



UNIVERSIDAD  
**DE ATACAMA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO DE ANÁLISIS Y  
MODIFICACIÓN DEL CIRCUITO MOLIENDA PARA MEJORAR LA  
PRODUCCIÓN EN COMPAÑÍA MINERA OJOS DEL SALADO A TRAVÉS DE  
HIDROCICLONES**

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

Profesor guía: Sr. Osvaldo Durán Artigas.

Jesús Aroon Aballay Carvajal

Franco André Lillo Gougain

Copiapó, Chile 2020

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo de tesis representa un difícil camino de esfuerzo, sacrificio, perseverancia y mucha motivación, gracias a todo esto pude alcanzar mi meta anhelada. Hoy comienza para mí un nuevo camino, donde se juntará la incertidumbre y la ansiedad de lograr lo último de este largo pero hermoso proyecto, que me llevará a cumplir un logro más en mi vida.

Agradezco a la universidad por haberme aceptado ser parte de ella y poder estudiar mi carrera. A los profesores por hacer de sus clases grandes momentos de construcción continua de conocimiento. Gracias por motivarnos siempre a salir adelante y creer en cada uno de nosotros. A mis padres, por haberme forjado como la persona que soy hoy. Gracias por todo su esfuerzo entregado en mis estudios, por formarme con reglas, pero también con libertad, por motivarme constantemente alcanzar mis anhelos, pero sobre todo gracias por su amor.

Quiero agradecer al profesor guía Don Osvaldo Duran el cual nos ayudó y a todos los docentes que estuvieron a lo largo de los años entregándonos sus conocimientos que nos ayudaron a ser profesionales de excelencia con una gran carta de valores y ética.

**Atte.**

**Jesús Aroon Aballay Carvajal**

## **AGRADECIMIENTOS**

Este proyecto de tesis marca la consumación de un largo camino que comencé a recorrer hace varios años, el cual estuvo lleno de alegrías, crecimiento personal y profesional, de éxitos y también fracasos, por lo tanto quiero dar mis agradecimientos a las personas que estuvieron en todo momento y fueron pilares trascendentes para terminar este proceso tan importante en mi vida, a veces llena de obstáculos que me desgastaron hasta llegar a pensar en rendirme, pero allí estuvo dios y mi familia como pilar fundamental, dándome ese apoyo emocional que tanto necesite en aquellos momentos.

Quiero agradecer a mis padres Miguel Lillo y Roxana Gougain por su profunda preocupación y observación de mi proceso, por darme el aliento y los consejos que me ayudaron a reflexionar.

Quiero agradecer al profesor guía Don Osvaldo Duran el cual nos ayudó y a todos los docentes que estuvieron a lo largo de los años entregándonos sus conocimientos que nos ayudaron a ser profesionales de excelencia con una gran carta de valores y ética.

**Atte.**

**Franco André Lillo Gougain.**

## RESUMEN

El Hidrociclón es uno de los equipos de clasificación más utilizados en la industria y en particular en el procesamiento de minerales. Posiblemente su principal característica es la de ser un equipo de separación de tamaños hidrodinámicos, lo cual le otorga una alta capacidad de producción, y diferentes niveles de eficiencia según sea su configuración geométrica, operacional y del tipo de material a clasificar. Sin embargo, y a pesar de tener múltiples aplicaciones, son pocos los estudios finalizados con éxito en cuanto a la modelación y simulación de sus principios hidrodinámicos, dado a que el comportamiento del flujo en su interior es bastante complejo. La mayoría de los modelos existentes son de carácter empírico, y usualmente no son aplicables a todos los casos de minerales. Este estudio se ha basado en los datos entregados del balance realizado al Molino de Bolas Allis Chalmers N°2 y he simulado la condición actual. A su vez se ha realizado una simulación del máximo tonelaje que sería posible procesar por el circuito, utilizando los hidrociclones cavex. Se quiere destacar la incitación de poder demostrar que a base de la necesidad de aumentar la producción surge la propuesta que considera el cambio de Hidrociclón completo por la Tecnología cavex, la cual ha demostrado en muchas pruebas contra resultado ser el Hidrociclón más eficiente del mercado, con bajos niveles de desgaste, transformándose en el hidrociclón preferido en la mayoría de las plantas concentradoras de nuestro país. La instalación del Hidrociclón puede realizarse reemplazando Hidrociclón por Hidrociclón, sin la necesidad de cambios mayores. Concluyendo que a través del cambio del hidrociclón podemos mejorar la producción en cuanto a toneladas hora, aumento en horas de disponibilidad del equipo, disminución de recursos hídricos. Se estima que el posible ahorro alcanzado, aplicando las estrategias y políticas de mantenimiento propuestas en el plan, sería de un 52,7%, aproximadamente el ahorro de costos totales del nuevo plan de mantenimiento y repuestos. Sin embargo, los resultados se obtienen a mediano y largo plazo, pues el proceso detrás de la estrategia de mantenimiento debe ir de la mano con la capacitación del personal mecánico de la empresa junto con un trabajo constante para poder normalizar el estado del equipo.

**Palabras Claves:** Productividad, Circuito Molienda, Plan de Mantenimiento, Hidrociclón, MTBF, Weibull.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>MARCO INTRODUCTORIO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes Generales. ....	1
1.2. Objetivo General. ....	2
1.2.1. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Alcance del Proyecto.....	2
1.4. Metodología del Trabajo. ....	2
1.5. Lundin Mining Corporation, Distrito Candelaria.....	3
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>7</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción. ....	7
2.1.1. Concepto de Mantenimiento. ....	7
2.1.2. Misión del Mantenimiento dentro de una Empresa. ....	8
2.1.3. Funciones Básicas del Mantenimiento.....	9
2.1.4. Historia del Mantenimiento y su Constante Evolución.....	9
2.1.5. Gestión del Mantenimiento.....	11
2.1.6. Conceptos Básicos de la Gestión del Mantenimiento. ....	15
2.2. Clasificación de Mineral. ....	17
2.2.1. Granulometría. ....	19
2.3. El Hidrociclón. ....	19
2.3.1. Funcionamiento.....	21
2.3.2. Características. ....	23
2.4. Hidrociclones en Concentradora. ....	24
2.4.1. Descripción General.....	24
2.3.2. Configuración de Equipos en Molienda CLS. ....	26
2.3.3. Configuración de Batería de Hidrociclones CLS.....	28
2.3.4. Filosofía de Operación de las Baterías de Ciclones. ....	29
2.4. Estado del Arte.....	30
2.4.1. Mantenimiento de Ciclones.....	30
2.4.1.1. Plan de Mantenimiento en Software JK SimMet.....	30
2.4.1.2. Inspección a Baterías.....	32
2.4.1.3. Fallas Comunes y Mantenimiento de Componentes. ....	33
2.4.1.4. Recursos para el Mantenimiento de Ciclones. ....	36
2.4.1.5. Horómetro. ....	36
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>38</b>
<b>ANÁLISIS DE FALLA, CRITICIDAD Y CONFIABILIDAD .....</b>	<b>38</b>
3.1. Introducción. ....	38
3.2. Alcances. ....	38
3.3. Descripción del Equipo. ....	39
3.3.1. Identificación de los Sistemas Básicos Molino G.....	40
3.4. Condiciones de Operación del Molino G.....	40
3.5. Condiciones de Mantenimiento del Molino G. ....	41
3.6. Análisis de Falla y Criticidad del Equipo. ....	44
3.6.1. Diagrama Funcional de Bloques. ....	44
3.6.2. Análisis FMECA de Sistema Básicos Molino G. ....	44

3.6.3. Análisis de Costo Global de Mantenimiento. ....	45
3.6.4. Análisis de Pareto a los Modos Correctivos. ....	50
3.6.5. Análisis de Jack Knife a los Modos Correctivos. ....	55
3.6.6. Comparación de Resultados y Elección de Modos Correctivos Críticos.....	58
3.7. Modelo de Confiabilidad.....	60
3.7.1. Alcances. ....	60
3.7.2. Aplicación del Modelo de Weibull a Modos Correctivos Críticos. ....	60
3.7.2.1. Cambio Piñón.....	61
3.7.2.2. Cambio de Descansos Molino Alimentación- Descarga:.....	65
3.7.2.3. Cambio Bomba de lubricación.....	69
3.7.2.4. Cambio Bomba de Levante.....	74
3.7.2.5. Cambio Parilla de Descarga. ....	79
3.8. Árboles de Falla de los Modos Correctivos Críticos. ....	82
3.8.1. Árbol de Falla Molino de Bolas G. ....	82
3.8.2. Árbol de Falla Piñón. ....	83
3.8.3. Árbol de Falla Descansos Molino Alimentación-Descarga. ....	84
3.8.4. Árbol de Falla Sistema de Lubricación.....	85
3.8.4.1. Árbol de Falla Sistema de Lubricación Piñón-Corona. ....	86
3.8.4.2. Árbol de Falla Sistema de Lubricación Descansos-Bomba de Lubricación. ....	87
3.8.4.3. Árbol de Falla Sistema de Lubricación Descansos-Bomba Levante. ....	88
3.8.5 Árbol de Falla Sistema Descarga. ....	89
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>90</b>
<b>PLAN DE MANTENIMIENTO .....</b>	<b>90</b>
4.1. Introducción. ....	90
4.2. Alcances. ....	90
4.3. Recomendaciones Previas.....	90
4.4. Plan de Mantenimiento. ....	92
4.4.1. Frecuencia óptima de inspecciones con Detención de Equipo. ....	92
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>94</b>
<b>ESTUDIO ECONÓMICO.....</b>	<b>94</b>
5.1. Introducción. ....	94
5.2. Impacto Económico. ....	94
5.2.1. Análisis Económico a CGM según Plan de Mantenimiento y Repuestos: .....	94
5.2.2. Análisis Económico a Frecuencias óptimas de Inspección con Detención de Equipo. ....	95
5.3. Resultado Final. ....	96
<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>97</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>97</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>100</b>
<b>SOFTWARE DE CONFIABILIDAD E INSPECCIONES.....</b>	<b>100</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>102</b>
<b>SISTEMAS, SUB-SISTEMAS Y COMPONENTES DEL MOLIGO G .....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXO C .....</b>	<b>104</b>
<b>ANÁLISIS FMECA DE SISTEMAS BÁSICOS MOLINO G.....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXO D .....</b>	<b>114</b>
<b>PROPUESTA DE HIDROCICLÓN CAVEX 500 CVX .....</b>	<b>114</b>

**ANEXO E.....120**  
**HIDROCICLONES CAVEX.....120**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.1: Presencia mundial de Lundin Mining Corporation. ....	3
Figura N° 2.1: Curva de la bañera. ....	15
Figura N° 2.2: Tiempo medio entre fallas. ....	17
Figura N° 2.3: disponibilidad de un sistema. ....	17
Figura N° 2.4: Diagrama de conminución. ....	19
Figura N° 2.5: Esquema de un Hidrociclón. ....	20
Figura N° 2.6: Flujos al interior del un hidrociclón. ....	22
Figura N° 2.7: Perfil de velocidad del vórtice libre (a), del de fuerza (b) y la combinación de ello (c). ....	22
Figura N° 2.8: Diagrama de procesos del área de molienda. ....	25
Figura N° 2.9: Diagrama de procesos del área de flotación en Concentradora. ....	25
Figura N° 2.10: Diagrama de flujo del área de molienda en Concetradora. ....	26
Figura N° 2.11: Diagrama de flujo del circuito de pebbles. ....	27
Figura N° 2.12: Conjunto ensamble de una batería de ciclones y despiece del piping. Fuente: Krebs Engieneers 2000. ....	28
Figura N° 2.13: Imagen lateral de una batería de hidrociclones (configuración 45°) .....	29
Figura N° 2.14: Plan declarado en sistema para el cambio de ciclones. ....	31
Figura N° 2.15: Fotografía aérea del sector de tránsito de ciclones en patios de salavataje. ....	32
Figura N° 2.16 Desprendimiento de revestimientos en conos intermedios. ....	34
Figura N° 2.17: Obstrucción de apex por placa metálica externa. ....	34
Figura N° 2.18: Obstrucción de apex por carpetas plásticas externas. ....	35
Figura N° 2.19: Ciclón en condiciones de embancamiento. ....	35
Figura N° 2.20: Personal de empresa colabora en manobra de izaje para el cambio de un ciclón. ....	36
Figura N° 3.1: Identificación de sistemas básicos molino G. ....	40
Figura N° 3.2: Diagrama funcional de bloques Molino G. ....	44
Figura N° 3.3: Árbol de falla molino de bolas G. ....	82
Figura N° 3.4: Árbol de falla piñón. ....	83
Figura N° 3.5: Árbol de falla descansos molinos alimentación descarga. ....	84
Figura N° 3.6: Árbol de falla sistema de lubricación. ....	85
Figura N° 3.7: Continuación árbol de falla sistema de lubricación. ....	86
Figura N° 3.8: Continuación árbol de falla sistema lubricación. ....	87
Figura N° 3.9: Continuación árbol de falla sistema lubricación. ....	88
Figura N° 3.10: Árbol de falla sistema descarga. ....	89

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1.1: Ingresos por Mineral Lundin Mining Corporation. ....	4
Gráfico N° 1.2: Ingresos por Distrito Lundin Mining Corporation. ....	4
Gráfico N° 1.3: Estadística de producción y costo C1 por trimestre 2016. ....	6
Gráfico N° 1.4: Forecast de producción y costo C1. ....	6
Gráfico N° 2.1: hallazgos y fallas comunes registradas durante inspección en ciclones. ....	33
Gráfico N° 3.1: Diagrama de Pareto CGM. ....	51
Gráfico N° 3.2: Diagrama de Pareto horas Detención. ....	53
Gráfico N° 3.3: Diagrama de Pareto número de Detenciones. ....	54

Gráfico N° 3.4: Diagrama de Jack Knife.....	57
Gráfico N° 3.5: Regresión lineal. ....	62
Gráfico N° 3.6: Confiabilidad de modo correctivo cambio piñón .....	63
Gráfico N° 3.7: Tasa de fallas del modo correctivo cambio piñón. ....	64
Gráfico N° 3.8: Regresión lineal modo correctivo.....	66
Gráfico N° 3.9: Confiabilidad del modo correctivo cambio descansos molina. ....	67
Gráfico N° 3.10: Tasa de fallas del modo correctivo cambio descansos molino. ....	68
Gráfico N° 3.11: Regresión lineal modelo correctivo. ....	70
Gráfico N° 3.12: Confiabilidad del modo correctivo cambio bomba lubricación. ....	72
Gráfico N° 3.13: Tasa de fallas del modo correctivo cambio bomba de lubricación.....	73
Gráfico N° 3.14: Regresión lineal modo correctivo cambio bomba levante.....	75
Gráfico N° 3.15: Confiabilidad del modo correctivo cambio bomba de levante. ....	76
Gráfico N° 3.16: Tasa de fallas del modo correctivo cambio bomba levante. ....	78
Gráfico N° 3.17: Regresión lineal modo correctivo cambio parrillas descarga. ....	80
Gráfico N° 3.18: Tasa de falla del modo correctivo cambio parrillas descarga.....	81

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 2.1: Evolución histórica del Mantenimiento.....	11
Tabla N° 2.2: Listado de piping de una batería. ....	28
Tabla N° 3.1: Características principales del equipo. ....	40
Tabla N° 3.2: Frecuencia de cambio actual molino G.....	41
Tabla N° 3.3: Frecuencia de cambio actual molino. ....	42
Tabla N° 3.4: Análisis de costo global de mantenimiento. ....	50
Tabla N° 3.5: Análisis de Pareto CGM a modos correctivos.....	51
Tabla N° 3.6: Análisis de Pareto horas detención a modos correctivos.....	52
Tabla N° 3.7: Análisis de Pareto según N° de detenciones. ....	54
Tabla N° 3.8: Análisis de Jack Knife a modos correctivos. ....	56
Tabla N° 3.9: Resultados análisis de pareto. ....	59
Tabla N° 3.10: Datos para la regresión lineal modo correctivo. ....	61
Tabla N° 3.11: Datos para curva de confiabilidad. ....	62
Tabla N° 3.12: Tasa de fallas modo correctivo. ....	64
Tabla N° 3.13: Datos para la regresión lineal modo correctivo. ....	65
Tabla N° 3.14: Datos para la curva de confiabilidad modo correctivo. ....	66
Tabla N° 3.15: Tasa de fallas del modo correctivo cambio descansos molino .....	68
Tabla N° 3.16: Datos para regresión lineal modo correctivo. ....	70
Tabla N° 3.17: Datos modificados para la obtención de parámetros de Weibull para modo correctivo cambio bomba lubricación.....	71
Tabla N° 3.18: Tasa de fallas del modo correctivo cambio bomba de lubricación.....	73
Tabla N° 3.19: Datos para la regresión lineal modo correctivo.....	75
Tabla N° 3.20: Datos para curva de confiabilidad modo correctivo cambio bomba de levante. ....	76
Tabla N° 3.21: Tasa de fallas del modo correctivo. ....	77
Tabla N° 3.22: Datos para la regresión lineal modo correctivo cambio parrillas descarga. ....	79
Tabla N° 3.23: Datos para curva de confiabilidad modo correctivo cambio parrillas descarga.....	80

Tabla N° 5.1: Análisis de CGM modificado según plan de mantenimiento y repuestos. 95  
Tabla N° 5.2: Comparación entre frecuencia de inspecciones con detención de equipo...96  
Tabla N° 5.3: Resumen de comparación costos totales.....96

# CAPÍTULO I

## MARCO INTRODUCTORIO

### **1.1. Antecedentes Generales.**

Los hidrociclones son una de las unidades de procesamiento más versátiles usadas en el manejo de sólidos, este equipo fue introducido a la industria por primera vez como un equipo de proceso en 1891 y la primera patente sobre su uso fue concedido en los Estados Unidos. M. G. Driessen (Murthy & Bhaskar, 2012) fue el que reportó por primera vez la aplicación de un Hidrociclón para la industria minera subterránea y a cielo abierto en el año 1939, además se reportaron diversas aplicaciones en otras industrias que lo usan con frecuencia para la clasificación de sólidos como son: la química, petrolera, de pulpa y papel y de alimentos. Debido a su eficiencia para separar, la facilidad en la instalación, el hecho de no tener partes móviles, tener bajos costos de mantenimiento y ahorro en el espacio hacen de este equipo un equipo eficiente para la clasificación de sólidos (El, Bouso, & Procesos, 2001; Murthy & Bhaskar, 2012) sin embargo, en este tipo de equipos de separación se pueden optimizar parámetros de rendimiento y obtener una mayor relación costo- beneficio que mejoran condiciones de carácter operacional lo cual se puede obtener con el entendimiento de la dinámica del proceso (Bahamón García, Quintana Marín, & Alzate Gil, 2009).

El único camino para que un negocio industrial pueda crecer y aumentar su rentabilidad o sus utilidades es aumentando su productividad. Y el instrumento fundamental que origina una mayor productividad es la utilización de métodos, con los cuales se puede demostrar las mejoras pertinentes.

Hay que conceptualizar algunas de la actividades que en este caso se enfocan a la Ingeniería en Mantenimiento Industrial en lo que respecta a la Productividad, sabemos que en la actualidad no es competitivo quien no cumple con calidad, producción, bajos costos, estándares, innovación, Nuevos métodos de trabajo, Tecnología. Y muchos otros conceptos que hacen que cada día la productividad sea un punto de cuidado en los planes a largo y pequeño plazo.

La idea de cambiar la metodología de realizar este análisis fue haciéndose la siguiente pregunta. ¿Cómo reduzco el tiempo de mantenciones a este equipo?, la respuesta fue

guiada al básico concepto que se emplea en una mejora, realizar estudios de factibilidad del proyecto, y la comprobación positiva de estos.

## **1.2.Objetivo General.**

Estimar desde datos de muestreos existentes, la posibilidad de mejorar la operación del circuito Molienda, a través de un cambio de equipo de clasificación de partículas denominado Hidrociclón, que permita la reducción en el uso de los recursos hídricos, para esto, se investigaron datos de la producción actual, dando mayor importancia a los siguientes puntos:

- Información de la producción actual.
- Estado actual de clasificación del equipo.
- Posibilidad de prueba e indicación de mejoras al sistema.

### **1.2.1. Objetivos Específicos.**

- Disminuir las mantenencias programadas y preventivas que conlleva a que la producción no se realice de manera eficiente.
- Disminuir los costos considerablemente de los repuestos del equipo del circuito de molienda.
- Mejorar la rentabilidad de la empresa, a través de la disminución de los costos asociados a la gestión del mantenimiento.

## **1.3.Alcance del Proyecto.**

Se busca optimizar la operación y manejo del circuito de molienda en Minera Ojos del Salado, buscando una mejora continua hacia el proceso productivo minimizando los costos de producción asociados a la gestión del mantenimiento con el fin de maximizar diversos indicadores económicos de la compañía.

## **1.4.Metodología del Trabajo.**

Para comenzar la metodología del siguiente proyecto de título tenemos que tomar en cuenta una seguidilla de variables, las cuales podrán ser descubiertas por distintos métodos aplicados para llegar a los resultados esperados, en la actualidad existe una variedad muy creciente de programas y software que proporcionan la información que requerimos.

Por lo cual en este análisis se puede detectar, además de datos existentes tomando en cuenta tales programas, y así proporcionar información muy aproximada a los valores esperados.

Como objetivo principal de la metodología a utilizar, la cual es realizar una prueba, es optimizar la operación del circuito molienda. Para ello se pone a disposición de Minera Ojos del Salado una herramienta de simulación y saber cómo es el modelamiento de circuitos de producción del Cobre, en estado estacionario mediante la utilización del software JK SimMet el cual permite mediante los datos obtenidos en terreno analizar el comportamiento del circuito como conjunto.

### **1.5. Lundin Mining Corporation, Distrito Candelaria.**

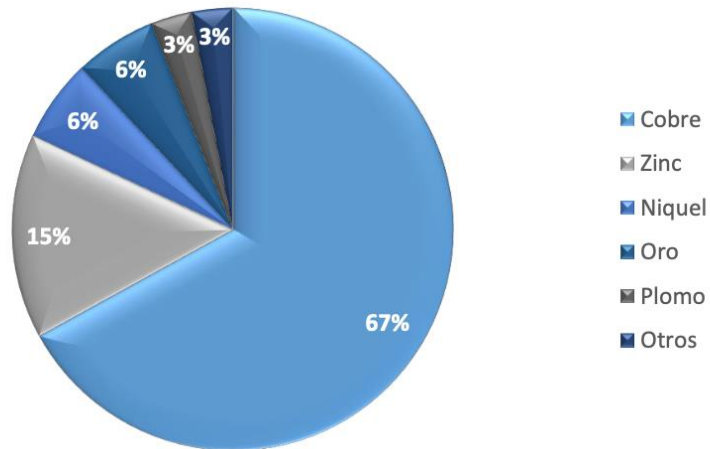
Lundin Mining Corporation es una empresa canadiense y corresponde al brazo minero metálico de un holding de empresas dedicada al rubro de los recursos naturales. Lundin Mining Corporation, tiene presencia en el mercado de los commodities de Plomo, Níquel, Zinc y Cobre, teniendo como subproducto Oro y Plata. En el gráfico N° 1.1 (Pág. N°4), se puede observar que el Cobre genera el 67% de los ingresos de la compañía, los distritos que explotan dicho mineral corresponde a Eagle el cual se encuentra en Michigan, Estados Unidos y Candelaria, este último ubicado en Chile, III región de Copiapó, específicamente en las cercanías de Tierra Amarilla.

**Figura N° 1.1: Presencia mundial de Lundin Mining Corporation.**



Fuente: Minera Candelaria.

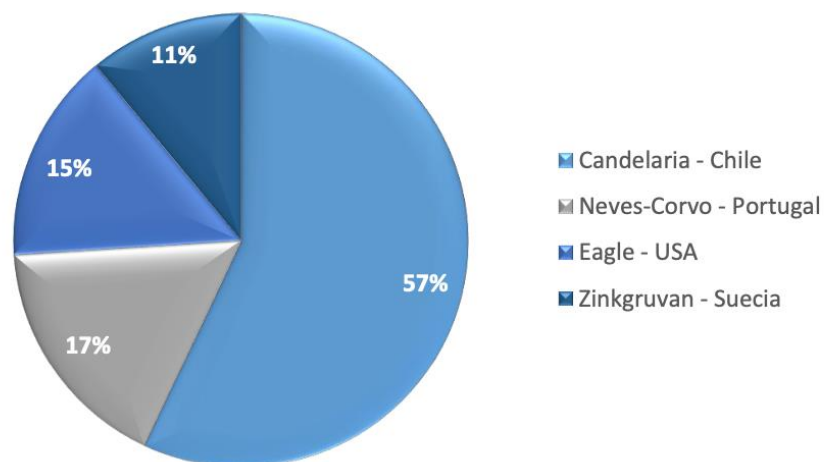
**Gráfico N° 1.1: Ingresos por Mineral Lundin Mining Corporation.**



Fuente: Minera Candelaria.

Lundin Mining Corporation lleva a cabo su explotación de recursos mineros en varios países, donde su ingreso del año 2016 fue de 370,000 KUSD\$, la importancia del distrito que se ubica en Chile, Candelaria se puede notar en el gráfico N° 1.2, el cual considerando el rajo y las tres minas subterráneas genera el 57% de los ingresos de la compañía completa, es cierto que es la operación de rajo abierto la que mayor porcentaje entrega y que las minas de Ojos del Salado solo aportan con el 3% del ingreso total, pero no dejan de ser relevantes para la producción del distrito y además se estima que su producción aumente en unos años para suplir la baja de mineral que tendrá el rajo en el futuro.

**Gráfico N° 1.2: Ingresos por Distrito Lundin Mining Corporation.**



Fuente: Minera Candelaria.

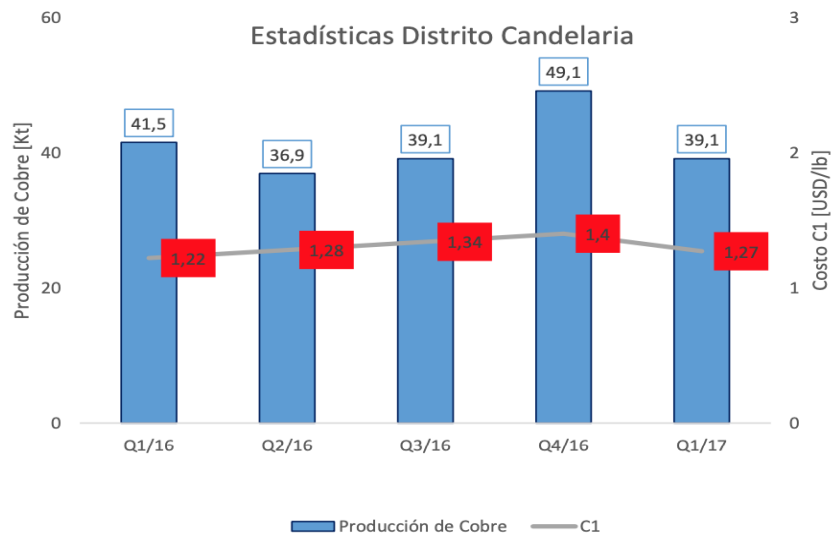
La empresa tiene como misión desarrollar y actualizar constantemente su cartera de recursos mineros, la cual, proporciona excelentes retornos para sus accionistas, para esto los objetivos de la empresa se materializan en generar un flujo constante de oportunidades de desarrollo, tener una cultura de alto rendimiento, generar un balance de empresa sólido, maximizar el valor de las operaciones existentes con ética y transparencia, paralelamente ir incorporado el valor de la seguridad y ser una de las compañías más productivas y respetable en el rubro minero.

Se puede observar la importancia del distrito Candelaria para los ingresos de Lundin Mining Corporation, correspondiente al 57%, resultando interesante conocer la estadística de producción y comportamiento del Cash Cost o C1 (incluye costos directos de mina, costos de molienda y concentración, fletes por transporte del concentrado, gastos generales y de administración, costos de venta, entre otros) por trimestre del año. En el gráfico N° 1.3 (Pág. N°6), se observa la estadística de producción y C1 de los cuatro trimestres del año 2016 junto con el primero del 2017, donde se observa principalmente una disminución de producción en el paso del año 2016 al 2017 de casi 10 ktmf, comparándose con el aumento del Q3 al Q4. Por otro lado, el C1 tuvo una tendencia pareja, aumentando durante el año 2016, pero disminuyendo en 0.13 centavos a comienzos del año 2017.

Complementado a la información anterior, en el gráfico N° 1.4, se presenta el Forecast de producción y costo C1 para el distrito Candelaria, lo que muestra una tendencia a la baja de la producción y un aumento del C1 del distrito, explicado principalmente por la baja de leyes y aumento de profundidad del rajo Candelaria (72% de la producción de finos del distrito), lo que se espera ser en parte compensada por el crecimiento de las minas subterráneas y una buena gestión de recursos.

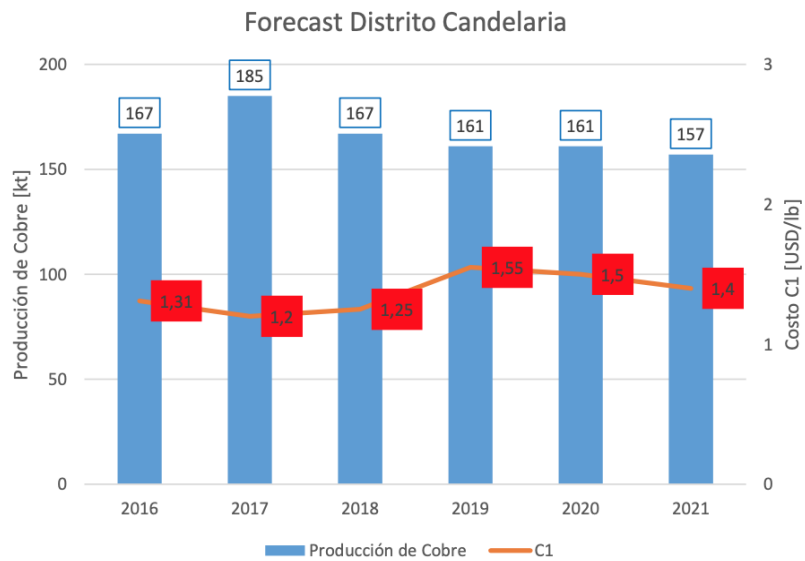
Para abordar de mejor manera el aumento de producción, disminuir los costos y generar una optimización del plan de negocio actual, surge la idea de internalizar las operaciones motivada por ciertas razones que hacen creer que será una solución eficiente para afrontar los futuros problemas.

