidas en el presente instructivo y de incorporar oportunidades de mejoramiento a este protocolo.
3. Verificar y evaluar que el trabajador haya entendido e internalizado lo estipulado en este protocolo.

2. DEFINICIONES

Inchancable: Objetos que al ser alimentados con el mineral en el Chancador, provocan daños y detención del mismo. Las fuentes de inchancables pueden ser desde fierros que quedaron de campañas de exploración, circuitos de drenaje, elementos de perforación, instalación de infraestructura, elementos de desgaste de equipos de carguío, etc.

3. NORMAS, EQUIPOS Y MATERIALES

4. DESCRIPCION DEL PROCESO

4.1 Trabajos y Servicios Ejecutados en Area Mina

1. Toda área que realice un trabajo o servicio (Perforaciones, mantención equipos, circuitos de drenaje, instalación de infraestructura, proyectos, etc) en área mina será responsable de entregar áreas limpias y libres de potenciales inchancables.

2. Para lo anterior, deberá tener incorporado en su proceso, la entrega de áreas limpias y libres de potenciales inchancables, en su matriz de riesgos de negocio identificado el peligro de generación de inchancables y los controles necesarios, caja 1 a 6.

3. Al momento de término de los trabajos o servicios, el área responsable deberá efectuar el retiro de todo material inchancable ingresado o ante la imposibilidad de su retiro informar a Planificación Corto Plazo y Operaciones Mina al momento de la entrega del área, entregando ubicación acorde a lo requerido por Planificación Corto Plazo.

4.2 Ingreso a Base Datos Inchancables

1. El área originadora de inchancables será responsable de coordinar el ingreso en base de datos de inchancables y asegurarse que dicha información ha sido ingresada.

2. Planificación Mina será responsable de la actualización de la Base de Datos de inchancables presentes en área Mina.

3. Automatización Mina será responsable de asegurar el funcionamiento de las tecnologías de navegación de equipos mineros que permitan identificar los inchancables en el avance de la mina.

4. Operaciones Mina será responsable de generar los controles en terreno de los ítems 1, 2 y 3 anteriores (GRT).

4.3 Incorporación en Plan y Demarcación en Terreno

1. La Superintendencia Planificación Corto Plazo será responsable de incorporar en Plan Minero la identificación de inchancables en zonas productivas de mineral y coordinará:

    a. Registro en Plano
    b. Demarcación topográfica en terreno.
    c. Descarga de materiales en stock inchancables

4.4 Identificación Inchancables de Labores Subterráneas y Otros

1. La Superintendencia de Planificación Corto Plazo en conjunto con Superintendente de Geotecnia serán responsables de coordinar identificación y registro de inchancables de labores subterráneas y de otros no informados presentes en sectores productivos de mineral, y su incorporación en Plan Minero, y coordinará:

    a. Registro en Plano
    b. Demarcación topográfica en terreno.
    c. Descarga de materiales en stock inchancables

4.5 Chequeo y Mantención Equipos Mina

La S.I. de Mantención Camiones, S.I. Mantención Palas y S.I. Mantención Perforadoras de la VP Mina serán responsables de incorporar en su matriz de riesgos de negocio los controles necesarios para prevenir caídas de elementos estructurales de tolvas y de elementos de desgaste durante la operación de carguío y transporte y asegurar su cumplimiento (Chequeo barandas, tolvas, elementos de desgaste balde, etc).

4.6 Carguío en Zonas de Mineral

1. El operador camión será responsable de chequear elementos de desgaste de equipos de carguío en sectores de mineral, "camión cargado balde chequeado", que consiste en chequear visualmente el balde cada vez que termina una carga. En caso de detectar cualquier anomalía, debe informar por radio inmediatamente al operador del equipo de carguío y Supervisor Operaciones Mina.

2. Para lo anterior el operador equipo carguío mostrará el balde para facilitar la inspección visual al operador del camión cada vez que termine de cargar el camión, de no ser posible el próximo camión debe chequear e informar el estado del balde por radio a operador carguío. En el caso de carguío por el lado derecho en la pala al no encontrarse el equipo de apoyo o no habiendo llegado otro camión, deberá salir del área y virar con precaución hasta tener a la vista el balde y realizar una adecuada inspección visual, informando de ello al operador del equipo de carguío.

3. El operador de equipo de apoyo deberá mantener la condición que le permita revisión de elementos de desgaste de equipos de carguío cercano y dar un aviso oportuno de cualquier anomalía detectada al operador de equipo de carguío.

4. Cada vez que se realice un cambio de frente de carguío (desde estéril a frente de mineral o desde frente dura a blanda), el operador de equipo de carguío realizará chequeo de estado de los elementos de desgaste de su equipo, en caso de duda podrá solicitar apoyo de mantenedor, lo cual deberá quedar registrado en bitácora del equipo.