**Gráfico N° 1.3: Estadística de producción y costo C1 por trimestre 2016.**



Fuente: Minera Candelaria.

**Gráfico N° 1.4: Forecast de producción y costo C1.**



Fuente: Minera Candelaria.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Introducción.**

A mediados del siglo XX la gran mayoría de los países europeos y de norte américa tenían como objetivo, en sus industrias, que a partir de una inversión debían obtener como resultado la máxima rentabilidad. Este objetivo se vio afectado cuando las decisiones tomadas por los directorios de las empresas tenían directa relación con el cliente, debido a que éste se había convertido en un elemento importante dentro de la empresa, el cual exigía calidad en los servicios y productos otorgados.

Por tanto, este nuevo escenario suponía, para la empresa, una necesidad para poder mantenerse en el mercado y, por ende, mantener un lugar competitivo dentro de éste. Debido a esto surge la urgente necesidad de crear un nuevo departamento dentro de la empresa, el cual se responsabilice y asegure que la producción no será mermada por fallas y, obviamente, por detenciones de los equipos. En los inicios de esta nueva tendencia no se tomaba demasiada importancia al mantenimiento propiamente tal, hasta que lograron darse cuenta que uno de los gastos más grandes dentro de las empresas, ocupando el primer o segundo lugar dentro de los gastos más significativos, se debía a la falta de mantenimiento de los activos.

Después de eso las empresas decidieron darle mayor responsabilidad a este nuevo departamento, otorgándole responsabilidades como:

- Garantizar el continuo funcionamiento de los equipos.
- Reducir tiempos de paralización.
- Reparación de las fallas de los equipos en tiempo oportuno.
- No salir de los límites y estándares establecidos por control de calidad.

#### **2.1.1. Concepto de Mantenimiento.**

Según el Diccionario de la Real Academia Española de la lengua, se define semánticamente mantenimiento como:

1. m. Acción y efecto de mantener o mantenerse.
2. m. Conjunto de operaciones y cuidados necesarios para que instalaciones, edificios, industrias, etc., puedan seguir funcionando adecuadamente.  
(Real Academia Española [RAE], 2018)

Por otro lado, según Terry Wireman (1998), el mantenimiento se considera como la administración de todos los activos que posee una compañía, basada en la maximización del rendimiento sobre inversión de activos.

En base a esto, mantenimiento puede considerarse como el trabajo que, gracias al conjunto de operaciones, de recursos humanos, recursos tecnológicos y recursos físicos: equipos, capital y terrenos; permiten obtener una disminución de las detenciones de una empresa y, de la misma forma, lograr un aumento en la producción de esta. Aumentando, también, la disponibilidad y confiabilidad de los equipos.

Entonces, se puede observar que el mantenimiento cumple una función de apoyo, la cual participa en las actividades que, obligadamente, deben estar dentro de una empresa si lo que se busca es una disminución del costo global de mantenimiento durante la vida estimada de los activos. Por otro lado, si la empresa busca optimizar esta función de apoyo, es necesario situarla en el marco de una función más global llamada función equipos. Esta última incluye todas las actividades que están relacionadas con los activos físicos de la empresa:

- Mantenimiento.
- Inversiones en productividad.
- Inversiones en renovación.
- Mejoras de equipos.
- Desarrollo de nuevo equipos.

Esta función será justificada si la empresa cuenta con un presupuesto para cada una de las funciones que la componen (Pascual, 2005).

### **2.1.2. Misión del Mantenimiento dentro de una Empresa.**

La misión está basada en mantener y mejorar los equipos e instalaciones productivas en forma continua y restablecerlos a las condiciones de funcionamiento predeterminadas. Todo esto con el fin de que cumplan con la vida útil esperada, otorgando también una mayor disponibilidad operacional y confiabilidad de los equipos, dando una mayor seguridad y bienestar en el trabajo. Gracias a esto se logra maximizar la productividad y eficiencia de una empresa y, por otro lado, disminuir los costos globales de mantención.

### **2.1.3. Funciones Básicas del Mantenimiento.**

Según Higgins (1994), las funciones básicas del mantenimiento pueden resumirse de la siguiente manera:

- **Reparar:** Consiste en dar una solución a la falla que impide el funcionamiento del equipo o maquinaria, de manera que se pueda restablecer su funcionamiento.
- **Mantener:** Está basado en realizar programas/actividades que eviten la falla del equipo y de esta forma mantenerlo en operación.
- **Preservar:** Consiste en la intervención de forma establecida a la máquina, equipo o instalación con el objetivo de prolongar la vida útil del activo físico.
- **Mejorar:** Consiste en realizar intervenciones específicas que permiten mejorar la operación de la máquina o instalación y, también, prolongar su vida útil.
- **Proyectar:** Se basa en la recolección de información y en la correcta interpretación de ésta, de manera que a futuro se puedan tomar acciones sensatas.

### **2.1.4. Historia del Mantenimiento y su Constante Evolución.**

En los comienzos de la revolución industrial, los operarios eran quienes se encargaban de las reparaciones de los equipos. A medida que la tecnología iba avanzando, la maquinaria se iba volviendo cada vez más compleja y el tiempo de reparación aumentaba considerablemente, debido a esto comenzaron a desarrollarse los primeros departamentos de mantenimiento, los cuales tenían actividades diferentes a los operarios de producción. En este tiempo, las tareas del departamento de mantención eran netamente correctivas, en donde los funcionarios de mantenimiento se dedicaban a solucionar de forma provisoria las fallas de los equipos para luego ponerlos en funcionamiento.

Después de la Primera Guerra Mundial y, sobre todo, de la Segunda Guerra Mundial, aparece un nuevo concepto llamado “Fiabilidad”, en donde, los departamentos de mantenimiento no solo buscan encontrar y solucionar las fallas de los equipos, sino que también buscan prevenirlas, es decir, actuar para que estas no se produzcan.

Este nuevo objetivo re-direcciona al departamento de mantenimiento a crear una nueva entidad, personal cuya única función es estudiar qué tareas de mantenimiento deben realizarse para evitar las fallas. Por otro lado, el personal indirecto, que no está involucrado directamente en la realización de las tareas, aumenta, y con él los costes de mantenimiento,

pero el objetivo del departamento es, también, aumentar y fiabilizar la producción, evitar las pérdidas por avería y sus costes asociados.

De este modo, aparecen prácticamente de forma sucesiva diversas estrategias de mantenimiento, cada una según las necesidades concretas de cada proceso industrial: el Mantenimiento Preventivo, el Mantenimiento Predictivo, el Mantenimiento Proactivo, la Gestión de Mantenimiento Asistida por Ordenador y el Mantenimiento Basado en Fiabilidad.

De forma paralela, en los años 80, se promueve la idea de volver al modelo inicial donde los operarios de producción se preocupaban de las tareas de mantención de los equipos, nada más que por temas económicos, pues se pensaba era más rentable, entonces, se desarrolla el TPM (Mantenimiento Productivo Total), en este tipo de mantenimiento alguna de las tareas realizadas por personal del departamento de mantención son ahora realizadas por operadores de producción; tareas son tales como: trabajos de limpieza, lubricación, ajustes, reaprietes de tornillos, etc. Con esto se pretende que el operario se involucre más en el cuidado de la máquina, siendo el objetivo último del TPM conseguir Cero Averías.

Como se puede comprobar, las distintas estrategias de mantenimiento han ido evolucionando constantemente a lo largo del último siglo según las carencias que se observaban en cada una de las estrategias de mantenimiento al aplicarlos a la situación “Industria Real”, de manera que unas estrategias engloban a otras, otras interactúan entre ellas, y todas se han ido adaptando a los nuevos usos de la industria.

Moubray (1991) mencionaba que se podía seguir el rastro de la evolución del mantenimiento a través de tres generaciones. Actualmente, con más estudio detrás, se mencionan cuatro generaciones en la evolución del concepto de mantenimiento:

- **1ª Generación:** Es considerada la generación más larga, desde la revolución industrial hasta después de la Segunda Guerra Mundial, aunque todavía impera en muchas industrias. El mantenimiento se ocupa solo de arreglar las averías. Se aplica el Mantenimiento Correctivo.
- **2ª Generación:** Entre la Segunda Guerra Mundial y finales de los años 70 se descubre la relación entre edad de los equipos y probabilidad de fallo. Se comienza a hacer sustituciones preventivas. Se aplica el Mantenimiento Preventivo.

- **3° Generación:** Surge a principio de los años 80. Se comienzan a realizar estudios causas- efectos para averiguar el origen de los problemas. Es el Mantenimiento Predictivo o detección precoz de síntomas incipientes para actuar antes de que las consecuencias sean inadmisibles. Se comienza a hacer partícipe al departamento de producción en las tareas de detección de fallos.
- **4° Generación:** Aparece a comienzos de los años 90. El mantenimiento se contempla como una parte del concepto de Calidad Total: “Mediante una adecuada gestión del mantenimiento es posible aumentar la disponibilidad al tiempo que se reducen los costos. Se identifica el mantenimiento como fuente de beneficios, frente al antiguo concepto de mantenimiento como “mal necesario”. La posibilidad de que una máquina falle y las consecuencias asociadas para la empresa es un riesgo que hay que gestionar, teniendo como objetivo la disponibilidad necesaria en cada caso al mínimo coste.

A continuación, en la tabla N° 2.1 se muestra en resumen la evolución del mantenimiento.

**Tabla N° 2.1: Evolución histórica del Mantenimiento.**

<i>1° Generación</i>	<i>Reparar averías Mantenimiento correctivo</i>	<i>Desde 1820 - Hasta 1945</i>
<i>2° Generación</i>	<i>Relación entre probabilidad de fallo y edad Mantenimiento preventivo programado Sistemas de Planificación</i>	<i>Desde 1945 - Hasta 1980</i>
<i>3° Generación</i>	<i>Mantenimiento preventivo condicional Análisis causa-efecto Participación de producción (TPM)</i>	<i>Desde 1980 - Hasta 1990</i>
<i>4° Generación</i>	<i>Proceso de mantenimiento Calidad total Mantenimiento como fuente de beneficios Compromiso de todos los departamentos Mantenimiento basado en el riesgo (RBM)</i>	<i>1990+</i>

Fuente: Guardia. R. (2017).

### **2.1.5. Gestión del Mantenimiento.**

La gestión del mantenimiento abarca el conjunto de técnicas y métodos que tienen como finalidad conseguir una utilización óptima de los activos físicos de una empresa,

manteniéndolos en el estado que requiere una producción eficiente con gastos mínimos. Entonces, la finalidad de esta política de mantenimiento busca que los equipos se mantengan operando con el menor número de fallas posibles.

### **Estrategias de Mantenimiento.**

Para lograr el objetivo de la gestión del mantenimiento se llevan a cabo las siguientes tres medidas.

1. **Reparación de los activos físicos una vez que se produce la falla:** A este punto se le denomina Mantenimiento Correctivo, y suele ser utilizado cuando el componente puede ser reparado y su falla no altera al sistema global. A continuación, se da una explicación más detallada de la estrategia.
- **Mantenimiento Correctivo:** Esta actividad se caracteriza porque su realización ocurre después de haber ocurrido una falla, con el fin de corregirla, disminuir el daño, reparar el equipo y volverlo a su condición de funcionamiento normal. Este tipo de mantenimiento puede ser realizado en forma de emergencia, cuando se requiere poner el equipo en marcha de inmediato. O bien, puede ejecutarse más tarde en forma programada, solo en aquellos casos en que el equipo puede seguir operando después de la falla.

Alguna de las ventajas que tiene este tipo de mantenimiento son:

- Existe un máximo aprovechamiento de la vida útil de los equipos.
- El costo de implementación de este tipo de mantenimiento es mínimo.
- Es rentable en equipos que no detienen la producción de la empresa de forma directa.

Alguna de las desventajas que tiene este tipo de mantenimiento son:

- Hay una bajísima calidad en las reparaciones, debido al poco tiempo disponible para poder reparar las fallas.
- Las fallas ocurren de manera imprevista, por tanto, hay mermas importantes en la producción.
- Existe una alta probabilidad de que fallen elementos que sean difíciles de obtener, lo que implica contar con un stock de repuestos importantes.

2. **Mantener los equipos redundantes:** Este punto se aplica cuando la Confiabilidad del sistema, dentro de una empresa, se puede mejorar al tener tanto equipos como repuestos redundantes. Los cuales suelen llamarse sistemas en “Stand By” y en Paralelo.
3. **Mantenimiento de los equipos antes de que estos fallen:** El tercer punto se aplica cuando la meta dentro de una empresa es optimizar la frecuencia y tiempos de mantenimiento, con el fin de reducir costos globales de mantenimiento. Objetivo que no puede ser alcanzado por el mantenimiento correctivo. A continuación, se da una explicación más detallada de la estrategia.
  - **Mantenimiento Preventiva:** Esta mantención se realiza antes de que ocurra una falla, pues con la aplicación de este método se busca evitar que suceda, disminuir los efectos, limitar el desarrollo de la falla y disminuir el daño. Se caracteriza, además, porque este tipo de mantenciones tiene su contenido y fundamentos escritos en una pauta y lista de chequeos. La mantención preventiva suele estar programada y suele encontrarse en el Plan Maestro de Mantención y una de las características más importantes de este tipo de mantenimiento es la inspección que se realiza a los equipos, la cual puede ejecutarse a, través de instrumentos sencillos y poco sensibles, o bien, con instrumentos complejos y de alta sensibilidad. Suelen, además, realizarse trabajos como ajustes, reparaciones, cambios o servicios que tiene como único fin alargar la vida útil de los componentes. La vida útil se puede obtener a, través de un estudio de ingeniería en donde el tiempo de desarrollo de la falla y el tiempo medio entre fallas son los datos básicos necesarios.

Existen dos formas de aplicar el mantenimiento preventivo:

- a. **Mantenimiento Preventiva Sistemática:** Este tipo de mantenimiento se realiza en base a un programa de mantención previamente establecido. Para poder aplicarlo se requiere conocer la vida útil o duración del mecanismo, o bien, del elemento que se va a intervenir. Debido a que la frecuencia de las actividades a realizar tiene relación directa con la vida útil de los mecanismos o componentes. El trabajo se realiza porque se sabe que el elemento al cual se va a intervenir está en la recta final de su vida útil, y si no se hace, puede ocurrir una falla, disminución del rendimiento, o producir daños colaterales.

- b. **Mantenimiento Preventiva Basada en la Condición o Condicional:** Este tipo de mantenimiento también se realiza en base a un programa de mantención previamente establecido, con la diferencia que, en este, el plan se basa en un acontecimiento predeterminado.

Alguna de las ventajas que tiene este tipo de mantenimiento son:

- Hay tiempo para poder planificar un buen plan de mantenimiento
- Aumenta, considerablemente, la vida útil de los equipos.
- Existe una importante disminución de las detenciones imprevistas en los equipos

Alguna de las desventajas que tiene este tipo de mantenimiento son:

- Aumenta el costo y disminuye la disponibilidad si no se elige correctamente la frecuencia de intervención de las acciones preventivas.
- Inicialmente hay un aumento considerable en el mantenimiento.
- El elemento deberá cambiarse, aunque se encuentre funcionando de forma óptima.

**Mantenimiento Predictiva o Según Condición:** Este tipo de mantenimiento se aplica según un programa previamente establecido, el cual tiene como actividad principal la inspección de los equipos y componentes con equipos de alta sensibilidad. El objetivo de esta mantención es detectar, en una etapa prematura, el desarrollo de la falla, con el fin de que se pueda detectar la condición en la que se encuentra el equipo y, en base a esto, tomar medidas que eviten la continuación de la falla. Los instrumentos utilizados son analizadores de vibraciones, detectores de ultrasonido, termografía infrarroja, rayos X, líquidos penetrantes, etc.

Alguna de las ventajas que tiene este tipo de mantenimiento son:

- Debido a que las revisiones son en base a resultados y no a percepción, los equipos duran mucho más.
- Mas confiabilidad en el mantenimiento, pues al utilizar instrumentos y personal de mayor calidad, los resultados debiesen ser más exactos.
- Se requiere menos personal, por lo que genera una disminución en el costo de personal y en los procesos de contratación.

Alguna de las desventajas que tiene este tipo de mantenimiento son:

- Es importante contar con personal calificado para realizar las actividades predictivas, por lo que hay un mayor costo asociado.

- Se requieren equipos especiales y costosos.
- Costosa implementación.

### 2.1.6. Conceptos Básicos de la Gestión del Mantenimiento.

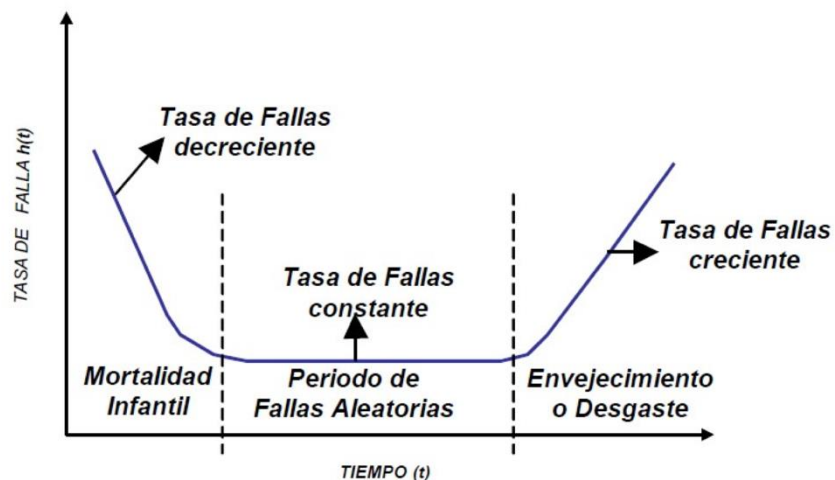
En este apartado se introducen los conceptos más importantes en la Gestión del Mantenimiento (Meruane, 2011).

**Mantenimiento/Mantenibilidad:** Mantenimiento se define como el conjunto de acciones que, ejecutadas en un componente, lo restauran a un estado específico. Cuando a un componente se aplica mantención se considera que queda como “nuevo”. La Mantenibilidad es la probabilidad de que se pueda restaurar la funcionalidad de un componente que posee falla en un tiempo determinado.

**Confiabilidad:** La confiabilidad,  $R(t)$ , es la probabilidad de que un componente cumpla con los requerimientos de funcionalidad, bajo ciertas condiciones, para un intervalo de tiempo determinado. Cualitativamente, la confiabilidad es la capacidad que tiene un componente de permanecer funcional. En otras palabras, que no existan interrupciones (fallas) durante un periodo de tiempo.

**Tasa de Falla:** La tasa de falla,  $\lambda(t)$ , se define como el número de fallas ocurridas en un tiempo determinado. La tasa de falla de un sistema pueda variar con el tiempo y uno de los gráficos más utilizados para explicar esa variación en la tasa de falla en componentes durante su vida útil es “La curva de la bañera”, que se muestra en la figura N° 2.1.

**Figura N° 2.1: Curva de la bañera.**



Fuente: Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico del Riesgo R2M. 2004.

**En la primera parte de la curva**, en donde la tasa de falla va disminuyendo, ocurren las fallas infantiles o prematuras, que usualmente están relacionadas con procesos de manufactura y control de calidad (soldaduras, uniones, suciedad, grietas, impurezas, ajustes, montajes, posicionamientos incorrectos, alineamientos, desconocimiento del equipo, errores de diseño, desconocimiento del procedimiento, etc.).

**En la segunda parte de la curva**, en donde la tasa de falla se mantiene constante, se denomina usualmente como fallos constantes o etapa de madurez. En esta etapa las fallas no se producen por causas relacionadas con el equipo, sino por factores externos, tales como mala operación del equipo, condiciones inadecuadas de operación, etc.

**En la tercera parte de la curva**, en donde la tasa de fallas aumenta rápidamente, se describen las fallas de desgaste y se asume que el aumento de la tasa se produce debido a que los mecanismos de desgaste se aceleran. Suele ocurrir por el desgaste natural del equipo debido a que se encuentra en la fase última de su vida útil.

**Tiempo Medio Para Fallar (MTTF):** En un periodo de tiempo determinado, dentro de la vida de un activo físico, se entiende como el tiempo promedio que funcionará o estará disponible un equipo antes de fallar. Se define como la razón entre el tiempo total disponible y el número de fallas.

**Tiempo Medio Para Reparar (MTTR):** Se entiende como el tiempo que tarda un activo físico, el cual ha presentado falla, en volver a estar en condiciones de funcionalidad. Y se define como:

$$MTTR = \frac{\sum(Ffi * t_{ri})}{\sum F fi} \text{ (Ec.1)}$$

Donde:

$t_{ri}$  es el tiempo que demoran en reparar la falla  $i$ .

$Ffi$  frecuencia de fallas.

**Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF):** Se entiende como el tiempo promedio entre fallas de un sistema. Y puede obtenerse a través de la suma entre MTTF y MTTR, como se muestra en la figura N° 2.2.

**Figura N° 2.2: Tiempo medio entre fallas**

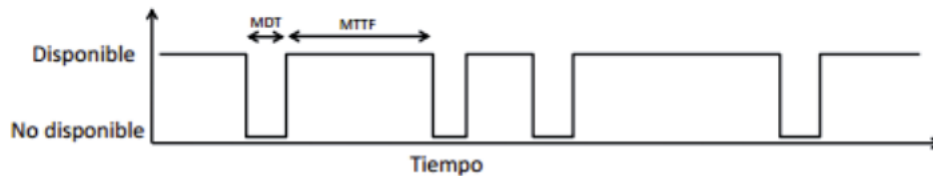


Fuente: Merune, V. (2011).

**Tiempo Medio Fuera de Servicio (MDT):** Se entiende como el tiempo promedio en que un equipo se encuentra fuera de servicio producto de una falla. Para calcularlo se deben considerar todos los MTTR del componente.

**Disponibilidad:** La disponibilidad describe el tiempo total que un equipo se encuentra en condiciones de funcionalidad. Este parámetro está dado por la confiabilidad y la mantenibilidad. En la figura N° 2.3, podemos ver un gráfico del tiempo en que un equipo se encuentra disponible (MTTF) y no disponible (MDT).

**Figura N° 2.3: disponibilidad de un sistema.**



Fuente: Merune, V. (2011).

La disponibilidad se define como:

$$A = \frac{MTTF}{MDT+MTTF} \text{ (Ec.2)}$$

**Dónde:**

MDT: : Tiempo medio fuera de servicio.

MTTF: Tiempo medio para fallar.

## **2.2. Clasificación de Mineral.**

La clasificación nace de la necesidad de diferenciar, separar y ordenar elementos tangibles e intangibles asignándoles características como tamaño, color, forma o conceptos entre muchos otros. La ciencia de la clasificación es la taxonomía, donde existen diversas ramas dependiendo de los objetos o ideas en estudio. Esta ciencia es

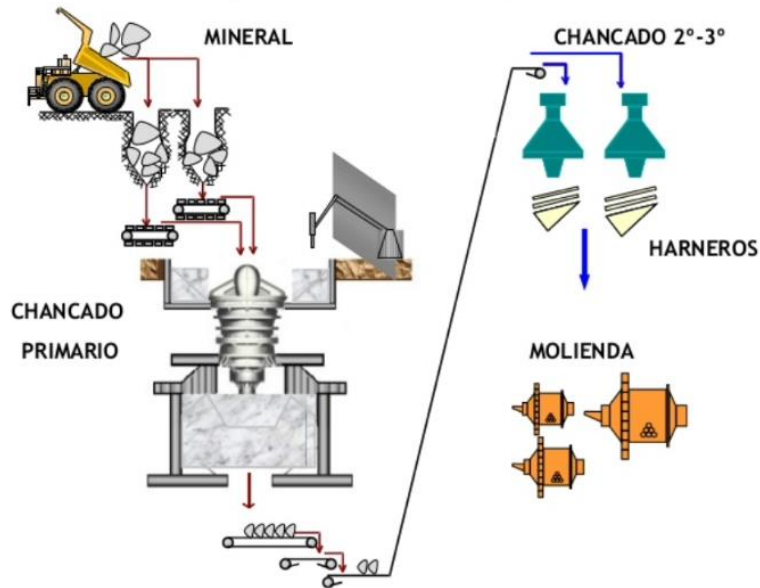
fundamental y es aplicada por las diversas disciplinas involucradas en la explotación de recursos naturales de la tierra, como por ejemplo, la geología de los yacimientos y del mineral extraído con el fin de procesarlo adecuadamente, dependiendo de las características físicas y químicas analizadas.

Es importante tener métodos de clasificación diferenciados a lo largo del proceso minero ya que simplifica la manipulación y la logística del material extraído de la mina, y por sobre todo, asegura un correcto funcionamiento de los equipos en base al diseño de planta o al proceso con el que fueron conceptualizados, logrando obtener los resultados deseados. Ejemplo importante de esto se aprecia en el área de flotación de una concentradora, donde el material que proviene directamente de las baterías de ciclones debe ser adecuadamente clasificado y segregado según cierto tamaño de partícula. Si falla esta clasificación, el proceso de flotación no será capaz de recuperar el porcentaje de cobre óptimo para el cual fue diseñado.

Dentro del proceso de explotación de mineral, se encuentra la fase de conminución, concepto asociado a la reducción del tamaño de un mineral, sometiénolo a fuerzas mecánicas e interacciones de disoluciones químicas, entre otras. Generalmente la conminución, en la industria de extracción del cobre, toma lugar desde la tronadura en mina hasta los procesos finales de la molienda para que el tamaño de mineral sea apto para tratar por flotación o solo hasta los procesos finales de chancado para que el mineral sea procesado por lixiviación. Esto implica que el mineral *Run of Mine (ROM)* deberá atravesar distintas fases como: cizalle, desgaste, aplastamiento, chancado y disoluciones químicas (Drzymala, 2007).

Una planta concentradora de cobre incorpora la conminución en su fase primaria, área conocida como molienda, donde el tamaño del mineral es reducido principalmente por molinos *SAG* y molinos de bolas o barras. Dentro de esta área existen equipos fundamentales para la operación, como lo son el *trommel*, el harnero vibratorio y las baterías de hidrociclones. La función de ellos es clasificar el mineral dependiendo del tamaño, peso y forma, a través de distintos métodos mecánicos como vibraciones, circulación por estructuras ranuradas, mallas o separación centrífuga. Sin estos equipos de clasificación, no se lograría la obtención del concentrado de cobre.

**Figura N° 2.4: Diagrama de conminución.**



Fuente: Minera Ojos del Salado.

### **2.2.1. Granulometría.**

Granulometría es la medición de distribución del tamaño de partícula presente en una muestra de granos o áridos (of Chemistry, 2009). Generalmente se logra por medio del análisis de tamices con diferentes tamaños de abertura en la malla según la norma que se utilice. Esto permite identificar y cuantificar porcentajes de pesos según escalas granulométricas de las partículas que constituyen una masa total de la muestra analizada. Para este trabajo, también se definirá “granulometría” como tamaño de partícula.

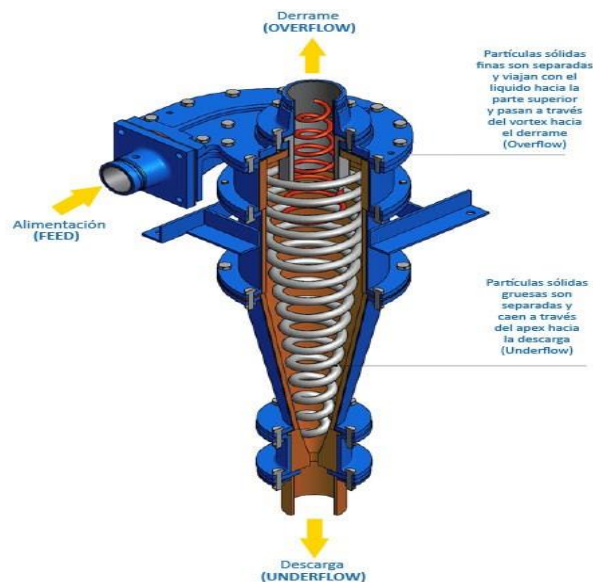
### **2.3. El Hidrociclón.**

Los hidrociclones son equipos de clasificación hidráulica continua, ampliamente utilizados en la industria minera en circuitos de recirculación de molienda y posterior selección del tamaño de material requerido o bien como espesadores y recuperadores de agua en fases posteriores. Su estructura se compone de un cuerpo cilíndrico, un cuerpo cónico, ápice, buscador de vórtice y una tubería de alimentación tangencial al cuerpo, ver figura N° 2.2. Su simplicidad, alta capacidad, bajo mantenimiento y costo de operación y el hecho de ser compactos son características por las cuales son principalmente utilizados a diferencia de otros clasificadores existentes en la industria.

En el procesamiento de minerales, la clasificación corresponde a la operación en que los componentes de una mezcla son clasificados por tamaño. El mecanismo que permite

la separación es la sedimentación de las partículas sujetas a fuerzas de cuerpo como la gravedad y centrífuga. El producto de esta clasificación se divide en dos fracciones, una compuesta de material particulado fino, denominado overflow o sobreflujo, y otra compuesta de material particulado grueso denominado underflow o bajoflujo. Los hidrociclones trabajan con un flujo de alimentación en donde sus características como presión, fracción volumétrica de sólidos y distribución del tamaño de partícula son relativamente constantes. Cambios en el punto de operación o características del flujo generan un cambio en el comportamiento interno del equipo, el cual puede desembocar en puntos de operación inestables e indeseables como la descarga tipo roping, proceso en el cual se suprime el núcleo de aire y se genera una descarga con elevados contenidos de partículas gruesas a través del sobreflujo y un aumento en la concentración de sólidos a través del bajoflujo. En este sentido, el proceso deseable está asociado a descargas de tipo spray, en el cual se observa la existencia de un núcleo de aire y una descarga de la mezcla en forma cónica, los tipos de descarga se observan en la figura N° 2.5. De esta forma, la operación óptima se asocia a descargas de tipo spray y cercanas al roping, mientras que procesos indeseados se asocian a descargas tipo semi-roping o roping, los cuales son caracterizados por una buena o mala calidad en la clasificación del mineral, lo cual es visible posteriormente en la curva de clasificación.

**Figura N° 2.5: Esquema de un Hidrociclón.**



Fuente: Minera Ojos del Salado.

El diseño de estos equipos se basa en consideraciones geométricas y las características del flujo con que son alimentados, de esta forma se selecciona el tamaño y cantidad de ciclones requeridos. También existen diseños basados en simulación matemática. A pesar que el desarrollo de los hidrociclones data de los años 60, actualmente no existe un conocimiento pleno de los procesos internos asociados al flujo. Se han desarrollado mediciones experimentales basadas en velocímetros de laser Doppler, cámaras de alta velocidad, tomografías de impedancia eléctrica, entre otras, estas técnicas permiten un acercamiento al conocimiento interno del hidrociclón.

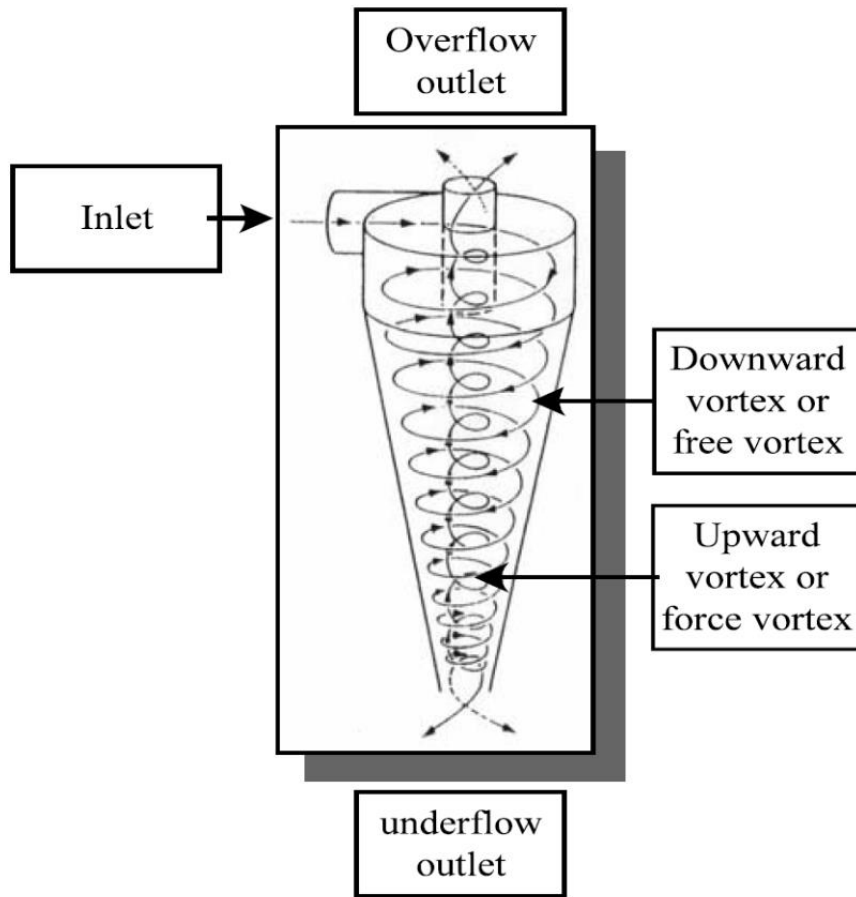
### **2.3.1. Funcionamiento.**

El hidrociclón es un equipo diseñado con el fin de separar materiales sólidos contenidos en líquidos según su densidad, tamaño o peso debido a la acción centrífuga que se genera en su interior. En este se transforma la energía estática del fluido (presión) en energía dinámica (velocidad).

Al interior del hidrociclón se identifican dos zonas de movimiento para el fluido (ver figura N° 2.6) el vórtice libre en la periferia (corriente descendente) y el vórtice de fuerza en el centro (corriente ascendente). Este fenómeno se genera al alimentar tangencialmente al ciclón, donde el fluido y partículas adquieren rapidez a medida que recorren la estructura de este. Al existir una diferencia de presión negativa producto del vórtice al interior del ciclón, el aire ingresa por la abertura en el underflow y recorre la columna central del equipo como la corriente ascendente descrita anteriormente.

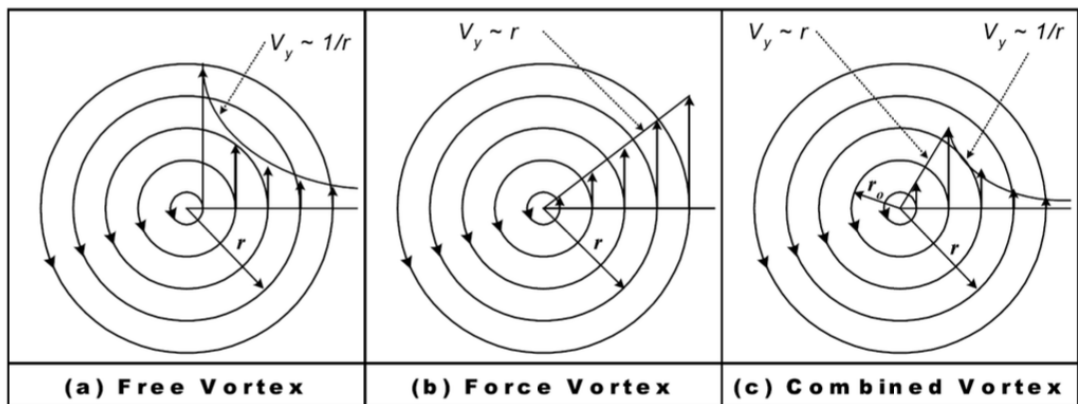
Al descomponer la velocidad del fluido, se tiene que la componente más importante en la clasificación del material es la velocidad tangencial (no así en el centro donde la velocidad axial es mayor), ya que esta imprimirá un campo de aceleración sobre las partículas, lo que genera finalmente la fuerza de separación (figura N° 2.7).

**Figura N° 2.6: Flujos al interior del un Hidrociclón.**



Fuente: Puprasert et al. (2004).

**Figura N° 2.7: Perfil de velocidad del vórtice libre (a), del de fuerza (b) y la combinación de ello (c).**



Fuente: Puprasert et al. (2004).

Las partículas en el líquido que tienen mayor velocidad de sedimentación (más densas) son centrifugadas al borde del ciclón y las partículas con baja velocidad de sedimentación (menos densas) se aglomeran en la columna central del vórtice. Luego el material acumulado en la periferia desciende debido a la gravedad y se aproxima al *apex*, el cual tiene un diámetro menor que su contraparte vertical, llamada *vortex finder*. Esto provoca una saturación del material con sobretamaño en la descarga (Güenechea, 2016) y obliga a que el líquido y aire se dirijan a través del vórtice de fuerza hacia la parte superior del ciclón, arrastrando con ello las partículas cercanas al centro hasta el *vortex*, logrando así la clasificación de material fino llamado *overflow*.

### 2.3.2. Características.

Según Bradley (1965), la eficiencia de clasificación o nivel de tratamiento que se espera del material entrante se rige por el *cut-size* ( $d_{50}$ ), definido como el tamaño de la partícula que puede ser separada de una fase continua por un hidrociclón al 50 % de su eficiencia, o en otras palabras, es la probabilidad del 50 % de que una partícula sea arrastrada hacia el *overflow* o el *underflow*.

$$d_{50} = K \sqrt{\frac{D_{HC}^3 \mu_c}{Q \Delta_p}} \text{ (Ec. 3)}$$

En esta ecuación, se aprecian los siguientes términos para  $d_{50}$ :

K: Constante de la ecuación.

$D_{HC}$ : Diámetro de la sección cilíndrica.

$\mu_c$ : Viscosidad de la fase líquida.

Q: Flujo alimentación.

$\Delta_p$ : Diferencial de densidad entre partícula sólida y fase líquida.

Acorde a la ecuación N° 2.1, la variable más influyente en la eficiencia de clasificación es el diámetro del cuerpo ( $D_{HC}$ ), por lo que a menor valor de este, se tiene un menor tamaño de corte y así una mayor eficiencia. Esta dimensión es además utilizada para diferenciar los ciclones en el mercado, por ejemplo, el ciclón a analizar en este estudio es un *Krebs* modelo *Gmax33*, donde el número 33 son las pulgadas del diámetro nominal.

Otra variable a considerar en cuanto a la configuración de la batería, es el ángulo de instalación del ciclón, donde se ha demostrado que otorgarle inclinación al equipo mejora considerablemente la clasificación cuando estos son grandes y trabajan a baja presión

(Asomah y Napier-Munn, 1997). Con esto existe un menor by-pass de finos, un menor desgaste en el revestimiento y se puede aumentar el tamaño de corte. En la figura N° 2.10 se puede apreciar una inclinación de alrededor 45°.

Existen más consideraciones para poder concebir el diseño de un ciclón dependiendo de la mezcla a separar, como la caída de presión, la gravedad específica de los distintos minerales a clasificar, los efectos fisicoquímicos y los materiales de los revestimientos entre otros, pero se considera al *cut-size* como el principal.

## **2.4. Hidrociclones en Concentradora.**

### **2.4.1. Descripción General.**

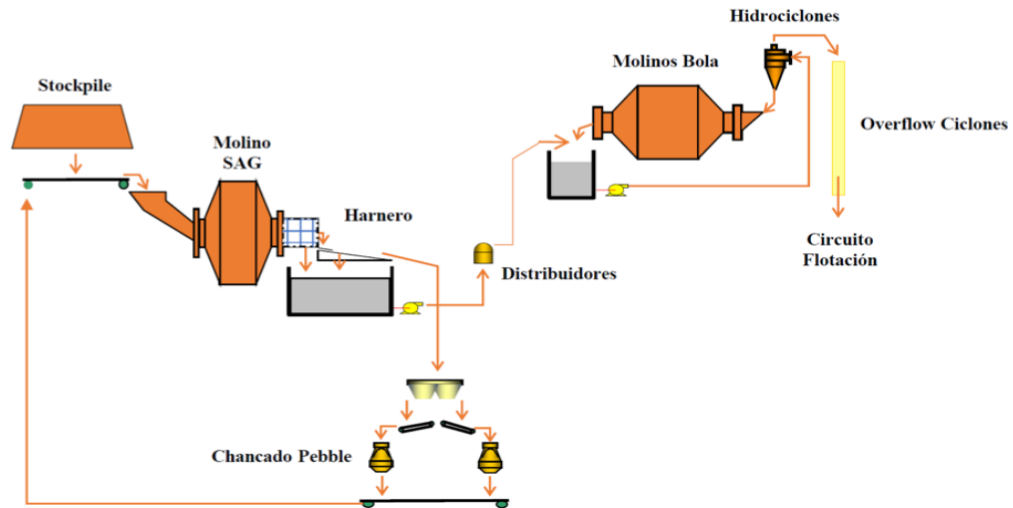
Cada compañía minera tiene diversas configuraciones de equipos según las características del mineral que procesan y también de la capacidad de extracción diaria que cuenten en la mina.

Ojos del Salado es la mina con mediana producción en el mundo, con alrededor de 800.000 toneladas anuales de cobre fino (2018), representando alrededor del 3 % del aporte mundial (ICSG, 2018). En esta mina se extraen alrededor de 1.000.000 toneladas diarias de material, donde la mayoría del material útil es posteriormente chancado y transportado mediante correas overland a los stockpiles de Concentradora.

El objetivo de una planta concentradora es obtener el producto final de concentrado de cobre mediante diversos procesos de aspectos mecánicos y químicos.

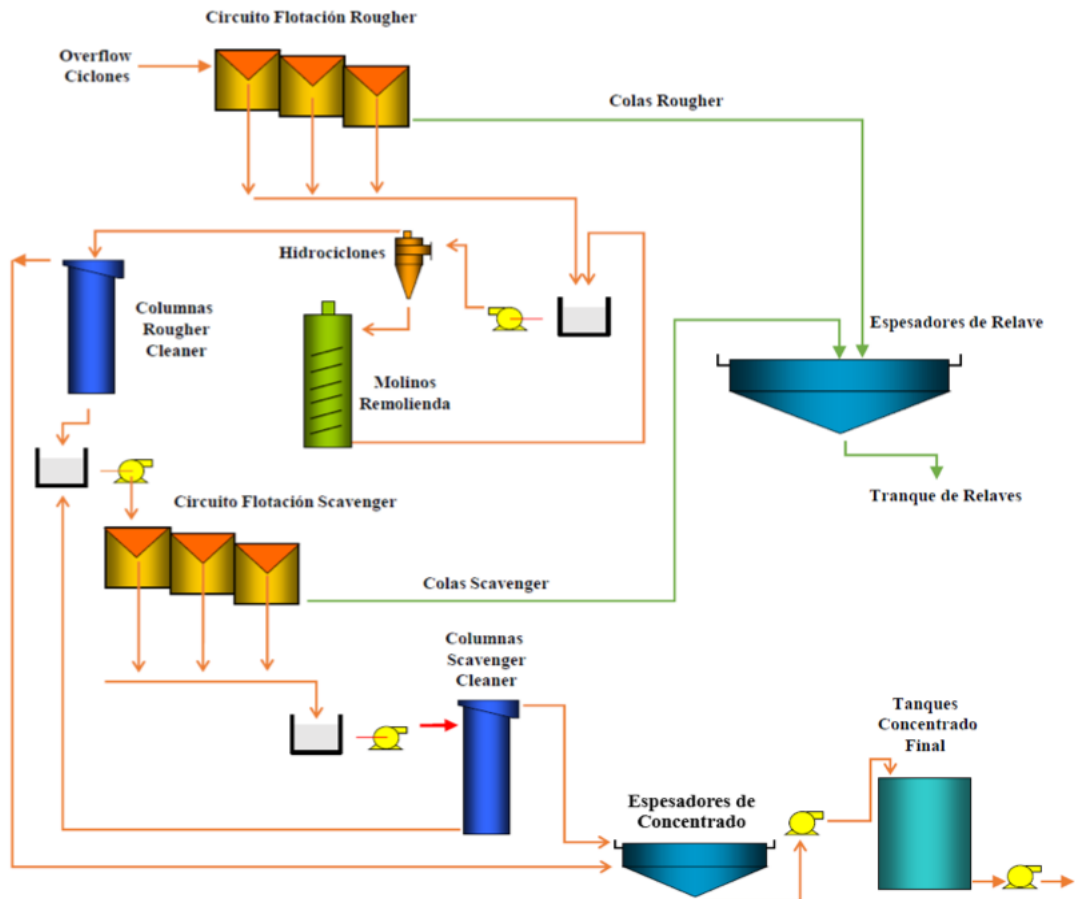
Ojos del Salado está compuesta por Línea 1 y Línea 2 donde se encuentran sus respectivas áreas de molienda y flotación. Ambas líneas son simétricas en su diseño e instalación de equipos y cuentan con una capacidad en conjunto de tratamiento mineral de aproximadamente 300.000 [tpd], una recuperación alrededor del 85 % y producción promedio de cobre fino de 2.000 [tpd]. Todo este cobre fino es transportado como concentrado hacia el Puerto Totoralillo (ubicado en Caldera) por medio de un mineroducto. Este puerto cuenta con la infraestructura y equipos necesarios para filtrar, secar y almacenar el concentrado de cobre en sus pilas de acopio, para luego ser embarcado y distribuido al mercado mundial.

Figura N° 2.8: Diagrama de procesos del área de molienda.



Fuente: Bechtel (2012).

Figura N° 2.9: Diagrama de procesos del área de flotación en Concentradora.



Fuente: Bechtel (2012).

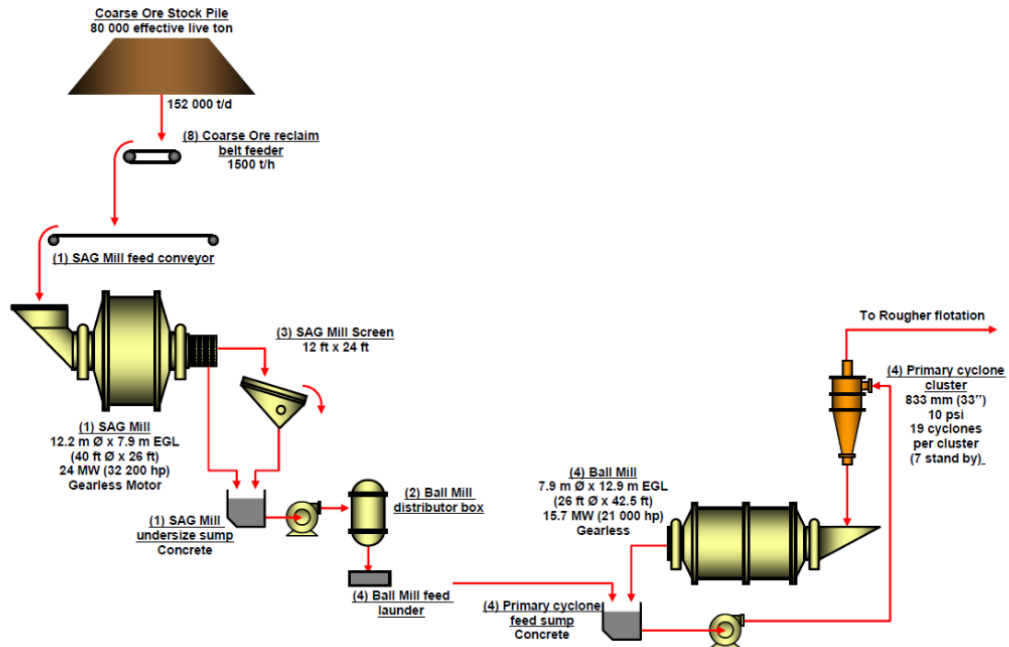
### 2.3.2. Configuración de Equipos en Molienda CLS.

Dada la cantidad de material que procesa Laguna Seca a través de su Línea 1 (aproximadamente 6.000 [tph]), se tiene la siguiente configuración en el área de molienda:

#### Circuito de Molienda.

- 1 Stockpile con capacidad de 150.000 [tpd]
- 8 Feeders bajo stockpile.
- 1 Molino SAG de Ø38 pies.
- 1 Trommel.
- 1 Harnero.
- 2 Bomba de pulpa bajo tamaño en SAG.
- 2 Distribuidores de carga (1 por cada bomba bajo SAG) hacia los Molinos de bola.
- 4 Molinos de bola
- 4 Bombas de pulpa bajo tamaño en molinos bola.
- 4 Baterías de Hidrociclones *gMax33*.

Figura N° 2.10: Diagrama de flujo del área de molienda en Concentradora.



Fuente: Bechtel (2012).

El circuito de molienda se inicia en los *feeders* donde se descarga el mineral desde el *stockpile* hacia una correa transportadora que alimenta al molino SAG. Este en su descarga

tiene conectado un trommel, donde el mineral con sobretamaño pasa por un harnero vibratorio que vuelve a separar el material de mayor tamaño enviándolo a los chancadores del circuito de pebble. El mineral clasificado como fino, tanto en el trommel como en el harnero, va a dar al sumidero del molino SAG que se encuentra debajo de estos equipos.

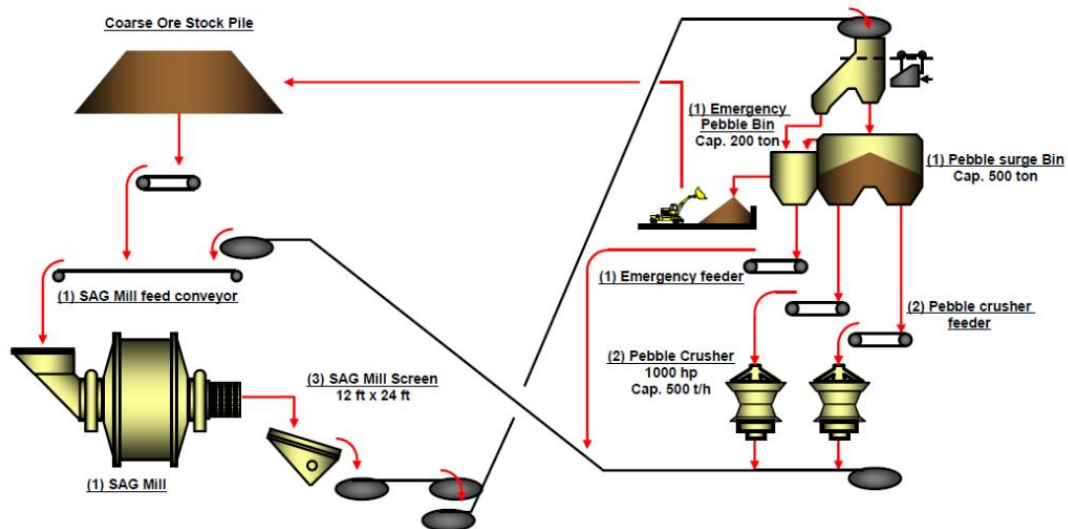
Desde el sumidero bajo SAG, la pulpa es impulsada y conducida mediante bombas y canaletas hacia la molienda secundaria donde hay cuatro molinos de bola que operan en un circuito cerrado con sus respectivas baterías de ciclones proceso en el cual se obtiene la pulpa con granulometría adecuada para enviarla al circuito de flotación.

**Circuito de Sobretamaño Harnero (Circuito de Pebble).**

- 1 Silo de pebbles.
- 2 Feedres de alimentación.
- 2 Chancadores.

El circuito de *pebble* se inicia en el harnero y todo este material de sobretamaño es triturado por dos chancadores, reduciendo así la granulometría. Finalmente todo este producto es reinyectado nuevamente a la correa que alimenta al molino SAG.

**Figura N° 2.11: Diagrama de flujo del circuito de pebbles.**



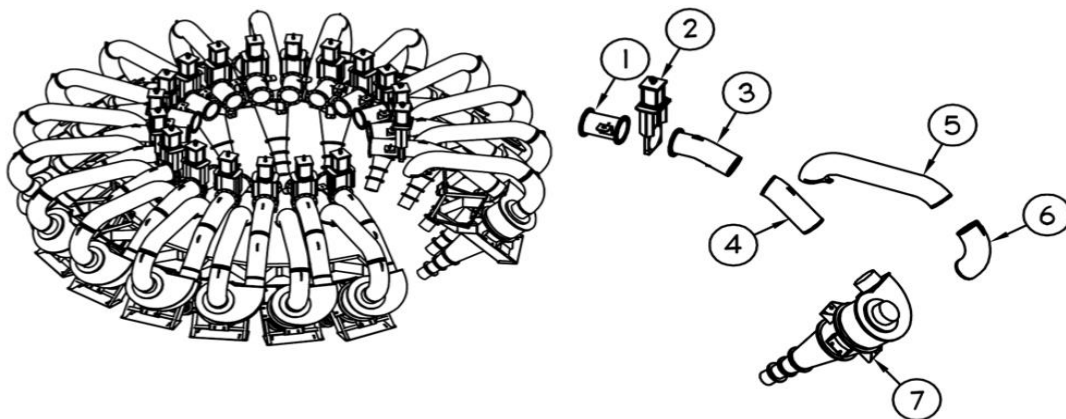
Fuente: Bechtel (2012).

### 2.3.3. Configuración de Batería de Hidrociclones CLS.

Las baterías de ciclones presentes en Molienda L1 son cuatro, las que son idénticas entre si en cuanto a cantidad de componentes, diseño y configuración de instalación. Cada una está conformada por tuberías y principalmente por 19 ciclones *Krebs Gmax33* de 33 pulgadas, 19 válvulas de corte y 19 sensores *Cidra Cyclonetrac PST*. Su operación contempla un mínimo de 12 ciclones trabajando a una presión de 10 [psi] y 7 ciclones en modo stand-by (Muñoz et al., 2017). Los últimos tres componentes mencionados son de particular interés para este trabajo de investigación, dado que de ellos se obtendrán datos para el análisis y propuesta de mejoras.

Por cada batería se encuentra el siguiente conjunto de partes:

**Figura N° 2.12: Conjunto ensamble de una batería de ciclones y despiece del piping.**



Fuente: Krebs Engieneers 2000.

**Tabla N° 2.1: Listado de piping de una batería.**

Ítem	Descripción	Cantidad
1	Carrete de alimentación A	19
2	Válvula KGD neumática	19
3	Carrete de alimentación B	19
4	Carrete de alimentación C	19
5	Tubería de descarga Overflow A	19
6	Tubería de descarga Overflow B	19
7	Hidrociclón 33 [in] Krebs DS 33	19
-	Dispositivo PST (registro tamaño de partícula en overflow)	19

Fuente: Krebs Engieneers 2000.

**Figura N° 2.13: Imagen lateral de una batería de hidrociclones (configuración 45°)**



Fuente: Krebs Engineers 2000.

#### **2.3.4. Filosofía de Operación de las Baterías de Ciclones.**

La Filosofía de Operación se define como los criterios para operar adecuadamente los equipos de una planta de procesos, que fue concebida para una determinada capacidad de producción. De esta forma se asegura una correcta operación de equipos dependiendo de las condiciones de la materia prima que provea la mina y que ingrese a los molinos SAG.

El producto de bajo tamaño proveniente del molino SAG y del harnero se reparte, luego de pasar por equipos distribuidores, entre los sumideros de cada molino de bolas de bolas donde se debe mantener con aproximadamente un nivel de 65 % de pulpa y a un volumen constante para evitar el rebose del sumidero. El nivel adecuado de cada uno de ellos se logra por medio de un lazo control entre el nivel del sumidero y la rapidez de operación de las bombas bajo molino (capacidad nominal de 8.400 [m<sup>3</sup>/h]), cuya función es impulsar el mineral desde los sumideros hacia las baterías de ciclones con un porcentaje de sólidos constante. Dicho porcentaje se regula con la adición de agua en los sumideros, donde el nivel de llenado varía entre un 65 % y 75 %, por lo que si los niveles de llenado son superiores o inferiores, las bombas operarán a mayor o menor velocidad para mantener los niveles.

Una batería de ciclones debe entregar un producto final con granulometría media P80 de 145  $\mu$ m y alrededor de un 27 % de sólidos a través de la descarga *overflow* del ciclón.

El material que no es clasificado por la presión de operación de 10[psi], cae gravitacionalmente y se descarga por el *underflow* con alrededor 80 % de sólidos (Muñoz et al., 2017).

Para cumplir con la granulometría requerida por el circuito de flotación, cada ciclón cuenta con un sensor *PST (Particle Size Tracker)*, el cual mide el tamaño de partícula del flujo que pasa por una determinada sección transversal de tubería. Este dispositivo enviará la orden “cerrar” a la válvula cuchillo en el ducto de alimentación al ciclón si detecta una granulometría mayor a 180 [ $\mu\text{m}$ ] en un periodo de 10 segundos. Dada esta señal, de inmediato el sistema abrirá la válvula de alimentación que lleve más tiempo cerrada, por lo tanto el ciclón que lleve más tiempo sin operar volverá a su funcionamiento. El fin de este lazo de control es normalizar la presión de clasificación en la batería, además de entregar una ventana de tiempo para inspeccionar el equipo en busca de anomalías.

## **2.4. Estado del Arte.**

### **2.4.1. Mantenimiento de Ciclones.**

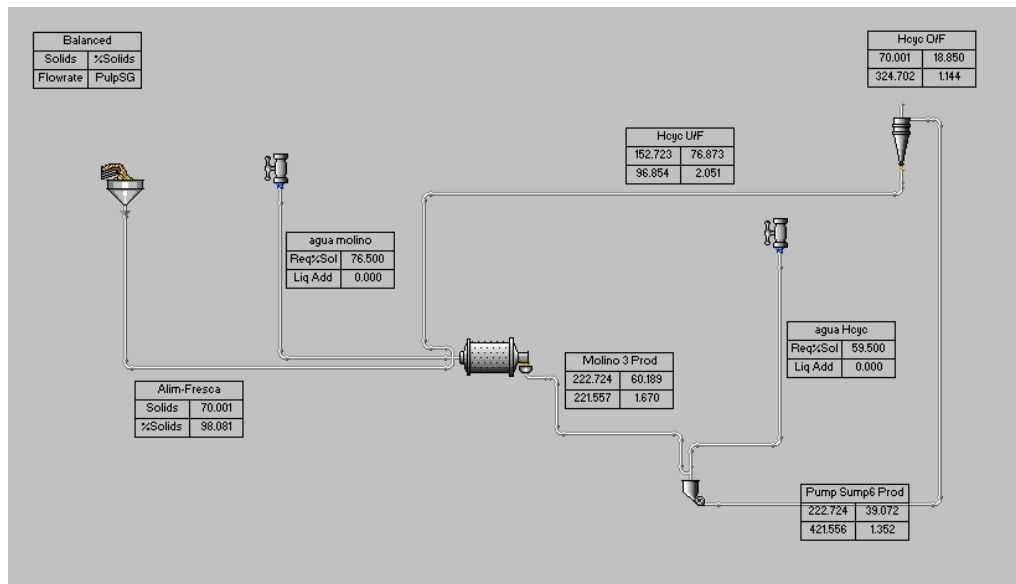
#### **2.4.1.1. Plan de Mantenimiento en Software JK SimMet.**

El plan de mantenimiento existente para los ciclones en Minera Ojos del Salado, es de aspecto preventivo, gestionado a través del software JK SimMet. Este data del año 2010, donde contempla el cambio de todos los ciclones de la batería cada 32 semanas, al mismo tiempo. En la actualidad los ciclones no son cambiados simultáneamente, sino que de manera alternada según criterio del planificador sujeto a las inspecciones (en busca de roturas en revestimientos o embanques), por lo que el desgaste de los componentes es independiente entre ciclones. Esto quiere decir que el plan de mantenimiento actual es de tipo correctivo.