4.7 Detección de caída de elemento de desgaste

1. El operador de carguío, camión u operador de equipo de apoyo debe informar de inmediato vía radial al percatarse o al ser informado de la falta de alguno de los elementos de desgaste, esta información se entregará al Supervisor Operaciones Mina y a despacho, y a través de despacho será informado a chancado, operadores de camiones de extracción asociados a su equipo de carguío, mantenedores y entrenamiento mina.

2. El operador equipo carguío detendrá inmediatamente su operación y cumplirá lo establecido en este protocolo.

3. Con dicha información Chancado detendrá su proceso mientras evalúa no haber recibido el inchancable, pudiendo reanudar su operación normal una vez coordinando con despacho.

4.8 Detención y desvío circuito para búsqueda elemento desgaste

1. El Supervisor Operaciones Mina y/o Despacho detendrán inmediatamente la operación del equipo de carguío involucrado y desviará los camiones del circuito de ese equipo de carguío que se estén dirigiendo al Chancador o stock, a vaciar a un lugar especialmente habilitado en zona de botaderos, stock de inchancables u otros que permitan buscar y recuperar el elemento perdido.

2. Para determinar que equipos de transporte se deben desviar, despacho validará con operadores de camiones que antecedieron en secuencia al último cargado, si tienen la certeza que éste se encontraba con todas sus componentes, ante la duda del operador se destinará a lugar de revisión.

3. El operador camión al momento de posicionarse para descarga de mineral verificará con despacho descarga en destino correcto, verificando por coordenadas GPS su ubicación, chequeo cruzado.

4. El instructor mina coordinará la descarga de los camiones y procederá a la búsqueda del elemento desgaste extraviado, para dicha actividad dispondrá de inmediato de equipo de apoyo necesario.

5. El Supervisor Operaciones Mina solicitará confirmación de mecánicos e instructor mina que el o los elementos encontrados corresponden efectivamente al elemento perdido por el equipo de carguío.

6. En caso de no encontrarse el elemento de desgaste, después de revisar la carga, tolvas de los camiones sacados del circuito, en chancador y ante la posibilidad de que este elemento se encuentre en la frente de carguío, el Supervisor Operaciones Mina solicitará señalizar claramente el lugar donde podría encontrarse el elemento. Debe informar esta situación a SI Operaciones Mina, SI Planificación Corto Plazo, SI Servicios Mina, SI Mantención Equipos de Carguío y SI Programación & Despacho o quién los reemplace.

7. El Supervisor Operaciones Mina organizará la búsqueda del elemento de desgaste en la frente señalizada según punto anterior, si no lo encuentra, además deberá buscar en las frentes de carguío anteriores del momento de decretado el evento.

4.9 Reinicio circuito

1. El responsable de autorizar el reinicio del carguío y transporte de mineral a chancado o stock del equipo de carguío involucrado es el Supervisor Operaciones Mina, coordinando con despacho e informando a Chancado.

2. En caso que el elemento no fue encontrado se enviará a descarga a stock inchancables el mineral del sector demarcado previamente.

4.10 Investigación y Registro

1. Una vez encontrado el elemento el Instructor Mina y Supervisor Operaciones Mina realizarán análisis causa/raíz, cada vez, en terreno con todo el personal involucrado de la condición que produjo la caída del elemento y emitirán un informe de esta situación a SI Operaciones Mina, SI Planificación Corto Plazo, SI Servicios Mina, SI Mantención Equipos de Carguío y SI Programación & Despacho o quién los reemplace.

2. Dicho informe debe ser ingresado en ellipse.

4.11 Carguío en zonas de mineral con inchancables informados en Plan

1. El sector será demarcado por topografía y despacho enviará los camiones cargados en dicho sector a stock de inchancables.

2. El operador de carguío coordinará con despacho el inicio de carguío en sector demarcado por inchancable.

3. El operador camión al momento de posicionarse para descarga de tolva con inchancable solicitará a despacho autorización para proceder con descarga. Despacho se asegurará que descarga sea realizada en destino correcto, verificando por coordenadas GPS su ubicación.

4. El Supervisor Operaciones Mina informará a Planificación Mina del inchancable encontrado para su registro en la base datos, o las desviaciones respecto a ubicación.

4.12 Carguío en stock de mineral con riesgo de inchancables

1. En caso de alimentación de stock con riesgo de inchancables se realizará actividad de traspaleo con el fin de identificar el inchancable. Despacho Mina informará a chancado de ésta situación para que adopte las medidas consideradas en tal situación.

4.13 Alimentación en Chancado

1. Chancado deberá tener incorporado en su proceso el peligro de inchancables e incorporado en su matriz de riesgos los controles necesarios.