A continuación, se tiene una recopilación de lo que el plan actual de mantenimiento no considera para llevar un control adecuado de las condiciones de cada ciclón:

- Horas efectivas de operación.
- Tonelaje procesado.
- Granulometría del mineral procesado.
- No existe una medición o alerta sobre condiciones del revestimiento del ciclón.

**Figura N° 2.14: Plan declarado en sistema para el cambio de ciclones.**



Fuente: Minera Ojos del Salado.

Esto deriva en que al llegar a las 32 semanas para el cambio de ciclón se han encontrado revestimientos con bajo nivel de desgaste e incluso ciclones sin uso. Además el tener un plan automático en sistema, gatilla rebajas de stock que no son reales ni rastreables, por lo que la planificación cae constantemente en desorganización de componentes. Tampoco se considera que todos los ciclones retirados son enviados a reparar, por lo que dentro de esas reparaciones se encuentran los ciclones sin uso.

Dado estos antecedentes:

- No se lleva un control de las condiciones operacionales de las partes de la batería.
- Falta de control de fallas y de la prevención de estas, generando en ocasiones una importante baja en cuanto a disponibilidad de hidrociclones.
- Descontrol de inventario y recursos monetarios que impactan indirectamente en la planificación del mantenimiento de otros equipos.
- Exposición innecesaria a riesgos al personal que realiza el cambio de ciclones.

Además, al no existir un plan debidamente establecido y acordado entre las áreas de planificación y ejecución, el mantenimiento de los ciclones es desorganizado, sin una pauta adecuada. Esto deriva en que se cambien ciclones a criterio del ejecutor sin haber una evaluación del revestimiento, que por programa semanal figure el cambio de uno y que al momento de retirar el usado se encuentre con muy poco uso, o que se encuentren ciclones con avanzado desgaste prontos a fallar. Evidentemente este descontrol genera

una acumulación importante de equipos en patios a la espera de una reserva para llevarlos a reparación, como sucedió durante el estudio, que se llegó a tener una acumulación de 100 ciclones a la espera de reparación en patios.

**Figura N° 2.15: Fotografía aérea del sector de tránsito de ciclones en patios de salvataje.**



Fuente: Minera Ojos del Salado.

#### **2.4.1.2. Inspección a Baterías.**

En planta, una vez a la semana, se realizan inspecciones donde se levantan fallas y condiciones que pueda presentar un ciclón. El operador del área acompañado de un mecánico revisan el exterior de los ciclones y sus componentes como válvulas, ductos y carcasas. Además, evalúan la descarga por el *apex*, para determinar si el equipo tiene una obstrucción u operación deficiente. Para esto se abre la válvula de alimentación (si es que no está operando) y se revisa visualmente la descarga de pulpa del *underflow*. Una vez hecha la revisión de todos los ciclones se envía un informe al área de Planificación, para que así se programen los recursos necesarios para cambiar o reparar por oportunidad los equipos declarados con problemas.

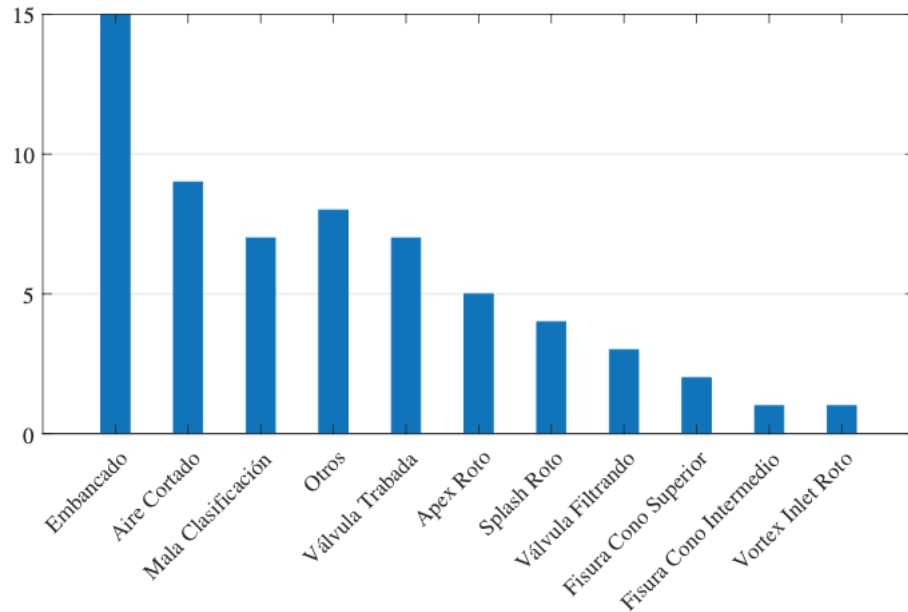
Las baterías de ciclones están siempre operando, por lo que las únicas veces que se realiza una inspección interna, donde puede evaluarse el desgaste de manera visual del revestimiento, es cuando hay una detención de planta o se bloquea un solo ciclón para desarmarlo por la parte superior.

Los hallazgos comúnmente detectados en las inspecciones se muestran en el siguiente capítulo.

### 2.4.1.3. Fallas Comunes y Mantenimiento de Componentes.

A partir de un consolidado de fallas según inspecciones hechas entre marzo y agosto 2018 se genera el siguiente gráfico de barras.

**Gráfico N° 2.1: hallazgos y fallas comunes registradas durante inspección en ciclones.**



Fuente: Minera Ojos del Salado.

Las fallas más comunes que implican el reemplazo o desarme del equipo son el embancamiento (primera barra) y una mala clasificación (tercera barra). Estas requerirán la programación de recursos materiales y humanos para mejorar la condición encontrada en el ciclón. En la categoría “Otros” se encuentran fallas que no requieren el cambio de ciclón, como por ejemplo roturas en ductos alimentación, señales erróneas de instrumentación o filtración por flanges.

Al revisar el equipo, para el caso de embancamiento, se encuentra:

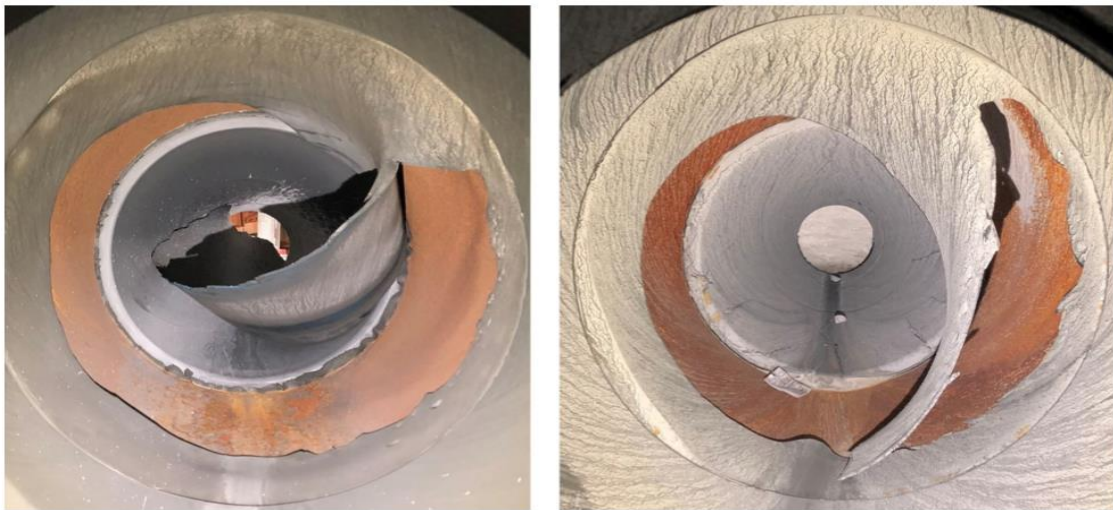
- Desprendimiento del revestimiento en las secciones cónicas.
- Roturas en el apex.
- Elementos externos obstruyendo el apex como placas de acero, madera, carpetas plásticas y gomas de revestimientos de otros equipos de la planta.

Para el caso de la mala clasificación, se encuentra:

- Roturas en el revestimiento.
- Resaltes negativos.

Respecto a los mantenimientos semanales, se enfocan en cambios de ciclones y ductos de descarga y/o alimentación, mientras que en las mantenciones con planta detenida (*shutdown*) se enfocan en cambios de manifold, de válvulas de alimentación y de ductos entre estos dos últimos. Las reparaciones que se le hacen por parte del proveedor al ciclón son básicamente el cambio completo del revestimiento, cambio de *apex* y pintado de la carcasa.

**Figura N° 2.16 Desprendimiento de revestimientos en conos intermedios.**



Fuente: Minera Ojos del Salado.

**Figura N° 2.17: Obstrucción de apex por placa metálica externa.**



Fuente: Minera Ojos del Salado.

**Figura N° 2.18: Obstrucción de apex por carpetas plásticas externas.**



Fuente: Minera Ojos del Salado.

**Figura N° 2.19: Ciclón en condiciones de embancamiento.**



Fuente: Minera Ojos del Salado.

#### 2.4.1.4. Recursos para el Mantenimiento de Ciclones.

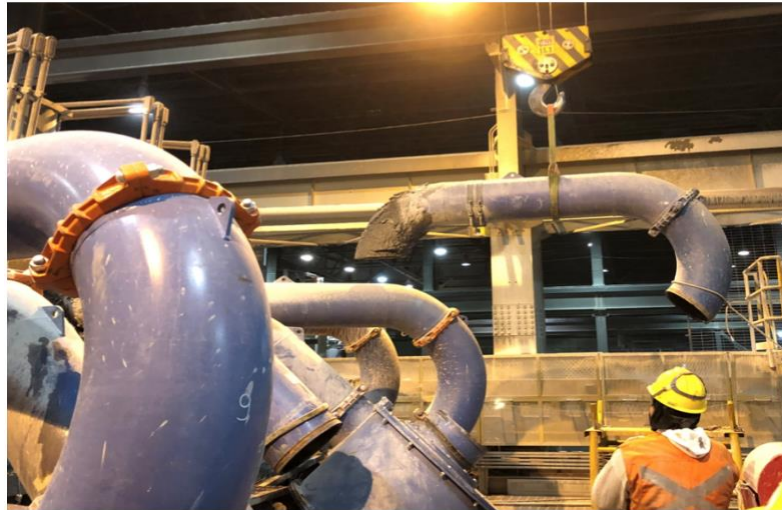
La planificación para el mantenimiento de la batería implica, en general, considerar los siguientes recursos humanos:

- 2 Maestros mecánicos.
- 1 Rigger mecánico.
- 1 Operador puente grúa.
- 1 Capataz .
- 1 Supervisor.
- 2 Maestros andamieros.

Como recursos materiales se requiere:

- Ciclones nuevos para cambio.
- Ductos de alimentación u *overflow*.
- Válvulas neumáticas.
- Manifold.
- Herramientas, pernos y accesorios.

**Figura N° 2.20: Personal de empresa colabora en manobra de izaje para el cambio de un ciclón.**



Fuente: Minera Ojos del Salado.

#### 2.4.1.5. Horómetro.

Un horómetro es, básicamente, un instrumento para medir el tiempo. Para este estudio, un horómetro es un instrumento virtual confeccionado convenientemente a partir de la

información captada por diferentes sensores presentes en equipos que no miden necesariamente tiempo. Generalmente, estos dispositivos virtuales cuentan con una interfaz gráfica, o de lo contrario, uno debe solicitarlos por medio de plantillas de cálculo como *Excel*. El horómetro creado o por generar, dependerá de la interpretación o provecho que un usuario otorgue a los datos que disponen los sensores en terreno. Es de vital importancia contar con un registro de tiempos de operación, para así evaluar comportamientos y tendencias operacionales, que permitan mejorar los planes de mantenimiento a los equipos.

Previo al inicio de este proyecto de título, no existían horómetros para los hidrociclones u otro método que indique el tiempo que llevan operando, pero durante el desarrollo, se intentó instaurar uno por parte del área de Planificación de la Gestión del Mantenimiento el cual se dejó de utilizar al poco tiempo ya que no era preciso y estaba mal confeccionado.

## **CAPÍTULO III**

### **ANÁLISIS DE FALLA, CRITICIDAD Y CONFIABILIDAD**

#### **3.1. Introducción.**

En el presente proyecto de título, el equipo al cual se realizará el plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) es un Molino de Bolas, el cual realiza operaciones de molienda y conminución de mineral en la compañía Minera Ojos del Salado.

En primera instancia se realizará una descripción del equipo, el funcionamiento que éste tiene y los componentes principales que lo conforman. Posteriormente, se realizará un análisis FMECA y también se utilizarán los datos del historial de fallas del molino para realizar análisis de priorización como Pareto y Jack Knife, para poder determinar los componentes críticos del molino de bolas. Finalmente, se desarrollará el modelo de confiabilidad de Weibull a los componentes críticos seleccionados, con el fin de obtener parámetros como la confiabilidad, tasa de fallas y el MTBF, los cuales serán utilizados en el desarrollo del plan de mantenimiento. La explicación del software se encuentra en el Anexo A.

#### **3.2. Alcances.**

El Molino de bolas es un equipo, el cual no contaba con manuales y recomendaciones del fabricante para su correcta operación. Por otro lado, tampoco contaba con una hoja de vida, por lo que se buscaron datos de otro molino de bolas análogo en temas constructivos, dimensionales y operacionales. El equipo al cual corresponden los datos es un molino Dominion de dimensiones de diámetro y largo, respectivamente. Además, cuenta con un sistema de transmisión piñón-corona y con un sistema de reducción giro lento, al igual que en compañía Minera Ojos del Salado.

El molino pertenece a la empresa ubicada en la ciudad de Copiapó, localizada en la provincia de Copiapó, Región de Atacama, Chile.

Entonces, es con la hoja de vida de éste equipo que se realizarán los análisis mencionados, pues debido a las semejanzas señaladas anteriormente se supone que el comportamiento, esfuerzos y eventuales fallas de este equipo, serán similares a las del Molino de la Compañía. Además, es importante mencionar que ambos molinos procesan el mismo tipo de mineral, por lo que el comportamiento se asemeja aún más.

Por otro lado, se realizó un desglose del equipo en sistemas, sub-sistemas y componentes. Posteriormente, de la hoja de vida del molino, se tomaron las fallas, fechas de ocurrencia y tipos de mantenimiento; para luego asociar esos datos con las divisiones hechas al Molino.

El desglose del equipo en sistemas, sub-sistemas y componentes se encuentra en el Anexo B.

### **3.3. Descripción del Equipo.**

Actualmente hay dos molinos operando de forma continua (E y G). Pese a esto, la ocurrencia de una falla y posterior detención del Molino de Bolas, provocará que la meta de producción no pueda ser alcanzada; por un lado, el molino principal procesa aproximadamente el del mineral de sulfuro<sup>1</sup> y, por otro lado, el Molino E no tiene la capacidad para mantener funcionando la planta concentradora por sí solo. Entonces, es de suma urgencia mantener el Molino G en operación.

El funcionamiento del Molino G consta de 9 sistemas básicos:

1. Manto Cilíndrico: Cumple la función de contener y mover el mineral con las bolas que están encargadas de la conminución del mineral.
2. Piñón-Corona: El Piñón se encarga de transmitir el movimiento rotatorio a la Corona, con el fin de transmitir el movimiento rotatorio al Manto Cilíndrico.
3. Giro lento: Permite que el equipo pueda partir de una manera más suave, a través de un Inching Drive.
4. Lubricación: Se encarga de proveer de lubricante al equipo.
5. Motriz: Transforma la energía eléctrica en energía mecánica, con el fin de entregar el torque necesario para mover el equipo.
6. Descansos Molino Alimentación-Descarga: Cumple la función de sostener el Manto Cilíndrico y la carga contenida en este.
7. Embrague: Encargado de acoplar el conjunto Motriz con el conjunto Piñón-Corona para transmitir movimiento rotatorio.
8. Alimentación: Permite la entrada de carga al equipo.
9. Descarga: Permite la salida de la carga del equipo.

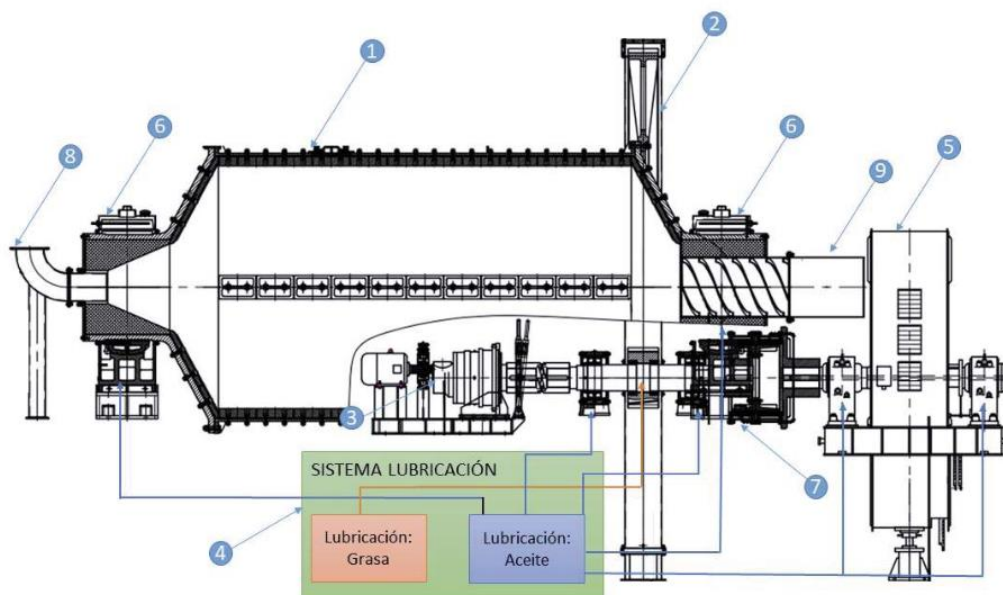
---

<sup>1</sup> Información entregada por el Depto. De Mantenimiento.

### 3.3.1. Identificación de los Sistemas Básicos Molino G.

En la figura N° 3.1 se muestra un diagrama del molino de bolas G de la compañía Minera Ojos del Salado. La numeración corresponde a los sistemas antes descritos.

**Figura N° 3.1: Identificación de sistemas básicos molino G.**



Fuente: Elaboración propia.

### 3.4. Condiciones de Operación del Molino G.

Según información entregada por el Departamento de Operaciones de Plantas de Proceso y Relaves, la capacidad nominal del equipo es de 67 (ton/hr) , pero regularmente opera dentro de un rango de carga que va desde las 50 a 55 (ton/hr) . Además, el molino se encarga de realizar actividades de conminución de mineral durante las 24 horas del día y en ocasiones se detiene solamente para actividades ligadas a mantenciones correctivas.

El equipo lleva en funcionamiento aproximadamente seis meses y aunque suele operar dentro del rango de carga mencionado anteriormente, ha habido ocasiones en que el flujo es mayor y se han presentado incidentes como: fallas internas en los revestimientos, levantadores/lifters, corte de pernos, fuga de material, desgaste en los descansos, problemas en la lubricación, etc.

**Tabla N° 3.1: Características principales del equipo.**

Marca	Molino de bolas
Modelo	QMJ

Peso	170 [ton]
Largo	5,5 [m]
Diámetro exterior	3,5 [m]
Capacidad máxima de diseño	67 [ton/hr]
Motor	Trifásico síncronico
Modelo motor	TMDK1250-406
Potencia	1250 [kW]

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5. Condiciones de Mantenimiento del Molino G.

Según el Departamento de Mantenimiento el equipo no cuenta con ningún plan de mantenimiento programado, ni tampoco con recomendaciones y manuales otorgados por el fabricante.

En la tabla N° 3.2 se muestran los componentes que frecuentemente se les aplica un mantenimiento correctivo y el tipo de falla correspondiente, tomando en consideración los seis meses que lleva operando. Esta frecuencia de cambio actual se obtuvo de los escasos registros del molino de bolas de compañía Minera Ojos del Salado.

**Tabla N° 3.2: Frecuencia de cambio actual molino G.**

Tipo de Mantenimiento	Componente	Motivo de cambio
Mantenimiento correctivo	Cambio de aceite de lubricación	Contaminación
	Cambio de bomba de levante	Desgaste de Componentes
	Cambio de spout/boquilla alimentación	Desgaste excesivo
	Cambio de bomba de lubricación	Desgaste de componentes
	Cambio de filtros de lubricación	Desgaste excesivo
	Cambio de descansos alimentación descarga	Desgaste excesivo
	Cambio sello dinámico	Desgaste excesivo

	alimentación	
	Reparación cajón de alimentación	Desgaste y rotura
	Reparación cajón de descarga	Desgaste y rotura

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la frecuencia de cambio correctiva de los componentes del molino de bolas, la cual se muestra en la tabla N° 3.3, se obtuvo de la hoja de vida del molino, la cual tiene data del 22 de enero del 2013 al 31 de diciembre del 2019.

**Tabla N° 3.3: Frecuencia de cambio actual molino.**

<b>Tipo de Mantenimiento</b>	<b>Componente</b>	<b>Motivo de cambio</b>
Mantenimiento correctivo	Cambio de revestimiento manto	Desgaste excesivo
	Cambio piñón	Quiebre/ desgaste excesivo de dientes
	Cambio inching drive	Rotura de componentes
	Cambio motor eléctrico	Rotura de componentes
	Cambio de aceite de lubricación	Contaminación
	Cambio bomba de levante	Desgaste componentes
	Cambio tuberías sistema de lubricación	Contaminación/tapada
	Cambo grasa de lubricación	Contaminación
	Cambio de rodamientos motor electrico	Desgaste excesivo
	Falla retén bomba de lubricación	Desgaste excesivo
	Cambio bomba de	Desgaste componentes

	lubricación	
	Cambio de filtros de lubricación	Desgaste componentes
	Cambio descansos alim/dcrg	Desgaste componentes
	Cambio sello dinámico alimentación	Desgaste componentes
	Cambio sello estático alimentación	Desgaste componentes
	Cambio sello estático alimentación	Desgaste componentes
	Cambio spout/boquilla alimentación	Desgaste componentes
	Reparación caja de alimentación	Desgaste componentes
	Cambio parrillas de descarga	Desgaste componentes
	Cambio de pernos de descarga	Corte, corrosión e inicio grieta
	Reparación cajón de descarga	Desgaste y rotura

Fuente: Elaboración propia.

De las tablas N° 3.2 y 3.3 podemos ver que el cambio correctivo de componentes entre empresas es similar, a pesar del corto tiempo que lleva operando el molino de la compañía Minera Ojos del Salado.

Es importante dejar en claro que se realizarán los análisis posteriores con la frecuencia de cambio correctiva. Por otro lado, debido a que los tipos de falla no están bien categorizados, pues no explican en detalle lo que realmente ocurrió con el componente, se tomará la consideración de llamar a los modos de falla como ***Modos Intervención Correctivo o Modo Correctivo*** de aquí en adelante.

### 3.6. Análisis de Falla y Criticidad del Equipo.

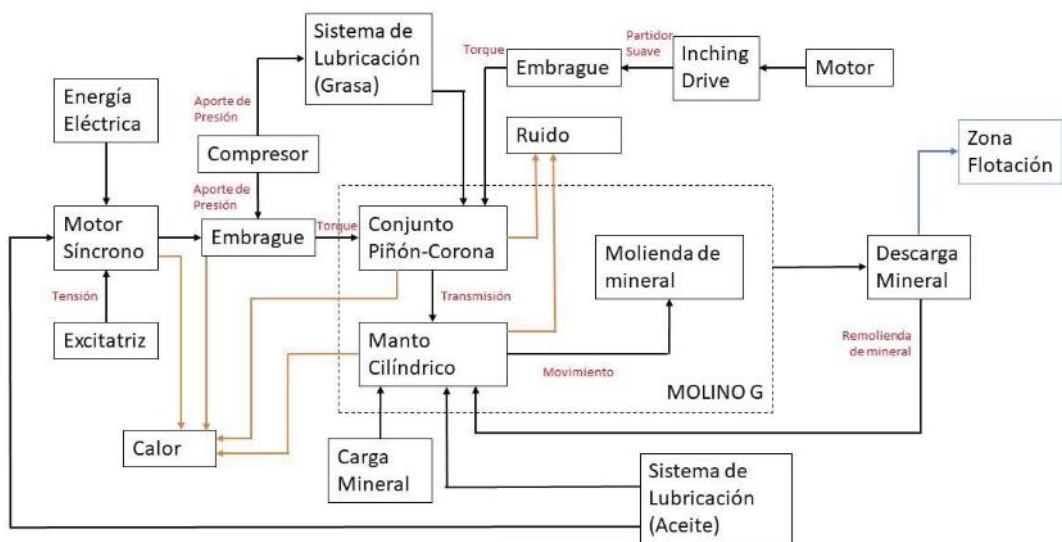
A continuación, se llevará a cabo el análisis de falla y criticidad al Molino de Bolas G para determinar los componentes críticos del equipo. Posteriormente, a los componentes seleccionados, se les aplicará el modelo de confiabilidad de Weibull.

#### 3.6.1. Diagrama Funcional de Bloques.

En la figura N° 3.2 se muestra el diagrama funcional de bloques del Molino de Bolas G, en el cual se puede apreciar la división de alguno de los principales sistemas del equipo (mencionados anteriormente), además se muestran sus funciones y su interacción con el medio. Por otro lado, cualquier flecha que se vea interrumpida implica una eventual falla en el equipo.

Este diagrama se realizó con el fin de obtener un mayor conocimiento del equipo, las funciones de los distintos sistemas y componentes.

**Figura N° 3.2: Diagrama funcional de bloques Molino G**



Fuente: Elaboración propia.

#### 3.6.2. Análisis FMECA de Sistema Básicos Molino G.

En el siguiente apartado se llevará a cabo el análisis FMECA, el cual abarcará los 9 sistemas que conforman al molino de bolas. Además, para la correcta construcción del análisis se consultó con mecánicos, operadores y jefes de área de la Compañía.

Se tomará como base el modelo cualitativo, el cual busca identificar todas las posibles fallas de componentes que generen una detención del equipo, las consecuencias que traen tanto a nivel local como a nivel superior, la criticidad de las consecuencias, cómo es

posible detectar estas fallas y, finalmente, qué acciones correctivas pueden tomarse contra la falla.

Este análisis sólo se llevará a cabo para identificar las fallas que provocan la detención del equipo, para la construcción de árboles de falla y la preparación de acciones preventivas. No se utilizará como un medio de priorización para los análisis de criticidad.

Los FMECA de cada uno de los sistemas se encuentra en el Anexo C.

### **3.6.3. Análisis de Costo Global de Mantenimiento.**

Como se ha dicho anteriormente, compañía Minera Ojos del Salado no cuenta con un plan de mantenimiento para el equipo en cuestión y, a nivel empresa, resulta altamente crítico en temas productivos y económicos. Entonces, según lo mencionado y debido a que una de las principales tareas de los administradores del área de mantenimiento es minimizar los costos de mantención, como medida inicial se realizará un Análisis de Costo Global de Mantenimiento según los Modos Correctivos descritos en el historial. Posteriormente, los resultados obtenidos se utilizarán para el desarrollo de otros análisis.

**Cálculo Costo Global de Mantenimiento:** Se define según la siguiente ecuación,

$$CGM = C_{inter} + C_{fallas} + C_{atmac} + C_{s-i} \text{ (Ec.1)}$$

Para el cálculo del costo global de mantenimiento se tomarán las siguientes consideraciones,

- La bodega de la empresa solo cumple la función de gestionar órdenes de compra y de informar al área de mantenimiento que los equipos requeridos para la reparación ya se encuentran en faena. Por lo tanto, el Costo de Almacenamiento será reemplazado por el Costo de Gestión de Compra.
- No se tomará en cuenta el costo de sobre-inversión debido a que no se está evaluando la opción de adquirir un nuevo equipo que reemplace al Molino de Bolas G, el cual, a futuro, minimice los costos globales de mantención.

Entonces,

$$CGM = C_{inter} + C_{fallas} + C_{gestión compra}$$

### **Cálculo Costo de Intervención.**

$$C_{inter} = C_{mano obra} + C_{repuestos} + C_{fungible}$$

Para el cálculo del de intervención se tomaron las siguientes consideraciones:

- En el caso de compañía Minera Ojos del Salado el costo de intervención incluye solo los gastos asociados a mantenciones correctivas, pues no cuentan con programas preventivos.
- La información respecto a los costos de repuestos fue obtenida a partir de las cotizaciones realizadas por el área de mantenimiento.
- Para el costo de los repuestos se considerará solo el costo técnico, es decir, solo el valor de la compra de la pieza al día de su utilización.
- Para el costo de hora-hombre se tomará en cuenta solo el personal mecánico de la empresa, pues solo en ocasiones fortuitas se requiere de personal externo.
- Para poder realizar el cálculo de costo de mano de obra se tuvo que obtener información del costo hora-hombre promedio del personal mecánico de la empresa, el cual equivale a 8,8 (USD/HH). Esta información fue otorgada por el jefe del área de Recursos Humanos de la compañía.
- El costo de material fungible (electrodos de soldadura, discos de corte, llaves, silicona, empaquetaduras, entre otros) se despreciará debido a la magnitud de este frente a los demás costos.

Entonces,

$$C_{inter} = C_{mano\ obra} + C_{repuestos}$$

**Cálculo Costo de Falla:** Para el cálculo de costo de falla se tomará como escenario que el volumen perdido de producción no podrá ser recuperado (Pascual, 2005). Además, se tomará en cuenta la siguiente consideración,

- Para el costo de falla se considerarán solo los ingresos no percibidos producto de la detención del equipo. No se tomarán en cuenta los costos no percibidos de materias primas y productos no utilizados durante el tiempo en que la producción estuvo detenida, debido a la magnitud que tienen estos respecto a los costos generados por no producción. De esta forma, también, se está en un escenario mucho más conservador.

Entonces, con el jefe del área de Operaciones de Plantas de Proceso y Relaves se obtuvo el flujo de mineral y las toneladas de cobre fino y plata que ingresan al molino por hora de operación.

Además, se obtuvo la recuperación porcentual que se obtiene en el área de Flotación para el cobre, y gracias a la información otorgada se pudo obtener lo siguiente:

El flujo de mineral total que ingresa al Molino de Bolas G y al Molino de Bolas E es alrededor de 73 (ton/hr), el cual contiene 0,73 (tonCu) aproximadamente. Y la recuperación en la zona de Flotación es del orden del 74%.

Entonces, el flujo de cobre fino que entra al molino es:

$$Flujo\ Cu_{fino} = 0,73 \left[ \frac{tonCu}{hr} \right]$$

Y considerando la recuperación de 74%, tenemos que el flujo de cobre fino que sale del molino es de:

$$Flujo\ Cu_{fino} = 0,73 * 0,74 = 0,54 \left[ \frac{tonCu}{hr} \right]$$

Por otro lado, considerando el valor de la libra de cobre, tenemos que el ingreso no percibido por hora detenida es:

$$Valor\ Libra\ cobre = 3,085 \left[ \frac{USD}{lb} \right]$$

$$Valor\ Tonelada\ cobre = 3,085 \left[ \frac{USD}{lb} \right] * \left[ \frac{lb}{0,0005\ ton} \right] = 6.170 \left[ \frac{USD}{ton} \right]$$

$$Costo\ horas\ detenidas = 6.170 \left[ \frac{USD}{ton} \right] * 0,54 \left[ \frac{ton\ Cu}{hr} \right] = 3.338 \left[ \frac{USD}{hr} \right]$$

Además, por información obtenida del área de operaciones, se sabe que hay 33 (gr Ag/ton) y que la recuperación porcentual se encuentra en el orden del .

Entonces, la cantidad de plata que se recupera es:

$$Cantidad\ Ag = 73 \left[ \frac{ton}{hr} \right] * 33 \left[ \frac{gr\ Ag}{ton} \right] * 0,6 = 1.445 \left[ \frac{gr\ Ag}{hr} \right]$$

$$Cantidad\ Ag = 1.445 \left[ \frac{gr\ Ag}{hr} \right] = 51 \left[ \frac{oz\ Ag}{hr} \right]$$

Considerando el valor de la onza de plata, tenemos que el ingreso no percibido por hora detenida es:

$$Costo\ hora\ detenida2 = 51 \left[ \frac{oz\ Ag}{hr} \right] * 16,3 \left[ \frac{USD}{ozAg} \right] = 831 \left[ \frac{USD}{hr} \right]$$

Entonces, se procede al cálculo del costo de falla:

$$C_{falla} = Costo_{hora\ detenida} + Costo_{hora\ detenida\ 2}$$
$$C_{falla} = 3.338\left[\frac{USD}{hr}\right] + 831\left[\frac{USD}{hr}\right] = 4.169\left[\frac{USD}{hr}\right]$$

Por lo tanto, el costo de falla asociado a la no producción es de , el cual es causado por la detención del Molino de Bolas G producto de una falla y la detención del Molino E debido a que por sí solo no puede mantener la planta concentradora operativa.

**Cálculo Costo Gestión de Compra:** Para el cálculo del costo de gestión de compra se tomará en cuenta el costo de transporte, de urgencia, de seguros, de elevación (contratación de grúas y plumas), el de la hora-hombre comprador y el de la energía consumida por el departamento.

$$C_{gestión\ compra} = C_{transp.} + C_{urgencia} + C_{elev.} + C_{Mano\ obra\ comprador} + C_{Energía} \quad (Ec.2)$$

- Para el costo de transporte se tomó el promedio entre el costo de transporte externo e interno, y se obtuvo un valor de 211 USD.
- El costo de seguros no se tomará en cuenta por sí solo, pues éste viene incluido en el costo de transporte.
- El costo de urgencia se considerará solo para aquellas intervenciones que involucran procesos de mecanizado y fabricación, aplicándoseles un factor de urgencia de aproximadamente el valor del costo del repuesto. Por lo tanto, solo se aplicará costo de urgencia al piñón, descansos y boquilla alimentación, el resto de componentes se encuentran fabricados y listos para ser despachados, a excepción de los revestimientos y parrillas de descarga los cuales deben mantener estrictamente su tiempo de fabricación para obtener las propiedades mecánicas óptimas del caucho.
- El costo de elevación solo se aplicará para algunos modos correctivos (los de más tonelaje: descansos, piñón, inching drive y motor eléctrico del inching drive), para el resto de los modos solo se utilizará fuerza humana o maquinaria que pertenezca a la empresa. El costo de grúa tiene un valor 1.875 USD del costo de pluma es de

938 USD; dependiendo del tonelaje y la distancia a la que debe moverse el componente, varía la utilización entre grúa o pluma.

- Para poder realizar el cálculo de costo de mano de obra del comprador se tuvo que obtener información del costo hora-hombre promedio del personal del departamento de mantención encargado de gestionar las compras, el cual equivale a 8,8 (USD/HH) ; información otorgada por el jefe del área de Recursos Humanos de la compañía. Por otro lado, el tiempo que se demora en gestionar la compra es de aproximadamente .
- Para el costo de energía del departamento de mantención se tomará un consumo de energía de 2,2 [kWh] a un precio de 0,1 (USD/kwh)

**A considerar:** Una orden de compra de un componente que no presenta urgencia, normalmente demora 15 días en ser aprobada. Por el contrario, cuando es de urgencia, puede aprobarse en 5 días o bien, dependiendo del caso, de forma inmediata.

Finalmente, para poder realizar el Análisis de Costo Global de Mantenimiento se tomaron las siguientes consideraciones generales:

- Los datos vienen de la hoja de vida del molino. Su historial de falla data del 22 de enero del 2013 hasta el 31 de diciembre del 2019.
- Se consideraron solo las detenciones por temas correctivos.
- Se tomará el valor del dólar como (Sin variaciones), correspondiente al día 31 de diciembre del 2019. Valor obtenido del Servicio de Impuestos Internos (SII).  
El Molino de Bolas G procesa y el Molino de Bolas E procesa , ambos de forma continua.

Se tomará el valor de la libra de cobre como (Sin variaciones), correspondiente al día 31 de diciembre del 2019. Valor obtenido de la Bolsa de Metales.

Se tomará el valor de la onza de plata como (Sin variaciones), correspondiente al día 31 de diciembre del 2019. Valor obtenido de la Bolsa de Metales.

Entonces, para las fallas ocurridas entre el 22 de enero del 2013 hasta el 31 de diciembre del 2019 y, tomando en cuenta las consideraciones anteriores, se obtiene la tabla N° 3.3.

**Tabla N° 3.4: Análisis de costo global de mantenimiento.**

Modo Correctivo	Hrs. Detención	Cant. Fallas	N° Trab.	Costo Rep.	Costo Int.	Costo Falla	Costos (KUSD)		CGM
							Costo Gestión	Costo Compra	
Cambio de Revestimientos Manto	10	3	4	12	12,35	42	0,2		54
Cambio Piñón	324	2	4	31,3	32,57	1351	16,2		1400
Cambio de Inching Drive	10	1	4	11	11,14	42	1,2		54
Cambio Motor Eléctrico	10	2	4	1,25	1,39	42	1,2		44
Cambio de Aceite de Lubricación	12	3	4	2,3	2,51	50	0,2		53
Cambio Bomba de Levante	12	4	4	1,4	1,51	50	0,2		52
Cambio Tuberías Sist. Lubricación	12	1	4	2	2,21	50	0,2		52
Cambio Grasa de Lubricación	5	2	4	1,5	1,85	21	0,2		23
Cambio de Rod. Motor Eléctrico	5	1	4	0,032	0,17	21	0,2		21
Falla Retén Bomba de Lubricación	5	1	4	0,01	0,12	21	0,2		21
Cambio Bomba de Lubricación	12	7	4	1,6	1,71	50	0,2		52
Cambio de Filtros de Lubricación	12	3	4	0,14	0,18	50	0,2		50
Cambio de Descansos Alimentación-Descarga	168	2	4	44	44,84	700	21,9		767
Cambio Sello Dinámico Alim.	5	2	4	0,36	0,50	21	0,2		22
Cambio Sello Estático Alim.	5	3	4	0,06	0,20	21	0,2		21
Cambio Boquilla Alimentación	12	3	4	0,9	1,04	50	0,6		52
Reparación Cajón de Alimentación	2	3	4	0,5	0,57	8	0,2		9
Cambio de Parrillas Descarga	12	4	4	4	4,39	50	0,2		55
Cambio de Pernos Descarga	6	3	4	4	4,21	25	0,2		29
Reparación Cajón de Descarga	2	10	4	0,8	0,87	8	0,2		9

Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que las horas de detención son aproximaciones en base a la experiencia entregadas por parte del personal de la compañía y el número de trabajadores corresponde al personal mecánico que actualmente tiene la empresa.

#### 3.6.4. Análisis de Pareto a los Modos Correctivos.

Utilizando los datos de la tabla N° 3.4 se realizarán tres diagramas de Pareto (horas detención, N° detenciones), con los cuales se podrá determinar el o los componentes críticos del equipo.

A continuación, en la tabla N° 3.5, se muestran los datos correspondientes al Análisis de Pareto según CGM.

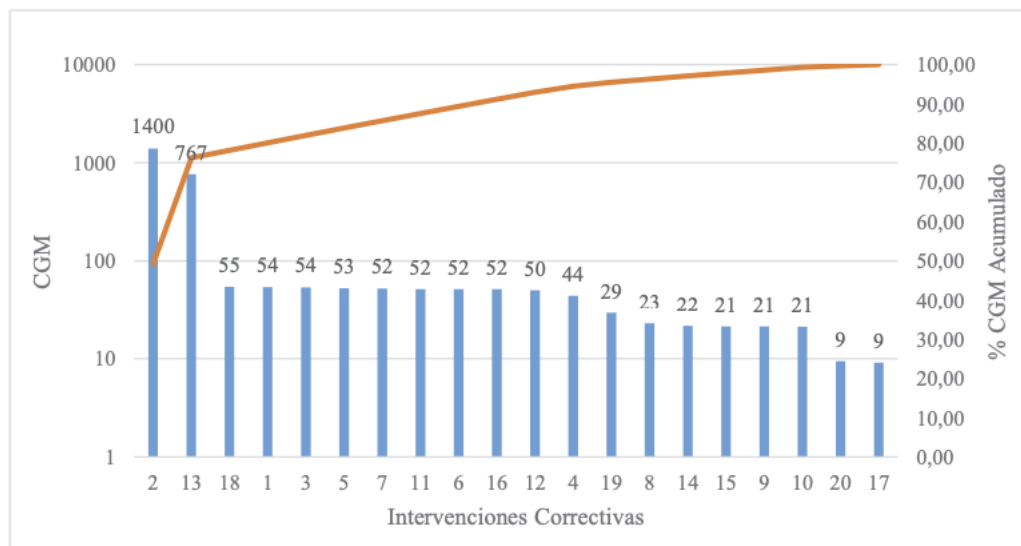
**Tabla N° 3.5: Análisis de Pareto CGM a modos correctivos.**

Modo Correctivo	N°	CGM	%CGM	%CGM Acumulado
Cambio Piñón	2	1400	49,25	49,25
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	13	767	27,00	76,25
Cambio de Parrillas Descarga	18	55	1,92	78,18
Cambio de Revestimientos Manto	1	54	1,91	80,09
Cambio de Inching Drive	3	54	1,90	81,99
Cambio de Aceite de Lubricación	5	53	1,86	83,85
Cambio Tuberías Sist. Lubricación	7	52	1,85	85,69
Cambio Bomba de Lubricación	11	52	1,83	87,52
Cambio Bomba de Levante	6	52	1,82	89,34
Cambio Boquilla Alimentación	16	52	1,82	91,16
Cambio de Filtros de Lubricación	12	50	1,78	92,94
Cambio Motor Eléctrico	4	44	1,56	94,50
Cambio de Pernos Descarga	19	29	1,04	95,53
Cambio Grasa de Lubricación	8	23	0,81	96,34
Cambio Sello Dinámico Alimentación	14	22	0,76	97,10
Cambio Sello Estático Alimentación	15	21	0,75	97,85
Cambio Rod. Motor Eléctrico	9	21	0,75	98,60
Falla Retén Bomba de Lubricación	10	21	0,75	99,35
Reparación Cajón de Descarga	20	9	0,33	99,68
Reparación Cajón de Alimentación	17	9	0,32	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando la tabla anterior, se obtiene el diagrama mostrado en el gráfico N° 3.1.

**Gráfico N° 3.1: Diagrama de Pareto CGM.**



Fuente: Elaboración propia.

Para la construcción del gráfico se toma la siguiente consideración: para el eje vertical se graficará el CGM en escala logarítmica, debido a que existe una gran diferencia entre los costos y habían modos correctivos que no se lograban apreciar en el diagrama. Entonces, según el diagrama, podemos ver que los principales Modos Correctivos que generan el de los CGM son:

- Cambio de piñón.
- Cambio de descansos alimentación-descarga.
- Cambio parrillas de descarga.
- Cambio revestimientos manto.

A continuación, en la tabla N° 3.6, se muestran los datos correspondientes al análisis de Pareto según Horas Detención.

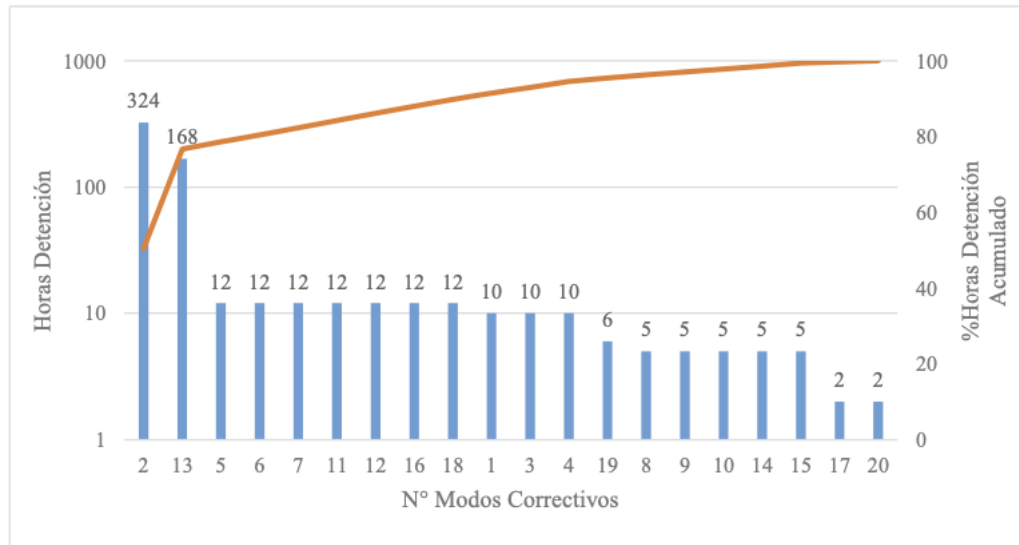
**Tabla N° 3.6: Análisis de Pareto horas detención a modos correctivos.**

Modo Correctivo	N°	Hrs. Detención	%Hrs. Detención	%Hrs. Detención Acumulado
Cambio Piñón	2	324	50,55	50,55
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	13	168	26,21	76,76
Cambio de Aceite de Lubricación	5	12	1,87	78,63
Cambio Bomba de Levante	6	12	1,87	80,50
Cambio Tuberías Sist. Lubricación	7	12	1,87	82,37
Cambio Bomba de Lubricación	11	12	1,87	84,24
Cambio de Filtros de Lubricación	12	12	1,87	86,12
Cambio Boquilla Alimentación	16	12	1,87	87,99
Cambio de Parrillas Descarga	18	12	1,87	89,86
Cambio de Revestimientos Manto	1	10	1,56	91,42
Cambio de Inching Drive	3	10	1,56	92,98
Cambio Motor Eléctrico	4	10	1,56	94,54
Cambio de Pernos Descarga	19	6	0,94	95,48
Cambio Grasa de Lubricación	8	5	0,78	96,26
Cambio Rod. Motor Eléctrico	9	5	0,78	97,04
Falla Retén Bomba de Lubricación	10	5	0,78	97,82
Cambio Sello Dinámico Alimentación	14	5	0,78	98,60
Cambio Sello Estático Alimentación	15	5	0,78	99,38
Reparación Cajón de Alimentación	17	2	0,31	99,69
Reparación Cajón de Descarga	20	2	0,31	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Graficando los datos obtenidos en la tabla N° 3.6, se obtiene el diagrama mostrado en el gráfico N° 3.2.

**Gráfico N° 3.2: Diagrama de Pareto horas Detención.**



Fuente: Elaboración propia.

Para la construcción del diagrama se toma la siguiente consideración: para el eje vertical se graficarán las Horas Detención en escala logarítmica, debido a que existe una gran diferencia entre ellas y habían modos correctivos que no se lograban apreciar en el diagrama.

Entonces, en el gráfico N° 3.6, podemos ver que los principales Modos Correctivos que generan el de las Horas de Detención son:

- Cambio Piñón.
- Cambio Descansos Alimentación-Descarga.
- Cambio de Aceite de Lubricación.
- Cambio de Bomba de Levante.

A continuación, en la tabla N° 3.7, se muestran los datos correspondientes al análisis de Pareto, según N° de detenciones.

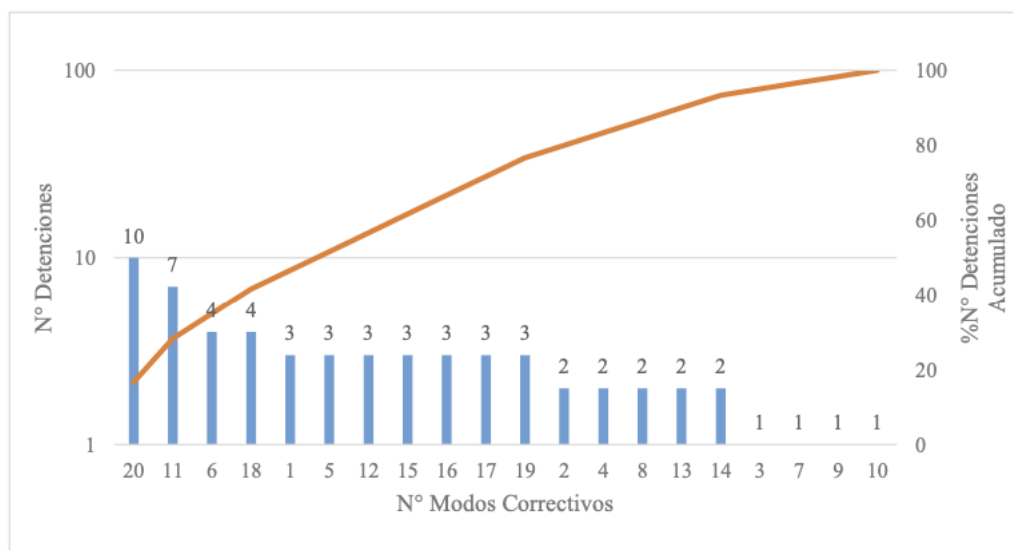
**Tabla N° 3.7: Análisis de Pareto según N° de detenciones.**

Modo Correctivo	N°	N° Detenciones	%N° Detenciones	%N° Detenciones Acumulado
Reparación Cajón de Descarga	20	10	16,7	16,7
Cambio Bomba de Lubricación	11	7	11,7	28,3
Cambio Bomba de Levante	6	4	6,7	35,0
Cambio de Parrillas Descarga	18	4	6,7	41,7
Cambio de Revestimientos Manto	1	3	5,0	46,7
Cambio de Aceite de Lubricación	5	3	5,0	51,7
Cambio de Filtros de Lubricación	12	3	5,0	56,7
Cambio Sello Estático Alimentación	15	3	5,0	61,7
Cambio Boquilla Alimentación	16	3	5,0	66,7
Reparación Cajón de Alimentación	17	3	5,0	71,7
Cambio de Pernos Descarga	19	3	5,0	76,7
Cambio Piñón	2	2	3,3	80,0
Cambio Motor Eléctrico	4	2	3,3	83,3
Cambio Grasa de Lubricación	8	2	3,3	86,7
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	13	2	3,3	90,0
Cambio Sello Dinámico Alimentación	14	2	3,3	93,3
Cambio de Inching Drive	3	1	1,7	95,0
Cambio Tuberías Sist. Lubricación	7	1	1,7	96,7
Cambio Rod. Motor Eléctrico	9	1	1,7	98,3
Falla Retén Bomba de Lubricación	10	1	1,7	100,0

Fuente: Elaboración propia.

Graficando los datos obtenidos en la tabla N° 3.7, se obtiene el diagrama mostrado en el gráfico N° 3.3.

**Gráfico N° 3.3: Diagrama de Pareto número de Detenciones.**



Fuente: Elaboración propia.

Para la construcción del diagrama se toma la siguiente consideración: para el eje vertical se graficará el N° Detenciones en escala logarítmica. Esto, debido a que existe una gran diferencia entre ellos y había modos correctivos que no se lograban apreciar en el diagrama.

Entonces, según el diagrama, podemos ver que los principales Modos Correctivos que generan el de las detenciones son:

- Reparación Cajón de Descarga.
- Cambio Bomba de Lubricación.
- Cambio Bomba de Levante.
- Cambio de Parrillas Descarga.
- Cambio de Revestimientos Manto.
- Cambio de Aceite de Lubricación.
- Cambio de Filtros de Lubricación.
- Cambio de Sello Estático.
- Alimentación.
- Cambio Boquilla Alimentación.
- Reparación Cajón de Alimentación.
- Cambio de Pernos Descarga.

### **3.6.5. Análisis de Jack Knife a los Modos Correctivos.**

Para la realización del diagrama de Jack Knife se considerarán los modos correctivos, la cantidad de fallas, la frecuencia de fallas, las horas en que el equipo estuvo detenido hasta su reparación (MTTR), el TFS y la indisponibilidad del equipo (D).

A continuación, en la tabla N° 3.8, se muestran los datos necesarios para realizar el análisis de Jack Knife,

**Tabla N °3.8: Análisis de Jack Knife a modos correctivos.**

Modos Correctivo	N°	Cant. Fallas	Frecuencia Falla (1/Periodo)	MTTR (hr)	TFS (Periodo)	D
Cambio de Revestimientos Manto	1	3	0,6	10	0,0002	0,0001
Cambio Piñón	2	2	0,4	324	0,0075	0,0030
Cambio de Inching Drive	3	1	0,2	10	0,0002	0,0000
Cambio Motor Eléctrico	4	2	0,4	10	0,0002	0,0001
Cambio de Aceite de Lubricación	5	3	0,6	12	0,0003	0,0002
Cambio Bomba de Levante	6	4	0,8	12	0,0003	0,0002
Cambio Tuberías Sist. Lubricación	7	1	0,2	12	0,0003	0,0001
Cambio Grasa de Lubricación	8	2	0,4	5	0,0001	0,0000
Cambio Rod. Motor Eléctrico	9	1	0,2	5	0,0001	0,0000
Falla Retén Bomba de Lubricación	10	1	0,2	5	0,0001	0,0000
Cambio Bomba de Lubricación	11	7	1,4	12	0,0003	0,0004
Cambio de Filtros de Lubricación	12	3	0,6	12	0,0003	0,0002
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	13	2	0,4	168	0,0039	0,0016
Cambio Sello Dinámico Alimentación	14	2	0,4	5	0,0001	0,0000
Cambio Sello Estático Alimentación	15	3	0,6	5	0,0001	0,0001
Cambio Boquilla Alimentación	16	3	0,6	12	0,0003	0,0002
Reparación Cajón de Alimentación	17	3	0,6	2	0,0000	0,0000
Cambio de Parrillas Descarga	18	4	0,8	12	0,0003	0,0002
Cambio de Pernos Descarga	19	3	0,6	6	0,0001	0,0001
Reparación Cajón de Descarga	20	10	2,0	2	0,0000	0,0001

Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que el periodo con el cual fue desarrollada esta tabla corresponde al del historial de vida del equipo (5 años).

Cabe destacar que la fracción de tiempo en que el equipo se encuentra detenido por mantenimiento correctivo, también llamado indisponibilidad, para los distintos modos correctivos está definido de la siguiente forma:

$$D = Ff * TFS$$

Ahora, se obtendrán el límite de TFS,

$$LTFS = \frac{\sum TFS}{N^{\circ} \text{ Modos Correctivos}} = 0,00074 [\text{año}]$$

El límite frecuencia de falla.

$$LFf = \frac{\sum Ff}{N^{\circ} \text{ Modos Correctivos}} = 0,6 \left[ \frac{1}{\text{año}} \right]$$

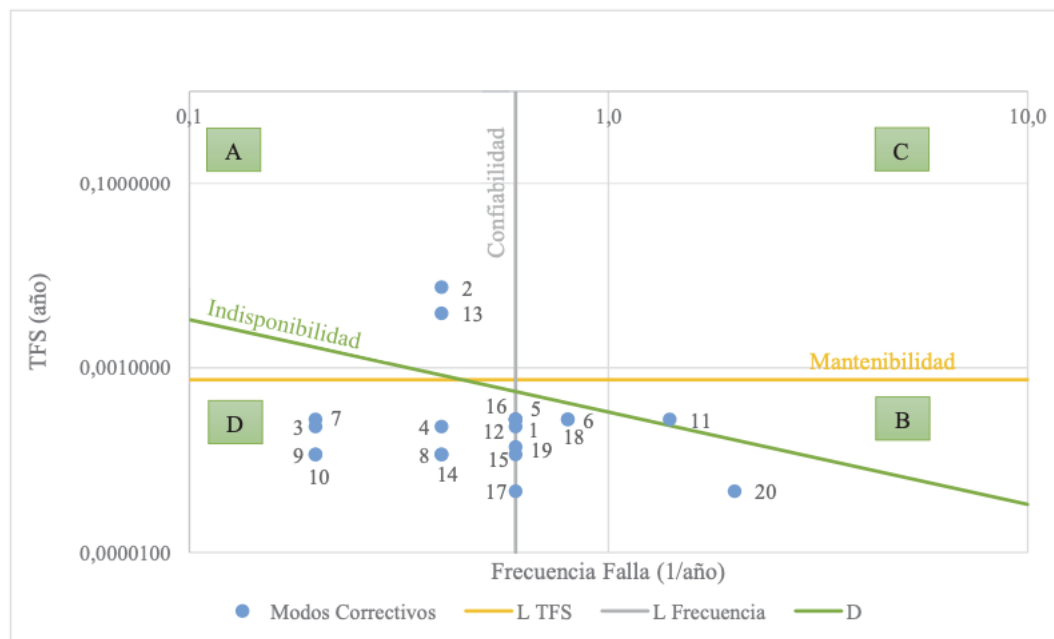
Los puntos de la curva de Iso-Indisponibilidad son los siguientes,

$$\text{Punto } 1_{[x,y]} = [0,2; 0,0017]$$

$$\text{Punto } 2_{[x,y]} = [2; 0,00017]$$

Graficando los datos obtenidos en la tabla N° 3.8 junto con los límites y la curva de iso- indisponibilidad, se obtiene el siguiente diagrama (gráfico N° 3.4)

**Gráfico N° 3.4: Diagrama de Jack Knife.**



Fuente:Elaboración propia.

Entonces, del gráfico N° 3.8, podemos ver lo siguiente:

- Los Modos Correctivos que se encuentran por encima de la curva D generan una mayor indisponibilidad en el equipo, por lo tanto, son considerados como los más críticos.
- Podemos ver que ningún modo de falla se encuentra en el cuadrante C, el cual es considerado el más crítico.
- Los Modos Correctivos 2 y 13 se encuentran en el cuadrante A, por tanto, son modos Agudos y afectan en la mantenibilidad del equipo.
- Los Modos Correctivos 6, 11, 18 y 20 se encuentran en el cuadrante B, entonces, se consideran como modos Crónicos, los cuales afectan en la confiabilidad del equipo.
- Los Modos Correctivos 1, 5, 12, 15, 16, 17 y 19, podemos ver que se encuentran en la línea de Confiabilidad, por lo tanto, su ocurrencia no es tan significativa.

Además, se encuentran debajo de la línea de Mantenibilidad, por lo que no necesitan un alto tiempo de reparación. Entonces, no se considerarán en análisis posteriores.

- Se puede apreciar que el Modo Correctivo 20, al estar en el cuadrante B, nos indica que afecta enormemente la Confiabilidad del equipo. Pero, como su reparación no toma nada de tiempo, la mantenibilidad del equipo no se ve afectada de gran manera, por lo tanto, tampoco se considerará en análisis posteriores.
- También podemos apreciar que los Modos Correctivos 3, 4, 7, 8, 9, 10 y 14, se encuentran en el cuadrante D, es decir, la ocurrencia de fallas no afecta la confiabilidad y el tiempo de reparación no genera problemas en la mantenibilidad del equipo. Por lo tanto, los componentes se encuentran bajo control, a pesar de que algunos tengan elevados CGM, según lo visto en Pareto.

#### **3.6.6. Comparación de Resultados y Elección de Modos Correctivos Críticos.**

La elección de los modos críticos se llevará a cabo con los diagramas de Pareto y Jack Knife. Es importante mencionar que, para hacerlo correctamente, era necesario conocer a cabalidad la función de cada componente y las consecuencias de una eventual falla, a fin de ser objetivo al momento de elegir el criterio que más se ajustara a los requerimientos de la empresa.