2. Chancado contará con un sistema de alerta (chicharra), el cual será activado en caso se detecte alimentación con inchancables.

4.14 Internalización y oportunidades de mejoramiento

1. El área de entrenamiento Mina será responsable de incluir en su programa de instrucción de operadores todas las disposiciones contenidas en el presente instructivo y de incorporar oportunidades de mejoramiento a este protocolo.

2. Verificar que el trabajador haya entendido e internalizado lo estipulado en este protocolo.

3. REFERENCIAS

4. ANEXOS

Flujograma Gestión Inchancables CMDIC

5. CONTROL DE CAMBIO

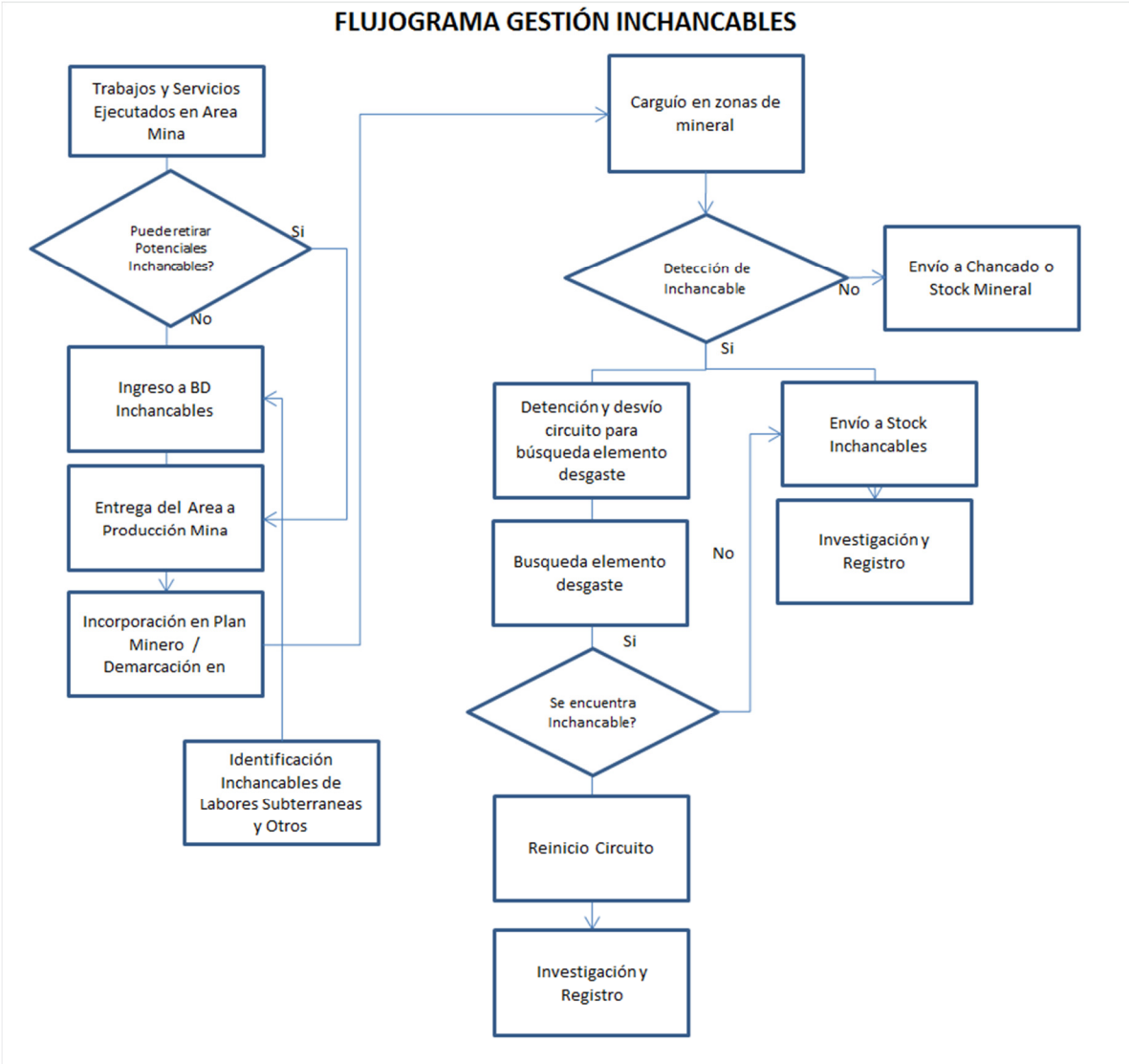
Modificación N°	N° de versión	Descripción	Fecha	Responsable del cambio