#### **Según Análisis de Pareto.**

Los resultados variaban dependiendo del criterio utilizado para evaluar los modos correctivos, por lo que resulta realmente complejo visualizar cuales son los modos que posteriormente hay que prestarles atención. Como se muestra en la tabla N° 3.9:

**Tabla N° 3.9: Resultados análisis de Pareto.**

Tipo de Criterio		
CGM	Horas Detenidas	N° Detenciones
Cambio Piñón	Cambio Piñón	Reparación Cajón de Descarga
Cambio Descansos Molino Alimentación-Descarga	Cambio Descansos Molino Alimentación-Descarga	Cambio Bomba de Lubricación
Cambio de Parrillas Descarga	Cambio de Aceite de Lubricación	Cambio Bomba de Levante
Cambio de Revestimientos Manto	Cambio Bomba de Levante	Cambio de Parrillas Descarga
Cambio de Inching Drive	Cambio Tuberías Sist. Lubricación	Cambio de Revestimientos Manto
Cambio de Aceite de Lubricación	Cambio Bomba de Lubricación	Cambio de Aceite de Lubricación
Cambio Tuberías Sist. Lubricación	Cambio de Filtros de Lubricación	Cambio de Filtros de Lubricación
Cambio Bomba de Lubricación	Cambio Boquilla Alimentación	Cambio Sello Estático Alimentación
Cambio Bomba de Levante	Cambio de Parrillas Descarga	Cambio Boquilla Alimentación
Cambio Boquilla Alimentación	Cambio de Revestimientos Manto	Reparación Cajón de Alimentación
Cambio de Filtros de Lubricación	Cambio de Inching Drive	Cambio de Pernos Descarga
Cambio Motor Eléctrico	Cambio Motor Eléctrico	Cambio Piñón
Cambio de Pernos Descarga	Cambio de Pernos Descarga	Cambio Motor Eléctrico
Cambio Grasa de Lubricación	Cambio Grasa de Lubricación	Cambio Grasa de Lubricación
Cambio Sello Dinámico Alimentación	Cambio Rod. Motor Eléctrico	Cambio Descansos Molino Alimentación-Descarga
Cambio Sello Estático Alimentación	Falla Retén Bomba de Lubricación	Cambio Sello Dinámico Alimentación
Cambio Rod. Motor Eléctrico	Cambio Sello Dinámico Alimentación	Cambio de Inching Drive
Falla Retén Bomba de Lubricación	Cambio Sello Estático Alimentación	Cambio Tuberías Sist. Lubricación
Reparación Cajón de Descarga	Reparación Cajón de Alimentación	Cambio Rod. Motor Eléctrico
Reparación Cajón de Alimentación	Reparación Cajón de Descarga	Falla Retén Bomba de Lubricación

Fuente: Elaboración propia.

Entonces, se tomaron los primeros cinco modos correctivos y los que se repiten, entre los distintos criterios analizados, son los siguientes:

- Cambio Piñón.
- Cambio Descansos Molino Alimentación- Descarga. Cambio Parrillas de Descarga.
- Cambio Bomba de Levante.
- Cambio Revestimientos Manto.

Hay que tener en cuenta que, de llegar a seleccionar estos modos correctivos como los más críticos, puede que se esté cometiendo un error, pues se están mezclando criterios. Además, se dejan fuera algunos modos que también tienen relevancia.

**Según Análisis de Jack Knife:**

Se consideraron que los modos correctivos críticos eran aquellos que se encontraban por sobre la curva de iso-indisponibilidad en los cuadrantes A y C. Según esto, los modos correctivos son los siguientes:

- Cambio Piñón.
- Cambio de Descansos Alimentación- Descarga. Cambio Bomba de Lubricación.

Por otro lado, también se considerarán los siguientes modos correctivos como críticos:

- Cambio Bomba de Levante.
- Cambio Parrillas de Descarga.

Debido a que estos están por sobre el límite de Frecuencia, provocando problemas en la confiabilidad del equipo y a pesar de que se encuentran bajo la línea de mantenibilidad, están muy cercanos a la curva de iso-indisponibilidad.

- **Resultado y Elección de Modos Correctivos Críticos:**

A causa de la disparidad en los resultados obtenidos con el Análisis de Pareto, se toma la decisión de seleccionar los modos correctivos críticos obtenidos en el análisis de Jack Knife, el cual es mucho más certero y preciso como método de priorización, dado que se consideran componentes que generan defectos importantes tanto en la mantenibilidad como en la confiabilidad y que, coincidentemente, generan un alto CGM. A diferencia del Análisis de Pareto que en cada uno de los criterios tomaba en cuenta modos correctivos que, según Jack Knife, estaban bajo control. Por otro lado, es importante mencionar que, debido a los alcances del presente trabajo de título, solo se seleccionaron cinco modos correctivos críticos.

### **3.7. Modelo de Confiabilidad.**

A continuación, se presenta el desarrollo del modelo de confiabilidad a los componentes críticos seleccionados.

#### **3.7.1. Alcances.**

Se advierte que los análisis realizados cuentan con una cantidad de datos muy precaria, en consecuencia, los resultados, desde el punto de vista estadístico, no son tan robustos.

Sin embargo, el análisis se ejecuta para tener una idea inicial del comportamiento de los componentes y del sistema, y con esto llevar a cabo el presente trabajo de título.

#### **3.7.2. Aplicación del Modelo de Weibull a Modos Correctivos Críticos.**

En seguida, se trabajará con la distribución estadística de Weibull para análisis de confiabilidad de sistemas mecánicos, con la cual se adecuará una función a fin de poder

modelar el comportamiento de los distintos modos correctivos críticos, para luego obtener los parámetros de Weibull que serán utilizados más adelante.

A continuación, se muestra el análisis de Weibull, la validación del modelo, la curva de confiabilidad, el MTBF y la tasa de falla para cada modo correctivo.

### 3.7.2.1. Cambio Piñón.

En la tabla N° 3.10 se muestra el cálculo de rangos medianos  $F(i)$ , los valores del eje X ( $x_i$ ) y el eje Y ( $y_i$ ) según el método de los mínimos cuadrados; que nos servirán para graficar y obtener una regresión lineal. La pendiente de esta regresión representa al parámetro de forma, el cuál será analizado posteriormente.

**Tabla N° 3.10: Datos para la regresión lineal modo correctivo.**

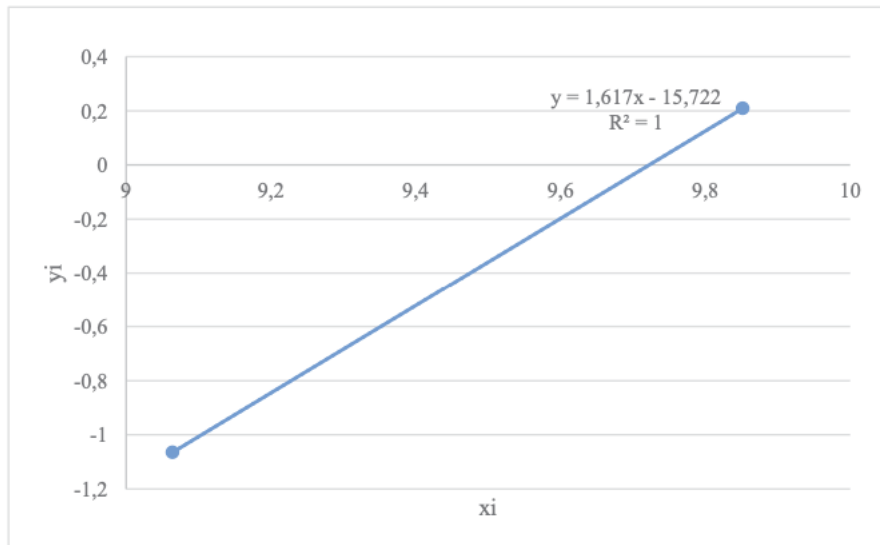
N° Falla $i$	Tiempo de Falla [hr] $t_i$	Rangos Medianos $F(i)$	$\ln(t_i)$ $x_i$	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(i)}\right)\right)$ $y_i$
1	8640	0,29	9,06	-1,06
2	18990	0,71	9,85	0,21

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionaba antes, la cantidad de datos es muy poca y puede que no sean representativos a la hora de modelar el comportamiento del componente. Por esta misma razón, para minimizar el error en el modelamiento, se estimó la función de distribución con el método de los rangos medianos, que se utiliza cuando la población de datos es pequeña.

A continuación, en el gráfico N° 3.6, se muestra la regresión lineal del modo correctivo.

**Gráfico N° 3.5: Regresión lineal.**



Fuente: Elaboración propia.

Según el diagrama del gráfico N° 3.9 , no es necesario minimizar el error cuadrático debido a que la recta representa completamente el comportamiento de este modo. Así pues, según la recta, tenemos los siguientes parámetros de Weibull:

$$\beta = 1,62[-]$$

$$\eta = 16696 [hr]$$

$$\gamma = 0 [hr]$$

**Curva de Confiabilidad.**

Para obtener la curva de confiabilidad se deben graficar los datos mostrados en la tabla N° 3.10:

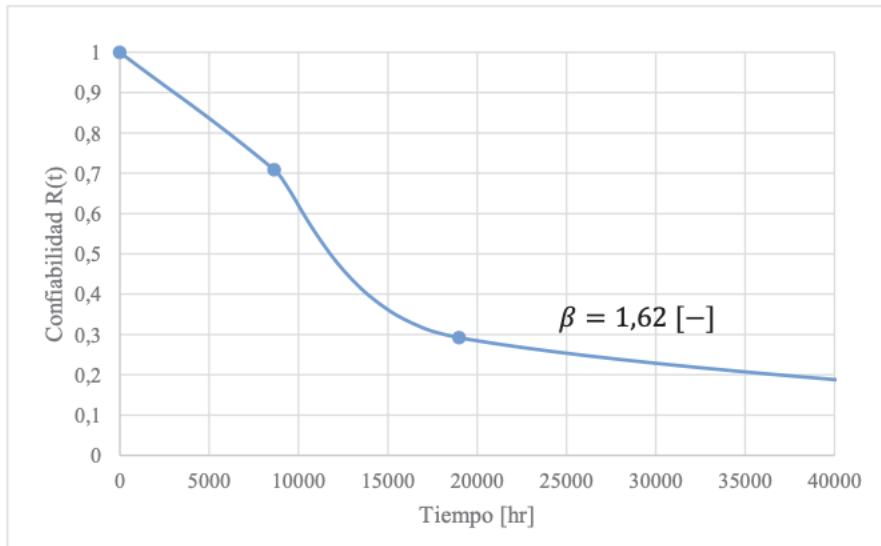
**Tabla N° 3.11: Datos para curva de confiabilidad.**

<i>i</i>	Tiempo entre Fallas (hr)	<i>R(t)</i>
0	0	1
1	8640	0,71
2	18990	0,29

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la tabla N° 3.11, se muestra el diagrama de confiabilidad para el Modo Correctivo Cambio Piñón:

**Gráfico N° 3.6: Confiabilidad de modo correctivo cambio piñón**



Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico N° 3.6, podemos ver que a las días de operación, el componente presenta un de confiabilidad y a las días de operación el componente presenta un de confiabilidad, lo cual resulta ser muy bajo; considerando costos de adquisición, de reparación, etc.

**Tiempo Medio Entre fallas.**

Esta definido por la siguiente ecuación:

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Entonces, utilizando los parámetros de Weibull calculados anteriormente, el tiempo medio entre fallas sería , es decir, cerca de 1 año y 8 meses.

**Tasa de Fallas.**

Está definida por la siguiente ecuación:

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

En la tabla N° 3.12, se muestran los datos de la tasa de fallas pertenecientes al modo correctivo:

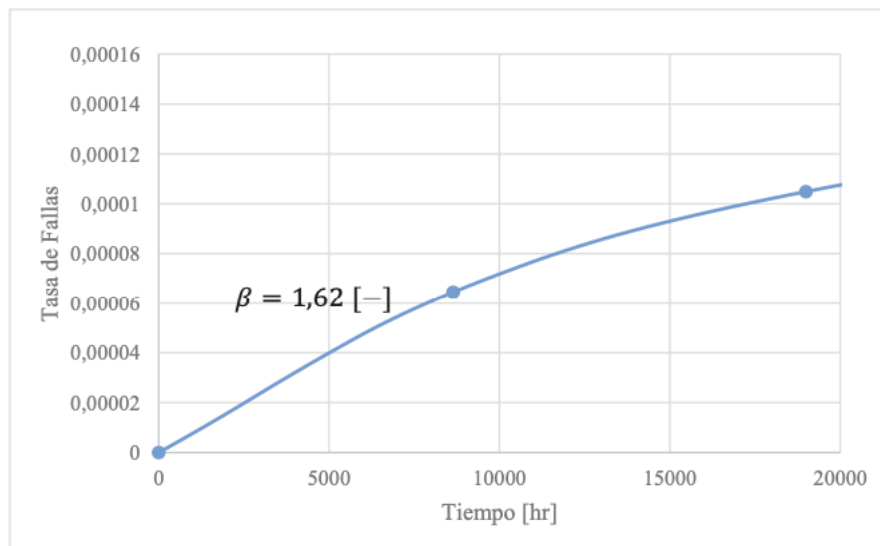
**Tabla N° 3.12: Tasa de fallas modo correctivo.**

$i$	Tiempo entre Fallas [hr]	Tasa de Fallas $\lambda$
0	0	0
1	8640	6,5E-05
2	18990	1,0E-04

Fuente: Elaboración propia.

Graficando los datos de la tasa de fallas, se obtiene la curva mostrada en el gráfico N° 3.7:

**Gráfico N° 3.7: Tasa de fallas del modo correctivo cambio piñón.**



Fuente: Elaboración propia.

### **Análisis de Resultados.**

Según el modelo de Weibull aplicado al Piñón, se concluye lo siguiente:

- El parámetro de forma correspondiente a indica que el componente presenta deterioro prematuro o desgaste, en otras palabras, comienza a sufrir fallas antes de cumplir el ciclo de vida; ya sea por corrosión, erosión, mala utilización del componente, entre otros.
- La curva de confiabilidad se comporta de forma correcta según el parámetro obtenido. Ahora, si analizamos el proceso, podemos ver que a esa altura el componente tiene una tasa de falla un 0,0001 horas; valor que podría tomarse como referencia para un reemplazo preventivo a fin de evitar la falla de éste mientras se

encuentre operando y de esta manera evitar la falla de la Corona, componente que toma un alto tiempo y costo de fabricación comparado al Piñón.

La tasa de fallas se comporta correctamente según el parámetro de forma obtenido.

Por otra parte, el aumento de las fallas se puede explicar debido a dos razones:

- La mala utilización del componente: por desalineamiento y mal montaje.
- Fallas de los sistemas aledaños: la bomba hidráulica no suministra grasa (bomba extremadamente desgastada, tuberías de entrada se encuentran tapadas, pérdidas de aire en la tubería), presión del sistema hidráulico es variable (falla en la bomba hidráulica, falla en válvulas de sobre flujo, falla en los medidores de presión), los inyectores de grasa se encuentran tapados, contaminación de la grasa lubricante, baja viscosidad del lubricante, entre otros.
- Fallas por desgaste: piñón con bajos ciclos de fatiga, deterioro mecánico, bajo nivel de mantenimiento.

### 3.7.2.2. Cambio de Descansos Molino Alimentación- Descarga:

En la tabla N° 3.13 se muestra el cálculo de rangos medianos  $F(i)$ , los valores del eje X ( $x_i$ ) y el eje Y ( $y_i$ ) según el método de los mínimos cuadrados; que nos servirán para graficar y obtener una regresión lineal. La pendiente de esta regresión representa al parámetro de forma, el cuál será analizado posteriormente.

**Tabla N° 3.13: Datos para la regresión lineal modo correctivo.**

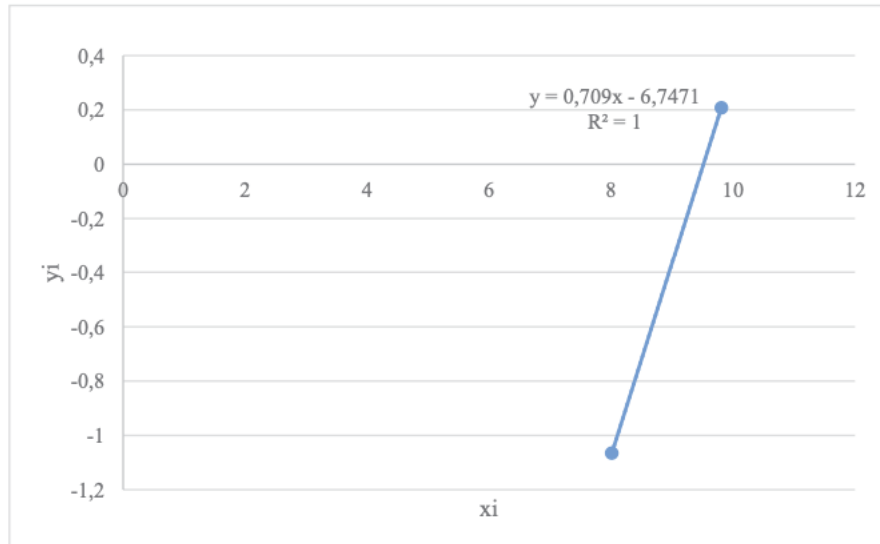
N° Falla $i$	Tiempo de Falla [hr] $t_i$	Rangos Medianos $F(i)$	$\ln(t_i)$ $x_i$	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(i)}\right)\right)$ $y_i$
1	3024	0,29	8,01	-1,06
2	18221	0,71	9,81	0,21

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionaba antes, la cantidad de datos es muy poca y puede que no sean representativos a la hora de modelar el comportamiento del componente. Por esta misma razón, para minimizar el error en el modelamiento, se estimó la función de distribución con el método de los rangos medianos, que se utiliza cuando la población de datos es pequeña.

A continuación, en el gráfico N° 3.8, se muestra la regresión lineal del modo correctivo.

**Gráfico N° 3.8: Regresión lineal modo correctivo.**



Fuente: Elaboración propia.

Entonces, según el gráfico N° 3.8, no es necesario minimizar el error cuadrático debido a que la recta representa completamente el comportamiento de este modo. Así pues, según la recta, tenemos los siguientes parámetros de Weibull:

$$\beta = 0,71[-]$$

$$\eta = 13580 [hr]$$

$$\gamma = 0 [hr]$$

**Curva de Confiabilidad.**

Para obtener la curva de confiabilidad se deben graficar los datos mostrados en la tabla N° 3.14.

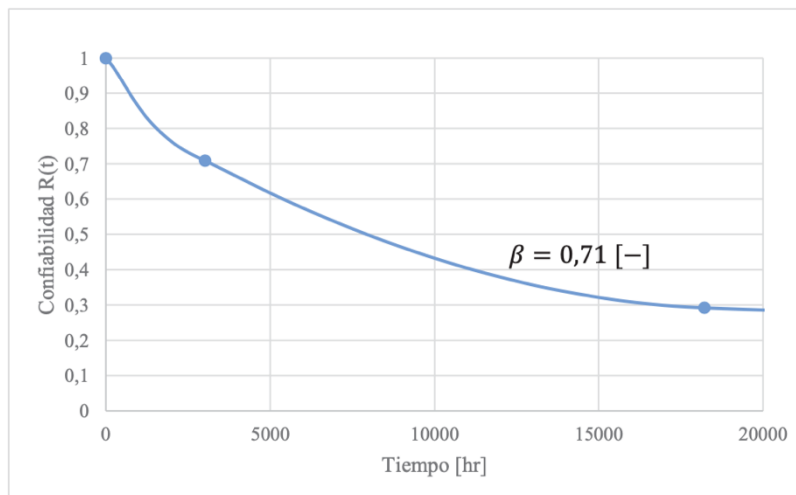
**Tabla N° 3.14: Datos para la curva de confiabilidad modo correctivo.**

i	Tiempo entre Fallas (hr)	R(t)
0	0	1
1	3024	0,71
2	18221	0,29

Fuente Elaboración propia.

Ahora, en en gráfico N° 3.9, se muestra el diagrama de confiabilidad para el Modo Correctivo Cambio Descansos Molino Alimentación - Descarga:

**Gráfico N° 3.9: Confiabilidad del modo correctivo cambio descansos molina.**



Fuente: Elaboración propia.

Del diagrama, podemos ver que a través de los días de operación, el componente presenta una disminución de la confiabilidad desde 1 a 0,3, lo cual resulta ser muy bajo, considerando costos de adquisición, de reparación, etc.

**Tiempo Medio Entre fallas.**

Esta definido por la siguiente ecuación:

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})$$

Entonces, utilizando los parámetros de Weibull calculados anteriormente, el tiempo medio entre fallas sería MTBF=16985 [HR], es decir, cerca de 1 año y 11 meses.

**Tasa de Fallas.**

Está definida por la siguiente ecuación:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} (\frac{t - \gamma}{\eta})^{\beta-1}$$

En la tabla N° 3.15, se muestran los datos de la tasa de fallas pertenecientes al modo correctivo:

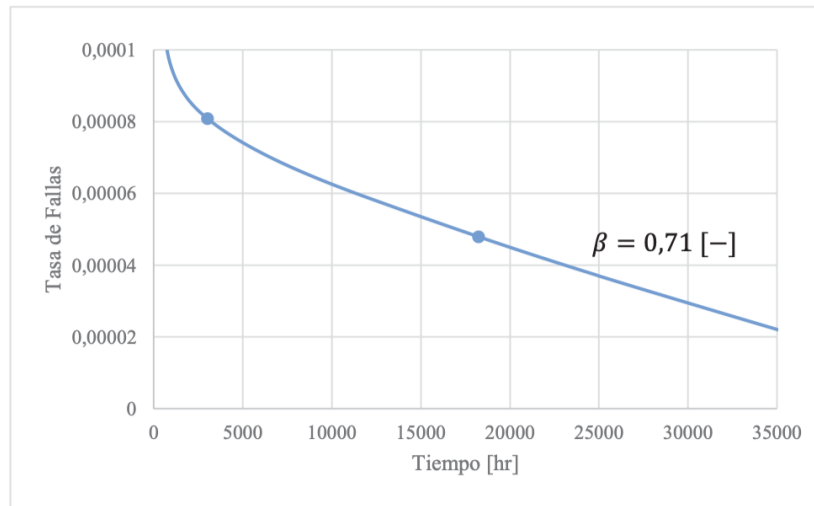
**Tabla N° 3.15: Tasa de fallas del modo correctivo cambio descansos molino**

i	Tiempo entre Fallas (hr)	Tasa de Fallas $\lambda$
0	0	-
1	3024	8,1E-05
2	18221	4,8E-05

Fuente: Elaboración propia.

Graficando los datos de la tasa de fallas, se obtiene la curva mostrada en el gráfico N° 3.10.

**Gráfico N° 3.10: Tasa de fallas del modo correctivo cambio descansos molino.**



Fuente: Elaboración propia.

### **Análisis de Resultados.**

Según el modelo de Weibull aplicado a los Descansos de Alimentación - Descarga, se concluye lo siguiente:

- El parámetro de forma correspondiente a indica que el componente presenta fallas infantiles o prematuras; las cuales pueden haber sido ocasionadas por problemas de ensamblaje, alineamiento, desconocimiento del equipo y de la forma en que opera, fallas humanas, etc.
- La curva de confiabilidad se comporta de forma correcta según el parámetro de forma obtenido. Ahora, si analizamos la tasa de fallas, podemos ver que a esa altura la confiabilidad del componente es de un 0,00008, por lo tanto, si tomamos como

referencia el valor del MTBF para un reemplazo preventivo sería demasiado bajo, debido a que estos componentes debiesen durar como mínimo. Entonces, tomando en cuenta que es uno de los componentes más costosos del Molino de Bolas tanto en la adquisición como en la mantención; la confiabilidad del componente no debiese ser tan baja. Puede que los resultados obtenidos se justifiquen debido a la baja población de datos, la cual no resulta tan representativa.

La tasa de fallas se comporta de acuerdo con el parámetro de forma obtenido, el cual puede explicarse de la siguiente manera:

- Desconocimiento de la operación del equipo: aumento de carga dentro del molino, mayor número de bolas, mala lubricación de los descansos.
- Desconocimiento de la instalación: mal montaje de los descansos, mala alineación, mala fabricación de la loza.
- Errores humanos: no hay inspección y verificación de equipo como corresponde, etc.

Posteriormente, la disminución de la tasa de falla y su tendencia a un valor constante da a entender que los operadores y mantenedores normalizaron el proceso, entendieron mejor el sistema y su operación.

### **3.7.2.3. Cambio Bomba de lubricación.**

En la tabla N° 3.16 se muestra el cálculo de rangos medianos  $F(i)$ , los valores del eje X ( $x_i$ ) y el eje Y ( $y_i$ ) según el método de los mínimos cuadrados, que nos servirán para graficar y obtener una regresión lineal. La pendiente de esta regresión representa al parámetro de forma, el cuál será analizado posteriormente.

**Tabla N° 3.16: Datos para regresión lineal modo correctivo.**

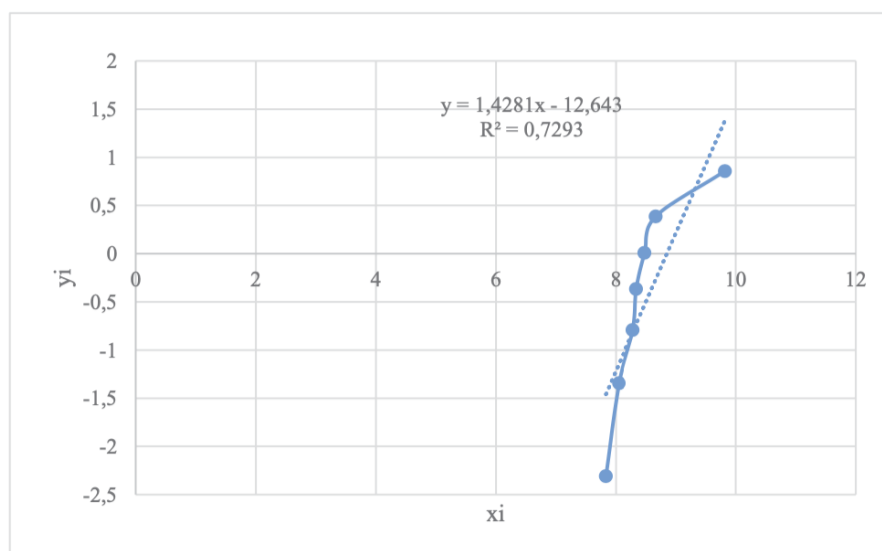
N° Falla <i>i</i>	Tiempo de Falla [hr] <i>t<sub>i</sub></i>	Rangos Medianos <i>F(i)</i>	$\ln(t_i)$ <i>x<sub>i</sub></i>	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(i)}\right)\right)$ <i>y<sub>i</sub></i>
1	2520	0,09	7,83	-2,31
2	3143	0,23	8,05	-1,34
3	3959	0,36	8,28	-0,79
4	4200	0,50	8,34	-0,37
5	4825	0,64	8,48	0,01
6	5807	0,77	8,67	0,39
7	18432	0,91	9,82	0,86

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionaba antes, la cantidad de datos es muy poca y puede que no sean representativos a la hora de modelar el comportamiento del componente. Por esta misma razón, para minimizar el error en el modelamiento, se estimó la función de distribución con el método de los rangos medianos, que se utiliza cuando la población de datos es pequeña.

A continuación, en el gráfico N° 3.11, se muestra la regresión lineal del modo correctivo.

**Gráfico N° 3.11: Regresión lineal modelo correctivo.**



Fuente: Elaboración propia.

La forma de la curva nos indica que (Meruane, 2011). Según esto, de forma iterativa se realizaron ajustes a la curva modificando el parámetro de localización para poder obtener el menor error cuadrático, dando como resultado.

Como resultado tenemos la tabla N° 3.17:

**Tabla N° 3.17: Datos modificados para la obtención de parámetros de Weibull para modo correctivo cambio bomba lubricación**

N° Falla <i>i</i>	Tiempo de Falla <i>t<sub>i</sub></i>	Rangos Medianos <i>F(i)</i>	$\ln(t_i)$ <i>x<sub>i</sub></i>	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(i)}\right)\right)$ <i>y<sub>i</sub></i>
1	120	0,09	4,79	-2,31
2	743	0,23	6,61	-1,34
3	1559	0,36	7,35	-0,79
4	1800	0,50	7,50	-0,37
5	2425	0,64	7,79	0,01
6	3407	0,77	8,13	0,39
7	16032	0,91	9,68	0,86

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en el gráfico N° 3.18, se muestra la curva de regresión modificada.

Por lo tanto, según el nuevo diagrama tenemos los siguientes parámetros de Weibull:

$$\beta = 0,71[-]$$

$$\eta = 3403 [hr]$$

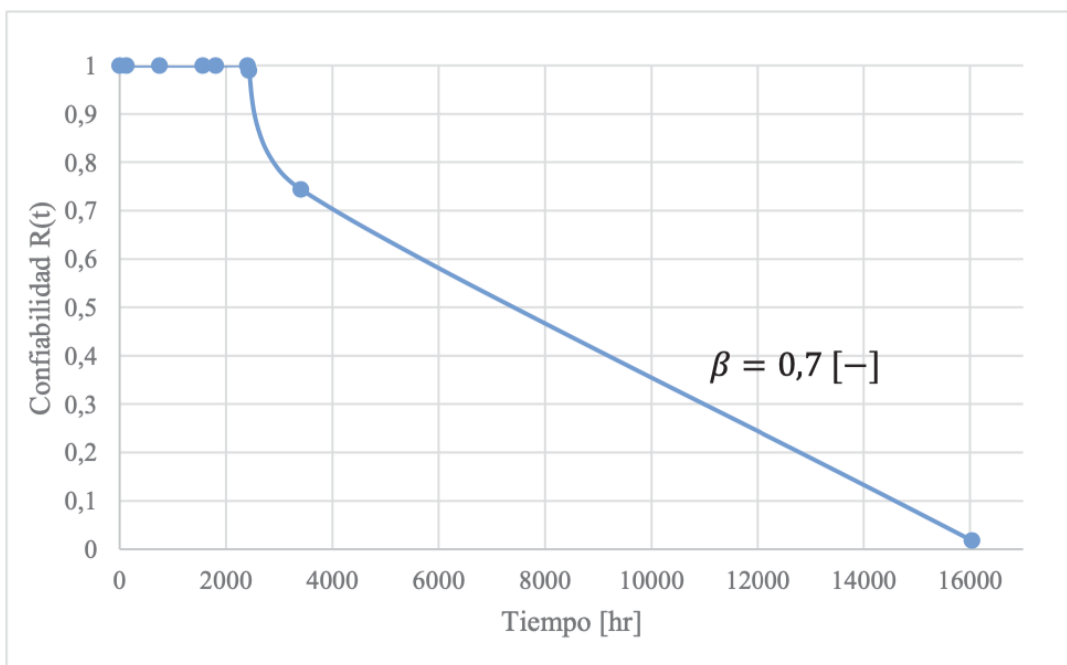
$$\gamma = 2400 [hr]$$

#### **Curva de Confiabilidad.**

Para obtener la curva de confiabilidad se deben graficar los datos mostrados en la tabla N° 3.18.

Ahora, en el gráfico N° 3.12, se muestra el diagrama de confiabilidad para el Modo Correctivo Cambio Bomba de Lubricación:

**Gráfico N° 3.12: Confiabilidad del modo correctivo cambio bomba lubricación.**



Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico N° 3.13, podemos ver que la confiabilidad se mantuvo en un 100% hasta las 2400 [hr], pues teóricamente, no pueden ocurrir fallas ni deterioro del componente antes del parámetro de localización utilizado. Por otro lado, a las 2425 [hr] aproximadamente 101 días de operación el componente presentaba un 99% de confiabilidad, a las 3407 [hr] aproximadamente 142 días presentaba un 74% y a las 16032 [hr] aproximadamente 668 días un 1,82% de confiabilidad.

**Tiempo Medio Entre fallas.**

Esta definido por la siguiente ecuación:

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})$$

Entonces, utilizando los parámetros de Weibull calculados anteriormente, el tiempo medio entre fallas sería MTBF=6700 [hr], es decir, cerca de 9 meses.

**Tasa de Fallas.**

Está definida por la siguiente ecuación:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} (\frac{t - \gamma}{\eta})^{\beta-1}$$

En la tabla N° 3.18, se muestran los datos de la tasa de fallas pertenecientes al modo correctivo:

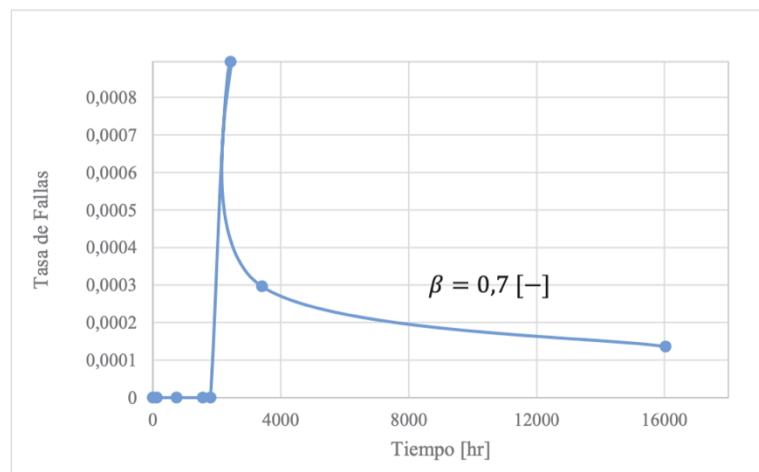
**Tabla N° 3.18: Tasa de fallas del modo correctivo cambio bomba de lubricación.**

$i$	Tiempo entre Fallas [hr]	Tasa de Fallas
0	0	0
1	120	0
2	743	0
3	1559	0
4	1800	0
5	2425	0,0009
6	3407	0,0003
7	16032	0,0001

Fuente: Elaboración propia.

Graficando los datos de la tasa de fallas, se obtiene la curva mostrada en el gráfico N° 3.13.

**Gráfico N° 3.13: Tasa de fallas del modo correctivo cambio bomba de lubricación.**



Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso de la confiabilidad, podemos ver que la tasa de falla comienza después del parámetro de localización utilizado. Esto ocurre debido a que, teóricamente, no pueden haber fallas ni deterioro de los componentes antes del  $\gamma$ .

## **Análisis de Resultados.**

Según el modelo de Weibull aplicado a la Bomba de Lubricación, se concluye lo siguiente:

- El parámetro de forma correspondiente a indica que el componente presenta fallas infantiles o prematuras, las cuales pueden haber sido ocasionadas por problemas de ensamblaje, alineamiento, desconocimiento del equipo y de la forma en que opera, fallas humanas, etc.
- La curva de confiabilidad se comporta de forma correcta según el parámetro de forma obtenido. Ahora, analizando el MTBF= 6700 [hr], podemos ver que a esa altura la confiabilidad del equipo es de un 55%, por lo tanto, si tomamos el valor de MTBF como referencia para un reemplazo preventivo sería bajo, debido a que estos componentes debiesen durar como mínimo 1 año operando.

El comportamiento inicial de la tasa de fallas, como se mencionaba anteriormente, se debe a las modificaciones hechas al parámetro de localización, por otro lado, también se comporta de acuerdo al parámetro de forma obtenido. Las fallas pueden haber ocurrido por las siguientes razones:

- Desconocimiento de la operación del equipo y sistema: dirección de giro de la bomba incorrecto, bajo nivel de aceite en los estanques.
- Desconocimiento de la instalación: mal montaje de la bomba, mala alineación.
- Errores humanos: contaminación del aceite de lubricación, no hay inspección y verificación de equipo como corresponde, etc.

Posteriormente, la disminución de la tasa de falla y su tendencia a un valor constante da a entender que los operadores y mantenedores normalizaron el proceso, entendieron mejor el sistema de lubricación y su operación.

### **3.7.2.4. Cambio Bomba de Levante.**

En la tabla N° 3.19 se muestra el cálculo de rangos medianos  $F(i)$ , los valores del eje X ( $x_i$ ) y el eje Y ( $y_i$ ) según el método de los mínimos cuadrados, que nos servirán para graficar y obtener una regresión lineal. La pendiente de esta regresión representa al parámetro de forma, el cuál será analizado posteriormente.

**Tabla N° 3.19: Datos para la regresión lineal modo correctivo.**

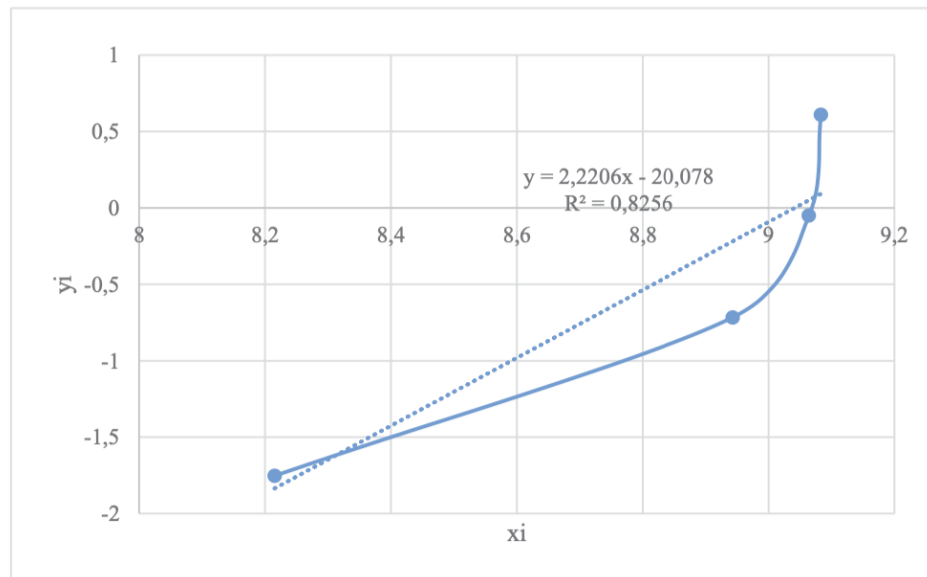
N° Falla $i$	Tiempo de Falla [hr] $t_i$	Rangos Medianos $F(i)$	$\ln(t_i)$ $x_i$	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(i)}\right)\right)$ $y_i$
1	3696	0,16	8,22	-1,75
2	7656	0,39	8,94	-0,72
3	8640	0,61	9,06	-0,05
4	8808	0,84	9,08	0,61

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionaba antes, la cantidad de datos es poca y puede que no sean representativos a la hora de modelar el comportamiento del componente. Por esta misma razón, para minimizar el error en el modelamiento, se estimó la función de distribución con el método de los rangos medianos, que se utiliza cuando la población de datos es pequeña.

A continuación, en el gráfico N° 3.14, se muestra la regresión lineal del modo correctivo.

**Gráfico N° 3.14: Regresión lineal modo correctivo cambio bomba levante.**



Fuente: Elaboración propia.

Entonces, la forma de la curva nos indica que  $\gamma \geq 0$  (Meruane, 2011). Según esto, se realizaron ajustes a la curva modificando el parámetro de localización, sin embargo, el error cuadrático aumentaba para cualquier valor de gamma mayor a cero, Por lo tanto, se toman los parámetros de Weibull sin modificar la curva:

$$\beta = 2,22[-]$$

$$\eta = 8448[hr]$$

$$\gamma = 0[hr]$$

### Curva de Confiabilidad.

Para obtener la curva de confiabilidad se deben graficar los datos mostrados en la tabla N° 3.20.

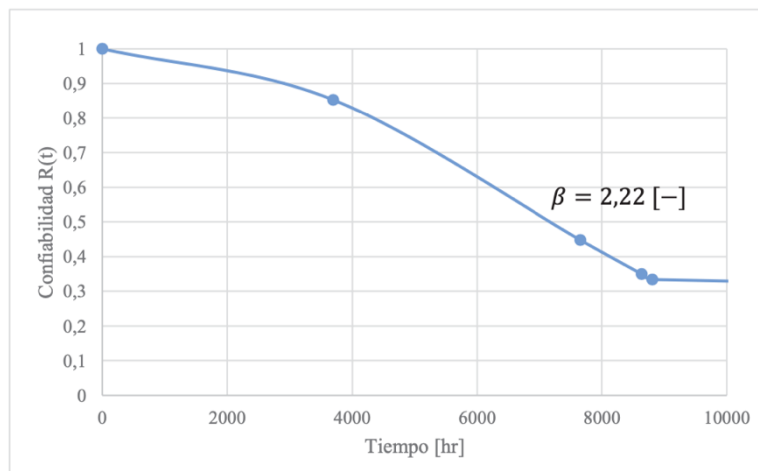
**Tabla N° 3.20: Datos para curva de confiabilidad modo correctivo cambio bomba de levante.**

$i$	Tiempo entre Fallas (hr)	$R(t)$
0	0	1
1	3696	0,85
2	7656	0,45
3	8640	0,35
4	8808	0,33

Fuente: Elaboración propia.

Ahora, en el gráfico N° 3.15, se muestra el diagrama de confiabilidad para el modo correctivo cambio bomba de levante.

**Gráfico N° 3.15: Confiabilidad del modo correctivo cambio bomba de levante.**



Fuente: Confiabilidad del modo correctivo cambio bomba levante.

Del diagrama, podemos ver que las 3696 [hr] aproximadamente 154 días de operación el componente presentaba un 85% de confiabilidad, a las 7656 [hr]

aproximadamente 319 días de operación presentaba un 45% y a las 8808 [hr] aproximadamente 367 días un 33% .

**Tiempo Medio Entre fallas.**

Esta definido por la siguiente ecuación:

$$MTBF = \gamma + \eta\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})$$

Entonces, utilizando los parámetros de Weibull calculados anteriormente, el tiempo medio entre fallas sería MTBF=7482 [hr], es decir, cerca de 10 meses.

**Tasa de Fallas.**

Está definida por la siguiente ecuación:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} (\frac{t - \gamma}{\eta})^{\beta-1}$$

En la tabla N° 3.21, se muestran los datos de la tasa de fallas:

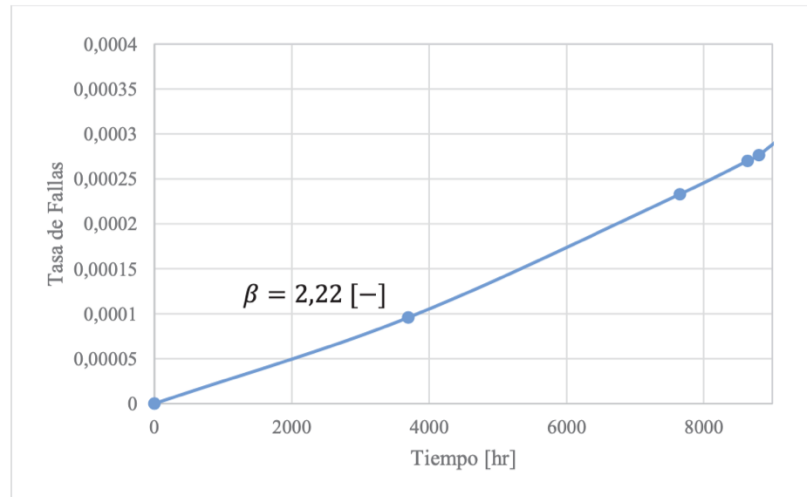
**Tabla N° 3.21: Tasa de fallas del modo correctivo.**

i	Tiempo entre Fallas [hr]	Tasa de Fallas $\lambda$
0	0	0
1	3696	9,6E-05
2	7656	2,3E-04
3	8640	2,7E-04
4	8808	2,8E-04

Fuente: Elaboración propia.

Graficandolos datos de la tasa de fallas, se obtiene la curva mostrada en el gráfico N° 3.16:

**Gráfico N° 3.16: Tasa de fallas del modo correctivo cambio bomba levante.**



Fuente: Elaboración propia.

### **Análisis de Resultados.**

Según el modelo de Weibull aplicado a la Bomba de Levante, se concluye lo siguiente:

- El parámetro de forma correspondiente a  $\beta = 2,22 [-]$  indica que el componente presenta fallas por deterioro prematuro, en otras palabras, el equipo comienza a fallar antes de cumplir su ciclo de vida; puede ocurrir producto de una mala utilización del componente, corrosión, erosión, bajos ciclos de fatiga, entre otros.
- La curva de confiabilidad se comporta de forma correcta según el parámetro de forma obtenido. Ahora, analizando el MTBF=7482 [hr], podemos ver que a esa altura la confiabilidad del equipo es de un 45%, por lo tanto, se podría tomar el valor de MTBF como referencia para un reemplazo, sin embargo, hay que tener en cuenta que estos componentes debiesen durar como mínimo 1 año operando.
- La tasa de falla se comporta de acuerdo al parámetro de forma obtenido. Por otra parte, el aumento de las fallas se puede explicar debido a las siguientes razones:
  - La mala utilización del componente: por desalineamiento, mal montaje e instalación.

- Fallas de los sistemas o componentes aledaños: contaminación del aceite producto de fugas a nivel superior (sistema alimentación, sistema descarga), motor no funciona correctamente.
- Fallas por desgaste: bomba con bajos ciclos de fatiga, deterioro mecánico, bajo nivel de mantenimiento.

### 3.7.2.5. Cambio Parilla de Descarga.

En la tabla N° 3.22 se muestra el cálculo de rangos medianos  $F(i)$ , los valores del eje X ( $x_i$ ) y el eje Y ( $y_i$ ) según el método de los mínimos cuadrados, que nos servirán para graficar y obtener una regresión lineal. La pendiente de esta regresión representa al parámetro de forma, el cuál será analizado posteriormente

**Tabla N° 3.22: Datos para la regresión lineal modo correctivo cambio parrillas descarga.**

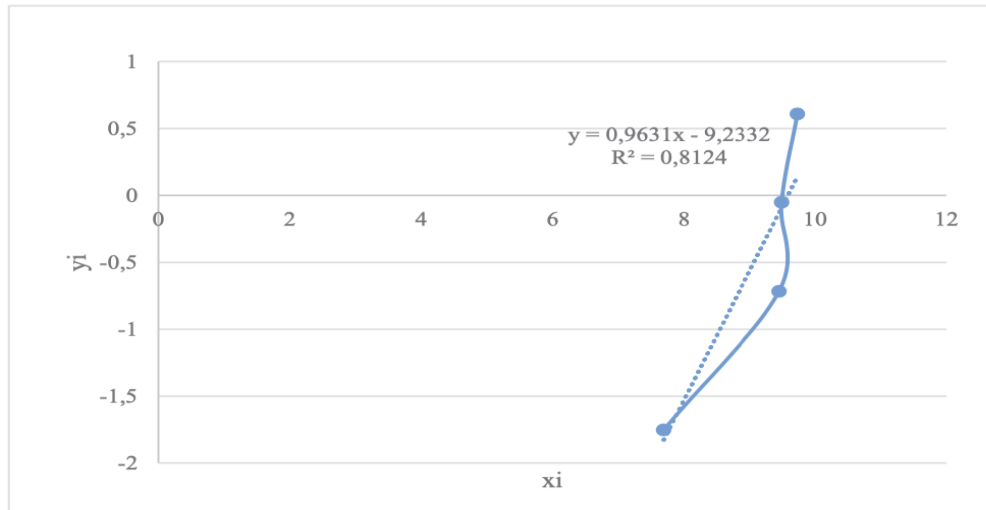
N° Falla $i$	Tiempo de Falla [hr] $t_i$	Rangos Medianos $F(i)$	$\ln(t_i)$ $x_i$	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(i)}\right)\right)$ $y_i$
1	2184	0,16	7,69	-1,75
2	12744	0,39	9,45	-0,72
3	13223	0,61	9,49	-0,05
4	16872	0,84	9,73	0,61

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionaba antes, se puede ver que la cantidad de datos es poca y puede que no sean representativos a la hora de modelar el comportamiento del componente. Por esta misma razón, para minimizar el error en el modelamiento, se estimó la función de distribución con el método de los rangos medianos, el cual se utiliza cuando la población de datos es pequeña.

A continuación, en el gráfico N° 3.17, se muestra la regresión lineal del modo correctivo.

**Gráfico N° 3.17: Regresión lineal modo correctivo cambio parrillas descarga.**



Fuente: Elaboración propia.

Entonces, la forma de la curva nos indica que  $\gamma \geq 0$  (Meruane, 2011). Según esto, se realizaron ajustes a la curva modificando el parámetro de localización, pero el error cuadrático aumentaba para cualquier valor de gamma mayor a cero, Por lo tanto, se tomaron los parámetros de Weibull sin modificar la curva:

$$\beta = 0,96[-]$$

$$\eta = 14.574[hr]$$

$$\gamma = 0[hr]$$

### Curva de Confiabilidad.

Para obtener la curva de confiabilidad se deben graficar los datos mostrados en la tabla N° 3.23:

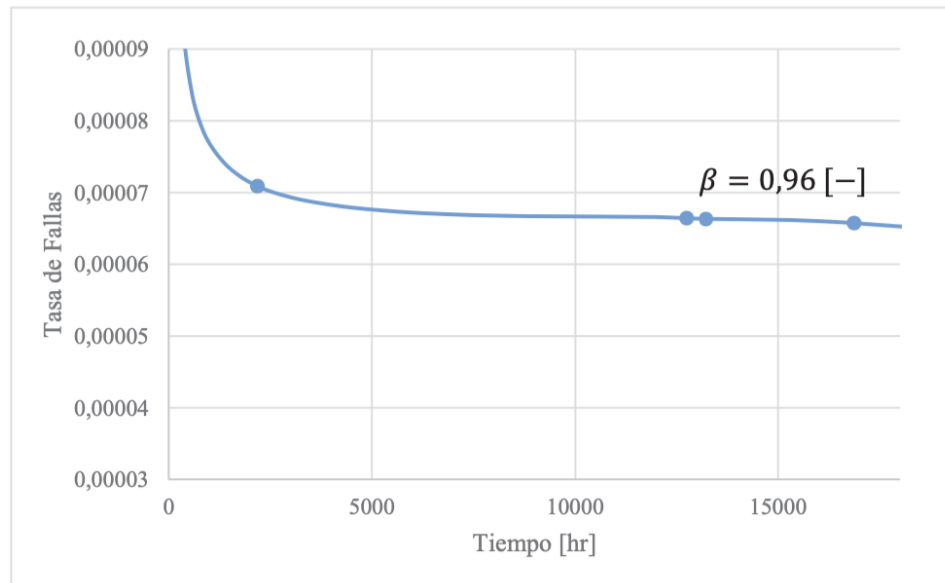
**Tabla N° 3.23: Datos para curva de confiabilidad modo correctivo cambio parrillas descarga**

$i$	Tiempo entre Fallas (hr)	$R(t)$
0	0	1
1	2184	0,85
2	12744	0,42
3	13223	0,40
4	16872	0,32

Fuente: Elaboración propia.

Graficando los datos de la tasa de fallas, se obtiene la curva mostrada en el gráfico N° 3.18.

**Gráfico N° 3.18: Tasa de falla del modo correctivo cambio parrillas descarga.**



Fuente: Elaboración propia.

#### **Análisis de Resultados.**

Según el modelo de Weibull aplicado a las Parrillas Descarga, se concluye lo siguiente:

- El parámetro de forma correspondiente a  $\beta = 0,96 [-]$  indica que el componente presenta fallas prematuras o infantiles; las cuales pueden ser provocadas por problemas de ensamble, mal alineamiento, desconocimiento del equipo y de la forma en que opera, fallas humanas, entre otros.
- La curva de confiabilidad se comporta de forma correcta según el parámetro de forma obtenido. Ahora, analizando el MTBF= 14818 [hr], podemos ver que a esa altura la confiabilidad del equipo es de un 36%, ahora, si tomamos el valor de MTBF como referencia para un reemplazo preventivo estaría por sobre el rango esperado, debido a que estos componentes debiesen durar como máximo 1 año operando; aunque debiese evaluarse la situación caso a caso.
- La tasa de falla se comporta de acuerdo al parámetro de forma obtenido. Las fallas pueden haber ocurrido por las siguientes razones:

- Desconocimiento de la operación del equipo: aumento de carga dentro del molino, carga muy abrasiva, bajo nivel de bolas.
- Desconocimiento de la instalación: mal montaje de las parrillas de descarga.
- Errores humanos: no hay inspección y verificación de equipo como corresponde.

Por otro lado, la disminución de la tasa de falla y su tendencia a un valor constante indica que los operadores y mantenedores normalizaron el proceso, entendieron mejor el componente y la operación.

### 3.8. Árboles de Falla de los Modos Correctivos Críticos.

En el siguiente apartado se realizarán árboles de falla correspondientes a los modos correctivos críticos; para que al momento en que se presente una falla, los árboles sirvan como herramienta para poder determinar de una forma mucho precisa y rápida el origen de ésta.

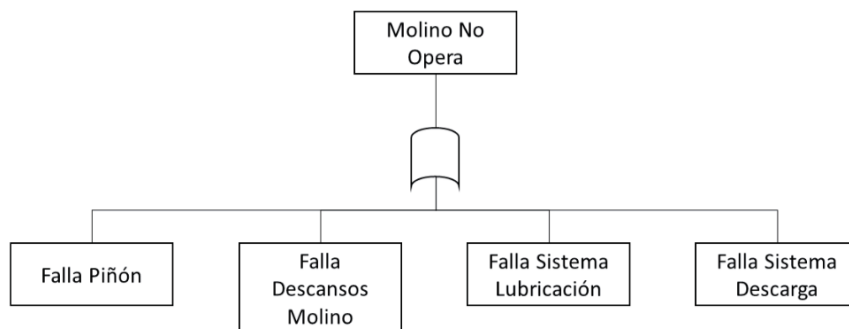
La construcción de estos árboles fue realizada gracias al FMECA, consultas a mecánicos, operadores, jefes de área y catálogos de componentes similares.

Es importante mencionar que se realizará una modificación en la simbología de los árboles de falla; por un tema de espacios y ajuste. En la figura N° 3.3, mostrada en el marco teórico, las fallas primarias son representadas por un círculo y, desde ahora, serán representadas por un rectángulo de esquinas redondeadas.

#### 3.8.1. Árbol de Falla Molino de Bolas G.

A continuación, se muestra el árbol de fallas general del molino de bolas G.

**Figura N° 3.3: Árbol de falla molino de bolas G.**

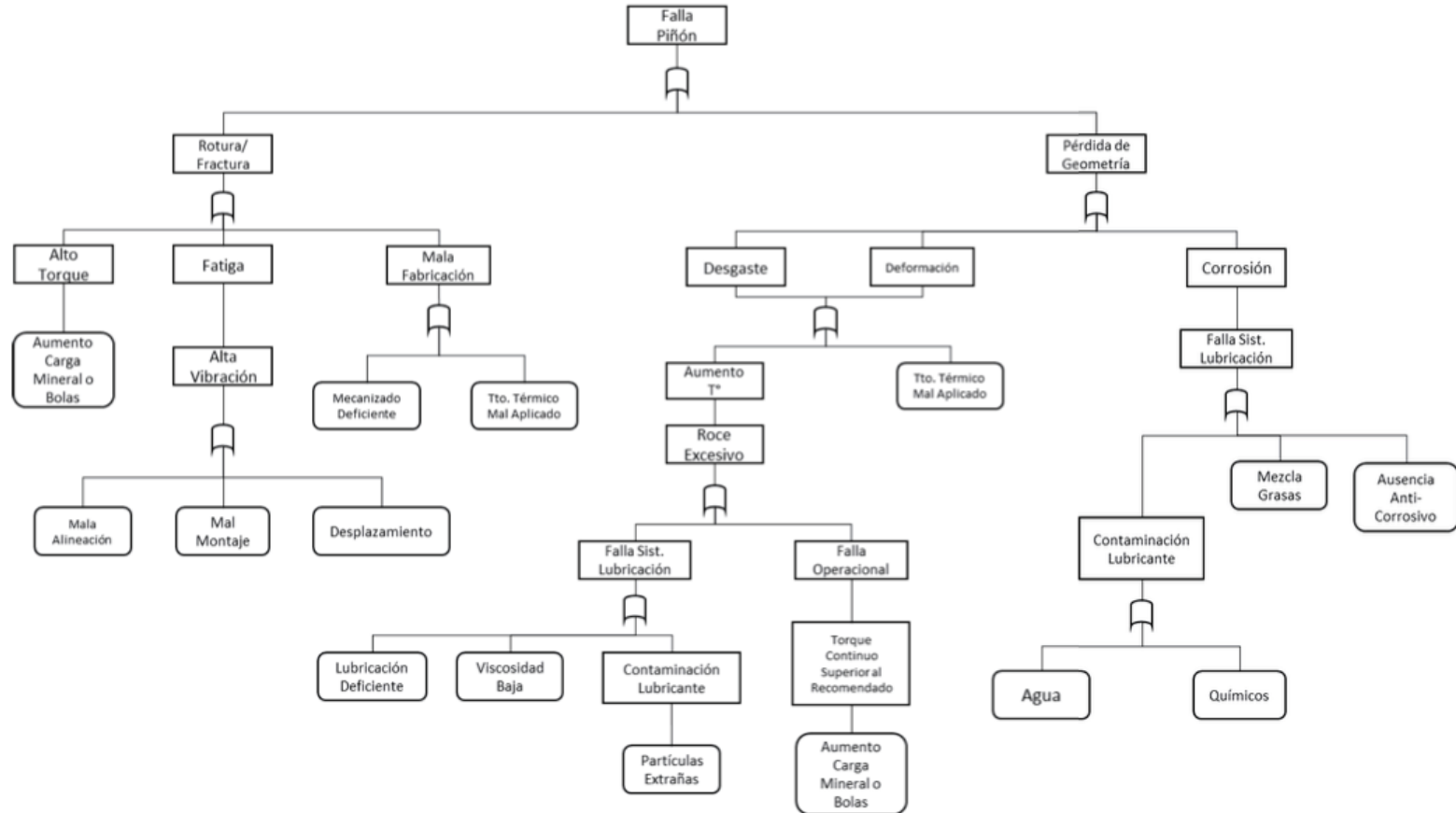


Fuente: Catálogo molino de bolas G.

### 3.8.2. Árbol de Falla Piñón.

A continuación, se muestra el árbol de falla del piñón

**Figura N° 3.4: Árbol de falla piñón.**

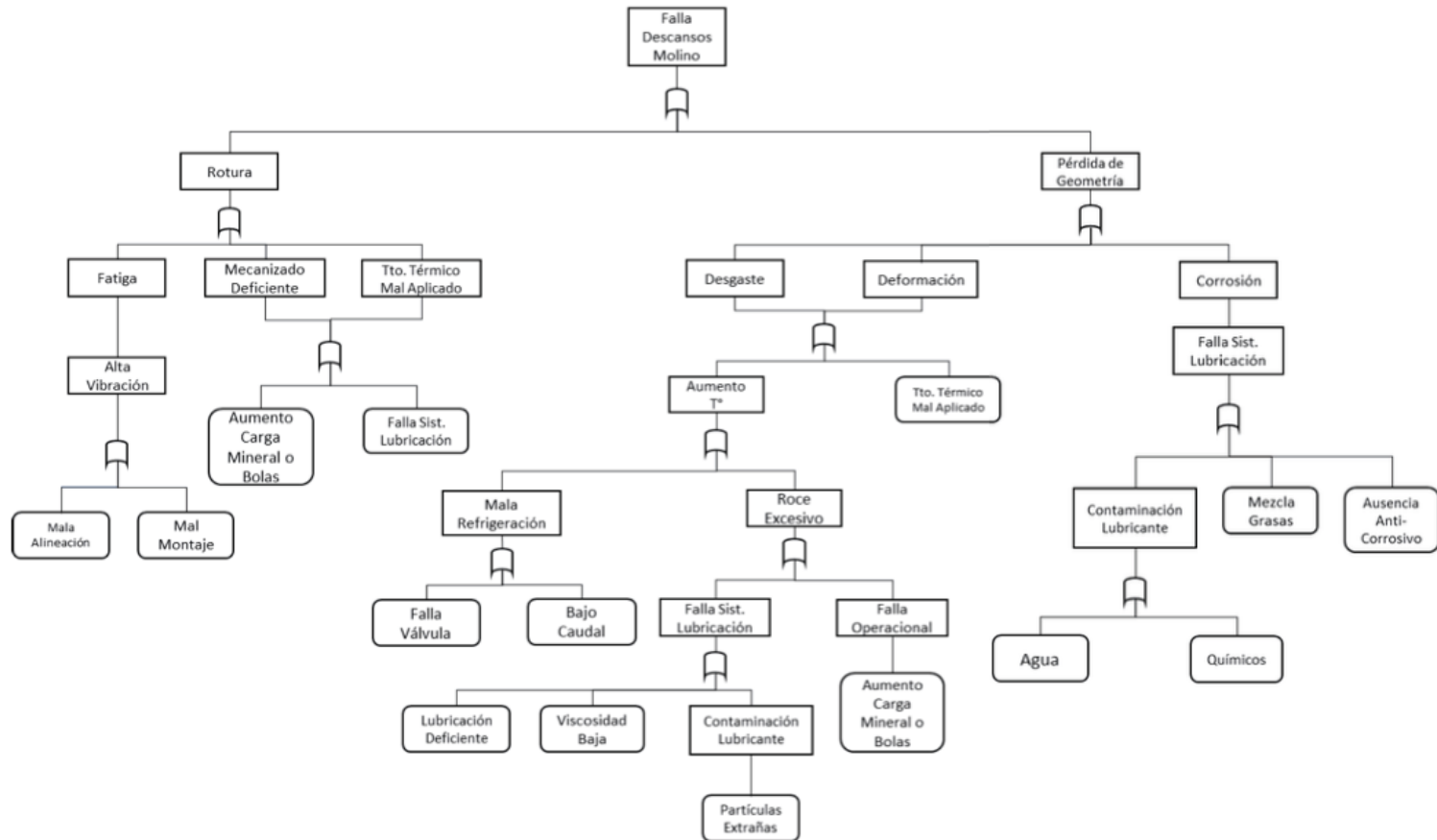


Fuente: Catálogo molino de bolas G.