10. FIRMA:

Fecha _____/_____/_____/

Nombre	RUT	Firma

Anexo 1


FLUJOGRAMA GESTIÓN INCHANCABLES
Trabajos y Servicios Ejecutados en Area Mina
Puede retirar Potenciales Inchancables?
Si
No
Ingreso a BD Inchancables
Entrega del Area a Producción Mina
Incorporación en Plan Minero / Demarcación en
Identificación Inchancables de Labores Subterraneas y Otros
Carguío en zonas de mineral
Detección de Inchancable
No
Envío a Chancado o Stock Mineral
Si
Detención y desvío circuito para búsqueda elemento desgaste
Busqueda elemento desgaste
No
Si
Se encuentra Inchancable?
Envío a Stock Inchancables
Investigación y Registro
Reinicio Circuito
Investigación y Registro

Anexo C

Detalle de daños al chancador primario

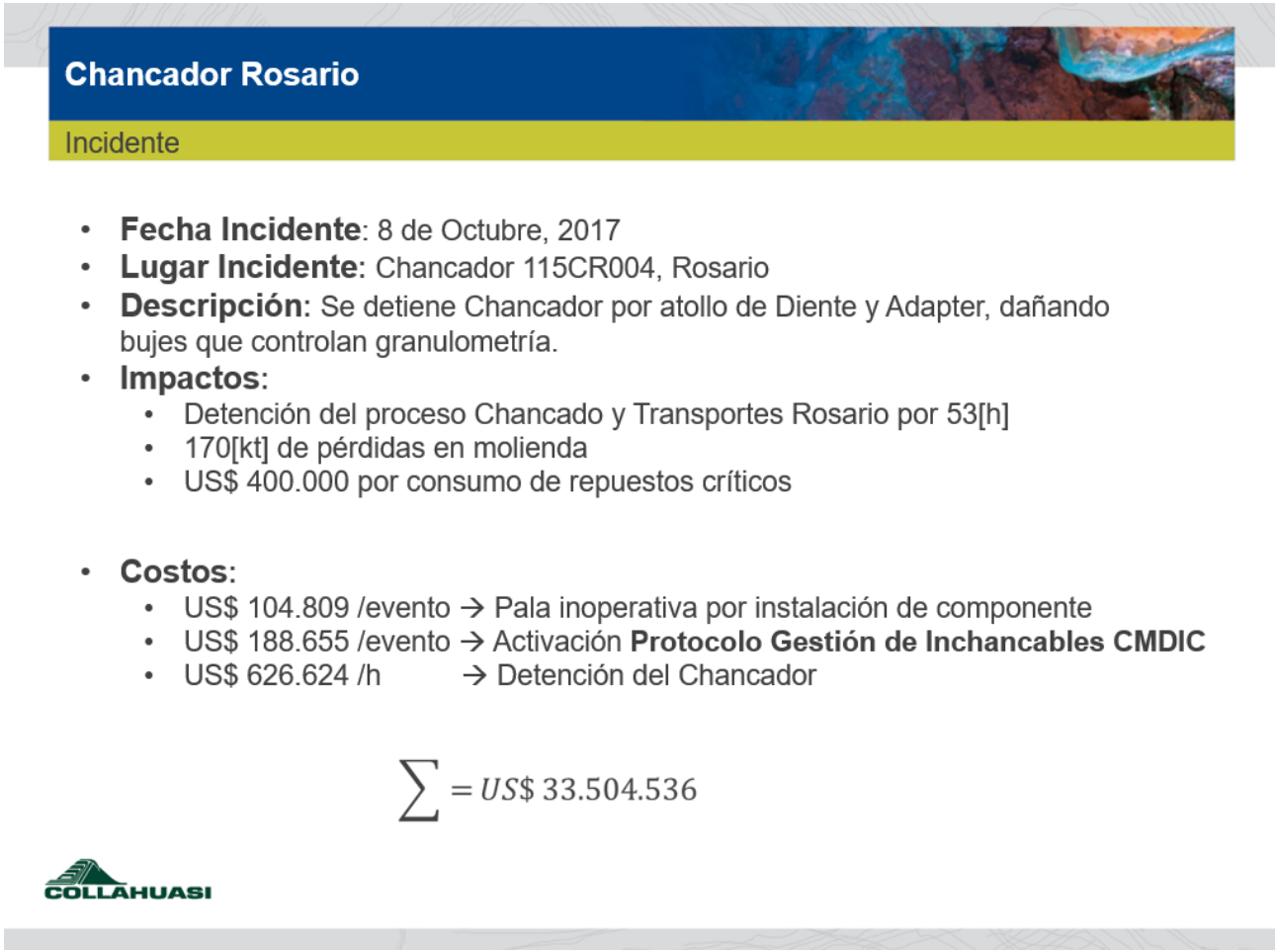


Figura C.1: Cuantificación de costos producto de daños al chancador