### 3.8.3. Árbol de Falla Descansos Molino Alimentación-Descarga.

A continuación, se muestra el árbol de fallas de los descansos del molino.

**Figura N° 3.5: Árbol de falla descansos molinos alimentación descarga.**

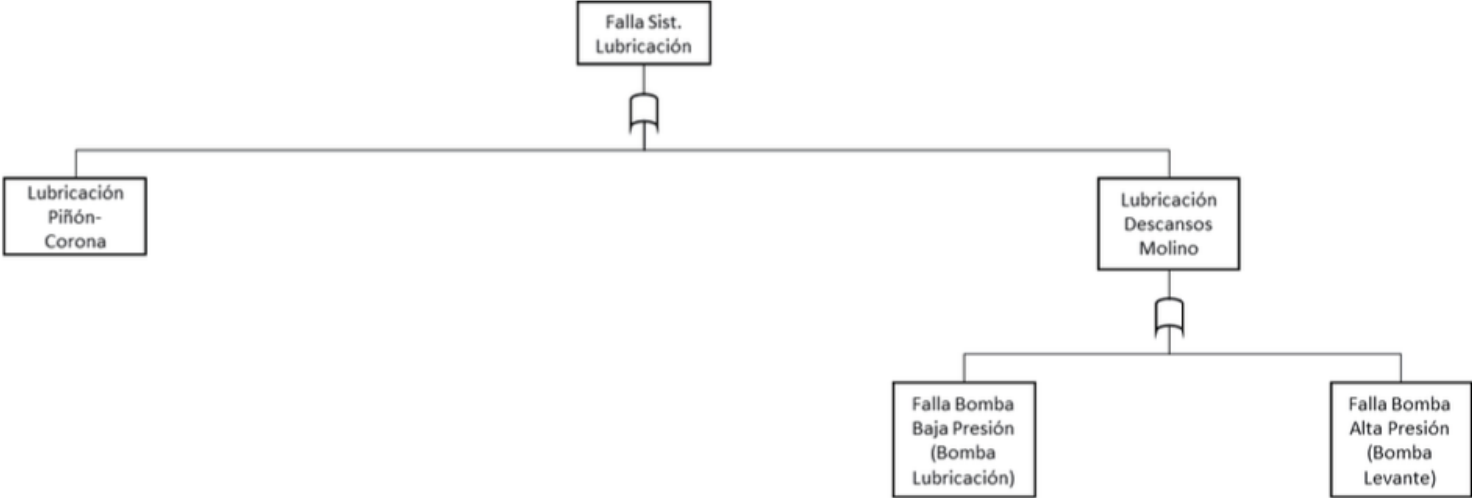


Fuente: Catálogo molino de bolas G.

**3.8.4. Árbol de Falla Sistema de Lubricación.**

A continuación, se muestra el árbol de fallas general del sistema de lubricación.

**Figura N° 3.6: Árbol de falla sistema de lubricación.**

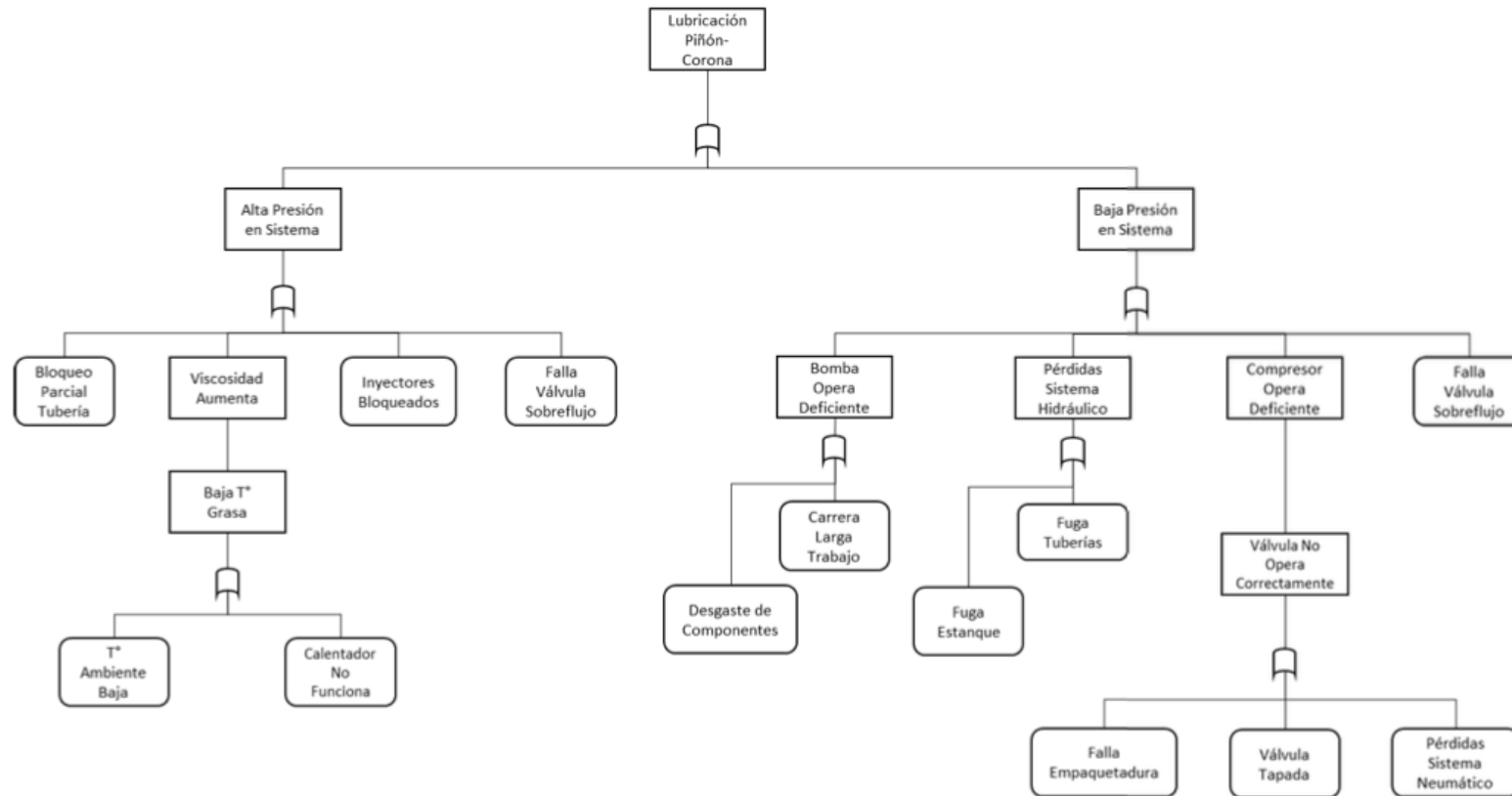


Fuente: Catálogo molino de bolas G.

### 3.8.4.1. Árbol de Falla Sistema de Lubricación Piñón-Corona.

A continuación, se muestra el árbol de fallas general del sistema de lubricación piñón corona.

Figura N° 3.7: Continuación árbol de falla sistema de lubricación.

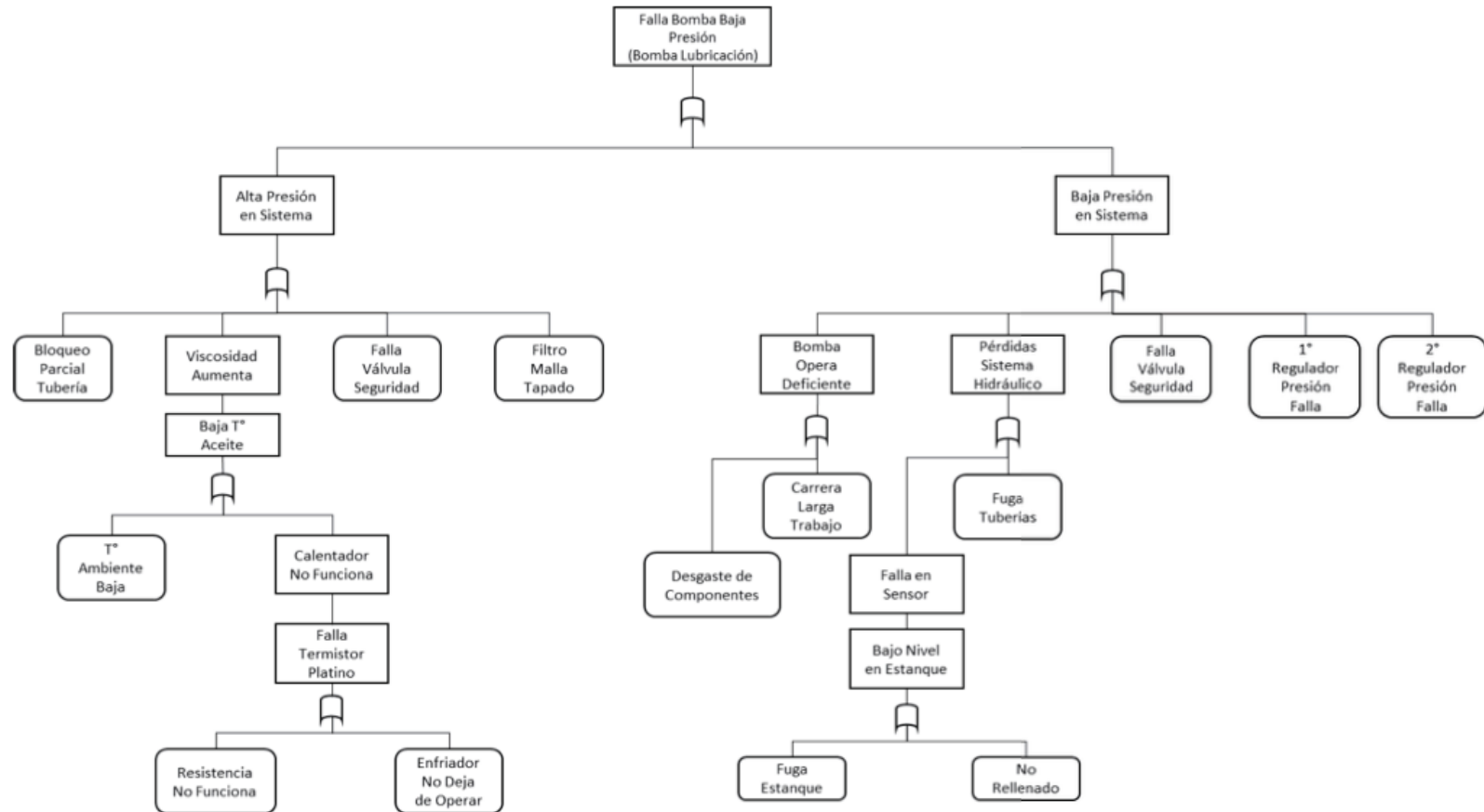


Fuente: Catálogo molino de bolas G.

### 3.8.4.2. Árbol de Falla Sistema de Lubricación Descansos-Bomba de Lubricación.

A continuación, se muestra el árbol de fallas de la bomba de lubricación perteneciente al sistema de lubricación.

**Figura N° 3.8: Continuación árbol de falla sistema lubricación.**

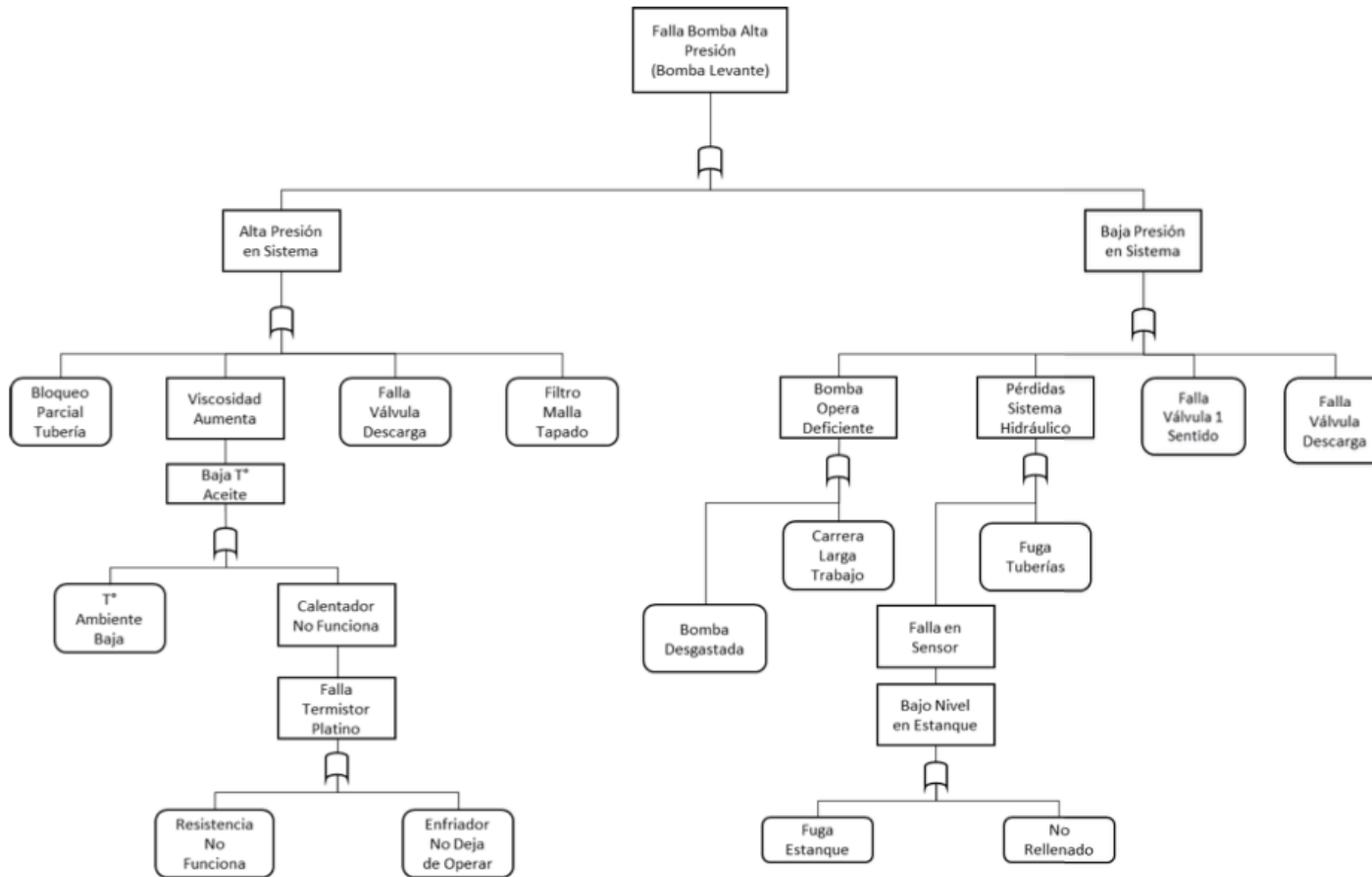


Fuente: Catálogo molino de bolas G.

### 3.8.4.3. Árbol de Falla Sistema de Lubricación Descansos-Bomba Levante.

A continuación, se muestra el árbol de fallas de la bomba de lubricación perteneciente al sistema de lubricación.

**Figura N° 3.9: Continuación árbol de falla sistema lubricación.**

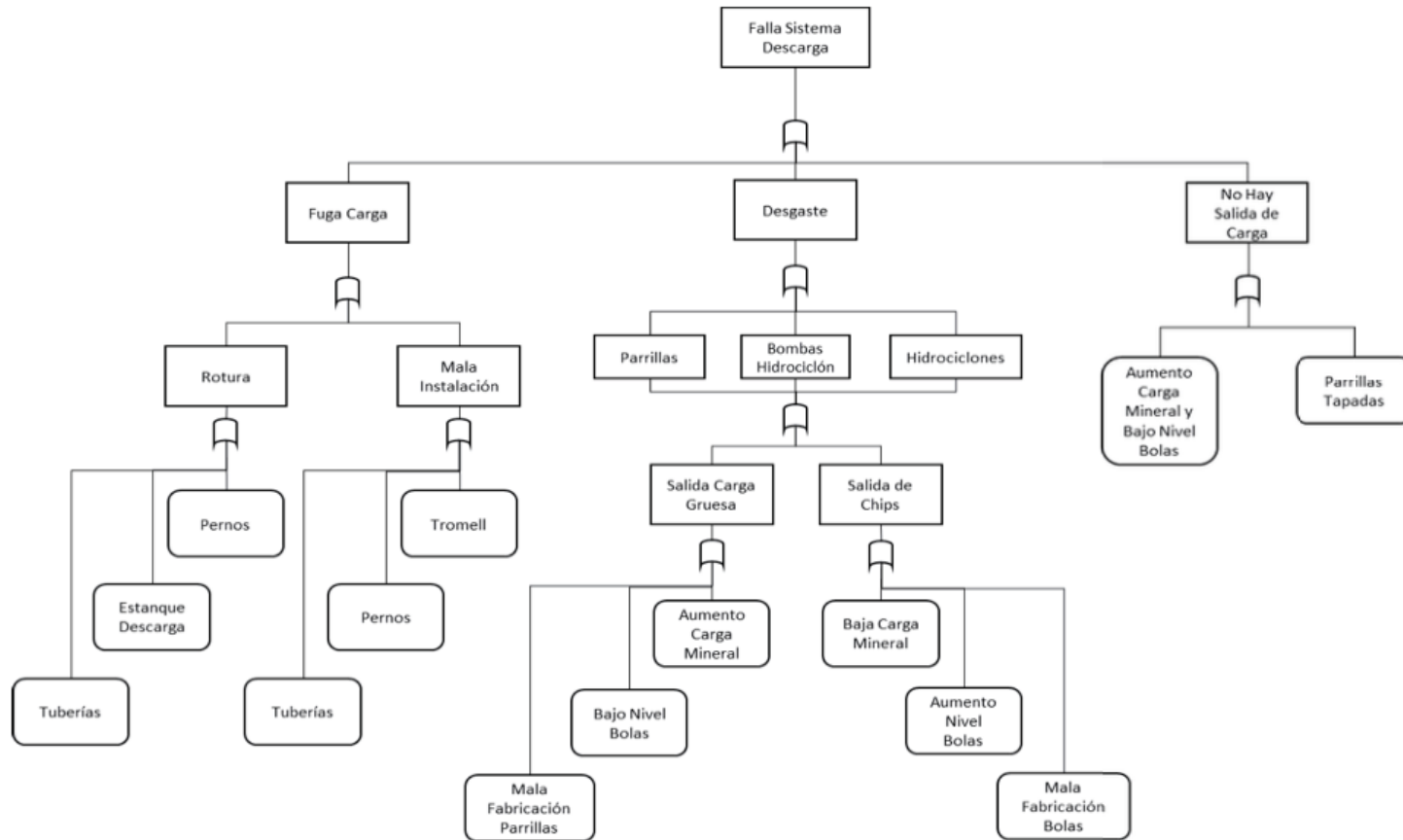


Fuente: Catálogo molino de bolas G.

### 3.8.5 Árbol de Falla Sistema Descarga.

A continuación, se muestra el árbol de fallas del sistema de descarga.

**Figura N° 3.10: Árbol de falla sistema descarga.**



Fuente: Catálogo molino de bolas G.

## **CAPÍTULO IV**

### **PLAN DE MANTENIMIENTO**

#### **4.1. Introducción.**

En el siguiente capítulo se desarrollará un plan de mantenimiento en función del modelo de confiabilidad y del contexto operacional de compañía Minera Ojos del Salado. En donde se buscará minimizar los costos asociados a mantención y a las fallas imprevistas que conllevan a mantenciones correctivas.

Como medida inicial se realizarán recomendaciones previas para los modos correctivos críticos según el parámetro de forma que tengan, posteriormente se propondrá el plan de mantenimiento en base a la condición operacional de la empresa.

#### **4.2. Alcances.**

El plan de mantenimiento estará basado en el circuito molienda de la compañía Minera Ojos del Salado.

#### **4.3. Recomendaciones Previas.**

La solución a este problema no recae en implementar un mantenimiento tipo preventivo, sino en encontrar la causa raíz y eliminarla; la cual suele estar relacionada con malos montajes, problemas en la alineación, desconocimientos del mantenimiento del equipo y de su operación, errores en diseño del componente, entre otros. Es importante mencionar que en el caso de que hayan existido problemas con la alineación, es estrictamente necesario realizar el alineamiento nuevamente, pues los errores seguirán ocurriendo incluso trayendo fallas a nivel superior y, en caso de que existan problemas relacionados con el diseño del componente, se hace la recomendación de realizar un chequeo previo al componente antes de instalarlo.

Ahora, de las causas mencionadas, las que mayor incidencia tienen en las fallas infantiles es el desconocimiento del mantenimiento y operación de los equipos, ambas relacionadas con errores netamente humanos (Moubray, 1991). Por consiguiente, para dar fin a esto, lo ideal sería capacitar a los operadores y mantenedores respecto al montaje y funcionamiento de los componentes, la operación del equipo y el tipo de mantenimiento que debe realizarse.

Sin embargo, hay que tener claro que los errores humanos no son estrictamente responsabilidad de las mismas personas, sino también de la propia organización de la

empresa; puede que no se estén generando procedimientos necesarios para realizar los trabajos, falta de planes de capacitación, desarrollo y reconocimiento de los trabajadores, entre otros.

Entonces, se hacen necesarias las siguientes acciones básicas para evitar fallas infantiles en los componentes críticos:

- Establecer procedimientos de trabajo, que permitan minimizar todo tipo de costo asociado a la gestión del mantenimiento.
- Diseñar instructivos paso a paso de montajes de componentes críticos del molino de bolas, garantizando su correcto funcionamiento.
- Dejar a disposición de los operadores y mantenedores la documentación técnica del equipo, manuales y planos.
- Dejar a disposición de los mantenedores todas las herramientas necesarias para poder realizar las actividades de montaje y mantención.
- Capacitación y entrenamiento continuo con al menos una vez por mes.

Siguiendo estas recomendaciones, tanto operadores como mecánicos, cuando deban enfrentarse al proceso inicial de instalación y puesta en marcha de un equipo, lo harán con el mayor manejo de información y conocimiento posible junto con el equipo necesario para la ejecución de todas las tareas. Esto permitirá llevar a cabo un trabajo más preciso, con el mínimo de errores y en un menor tiempo; logrando minimizar la tasa de fallas considerablemente.

Entonces, se hace necesaria la aplicación de las siguientes acciones básicas para evitar fallas por deterioro prematuro:

- Dejar a disposición de los operadores instructivos operacionales del equipo.
- Lista de chequeo de equipo y componentes.
- Estandarizar modos de falla.
- Reporte de fallas para la construcción de un historial de fallas.
- Dejar a disposición de los mantenedores todas las herramientas necesarias para poder realizar las actividades de mantención.
- Plan de mantenimiento preventivo.
- Capacitación y entrenamiento continuo.

Siguiendo estas recomendaciones, tanto operadores como mecánicos, podrán otorgar a los administradores del departamento de mantención un registro que sea fiel a las fallas ocurridas y de esta forma se podrá modelar de forma representativa el comportamiento tanto del equipo como el de los componentes más críticos. Con esto, se podrá estandarizar los modos de fallas para poder diseñar un plan de mantenimiento preventivo que se ajuste a las condiciones de funcionamiento del equipo y de la planta. Finalmente, con esto se podrán prevenir fallas en componentes que generen alta indisponibilidad en el sistema y junto a esto, minimizar el costo de la gestión del mantenimiento.

#### **4.4. Plan de Mantenimiento.**

Según el contexto operacional en el que actualmente se encuentra la compañía Minera Ojos del Salado, se propone establecer un plan de mantenimiento preventivo “basado en la condición”, el cual estará fundamentado, principalmente, por listas de chequeos de equipos (diarias, semanales, mensuales, etc.) y reportes de fallas. Entonces, a partir de un hallazgo se generará inmediatamente una orden de trabajo preventivo.

De acuerdo a lo mencionado, uno de los primeros puntos a evaluar será la frecuencia óptima de inspecciones, con la que se busca determinar el estado del equipo y sus componentes; una vez obtenidos los resultados será posible tomar acciones preventivas, las cuales permitirán reducir la cantidad de fallas imprevistas y, también, disminuir el costo general de mantenimiento optimizando el tiempo entre inspecciones.

Para ello se analizarán dos frecuencias de inspección:

- Frecuencia óptima de inspecciones con detención de equipo.
- Frecuencia óptima de inspecciones sin detención de equipo.

Es importante mencionar que no se realizarán los cálculos de frecuencia óptima de inspecciones considerando los parámetros de Weibull, debido a que no tenemos el parámetro alfa (costos preventivos sobre costos correctivos) puesto que la empresa no tiene registros relacionados a costos preventivos. Por otro lado, el resto de recomendaciones, mencionadas en el apartado **4.3.** deberán ser aplicadas, eventualmente, a mediano y largo plazo por parte del personal de la empresa.

##### **4.4.1. Frecuencia óptima de inspecciones con Detención de Equipo.**

Para el desarrollo de este apartado se tomarán las siguientes consideraciones,

- Se tomarán en cuenta 30 días en el mes.

- El tiempo y N° de inspecciones no se encontraba dentro del historial de falla, por lo tanto, se consultarán al personal del área de mantenimiento de la compañía.
- La cantidad de reparaciones se sacarán del historial de falla.
- En el costo de intervención generado por una reparación también se considerará el costo del repuesto, pues de esta forma se estará en un escenario más conservativo; sopesando el costo ocasionado por una falla de los modos correctivos.

## **CAPÍTULO V**

### **ESTUDIO ECONÓMICO**

#### **5.1. Introducción.**

En el presente capítulo se realizará un estudio al impacto económico que generaría en la empresa la aplicación de las actividades propuestas. Para ello se llevará a cabo una comparación de los costos generados por la política actual de mantenimiento versus los costos obtenidos con la aplicación de las actividades propuestas por el plan de mantenimiento, gestión de repuestos y recomendaciones varias. Antes de ejecutar el análisis, los puntos a considerar son los siguientes,

1. Con la aplicación de la frecuencia óptima de inspecciones con detención de equipo a los modos correctivos críticos, se realizará una inspección mensual menos al año.
2. Con la aplicación de las listas de chequeo y el reporte de fallas se espera tener un registro más fidedigno y robusto de los incidentes. Con esto se podrá llevar un mejor control del equipo; se podrá modelar con mayor precisión el comportamiento de los componentes y posteriormente se podrá atacar y prevenir con mayor exactitud las fallas; se asume que el equipo fallará menos debido al control exhaustivo que se llevará a cabo.

Entonces, el resultado de los puntos mencionados anteriormente se verá reflejado en una disminución de los CGM, de los costos asociados a las inspecciones con detención de equipo y en el aumento de la producción junto con una constancia y estabilidad en la operación de trabajo.

#### **5.2. Impacto Económico.**

En el siguiente apartado se llevará a cabo el análisis económico de los costos globales de mantenimiento y los costos de la aplicación de las frecuencias de inspecciones con detención de equipo.

##### **5.2.1. Análisis Económico a CGM según Plan de Mantenimiento y Repuestos:**

Para poder realizar una comparación entre los costos antes y después de aplicar el plan de mantenimiento y la gestión de repuestos, se tomarán las siguientes consideraciones,

- Ambos análisis se compararán en el mismo horizonte de tiempo, el cual corresponderá al periodo del historial de fallas (5 años).

- Aunque después de aplicar el plan de mantenimiento debiesen disminuir la cantidad de fallas, se considerará la misma ocurrencia de fallas para los modos correctivos críticos, pues no sabemos con certeza en cuanto disminuirá la tasa de falla de cada modo.
- Para las bombas de lubricación y levante, el costo de falla ( $C_{falla}$ ) se consideró cero, pues se toma en cuenta la recomendación de tener bombas en “stand by”, lo que significa que los tiempos de detención serán prácticamente despreciables.
- Con el plan de repuestos, el costo de falla ( $C_{falla}$ ) disminuye, pues ya no habrán tiempos de espera debido a la falta de componentes. Entonces, las horas de detención del equipo corresponderán solo a las horas que tome la reparación.
- El costo de gestión de compra ( $C_{gc}$ ) y el costo del repuesto ( $C_{repuesto}$ ) fueron reemplazados por el costo global del repuesto ( $C_{gr}$ )

A continuación, en la tabla N° 5.1, se muestra la modificación de los CGM producto de la aplicación del plan de mantenimiento y el plan de repuestos.

**Tabla N° 5.1: Análisis de CGM modificado según plan de mantenimiento y repuestos.**

Modo Correctivo	Hrs. Detención	Cant. Fallas	N° Trabaj.	Costo Gestión Repuesto	Costos (KUSD)			CGM
					Costo Inter.	Costo Falla		
Cambio Piñón	36	2	4	91	32,6	67	190,6	
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	24	2	4	127	44,8	44,7	216,5	
Cambio de Parrillas Descarga	11	4	4	14	4,4	20,5	38,9	
Cambio Bomba de Lubricación	3	7	4	11,3	1,7	0	13	
Cambio Bomba de Levante	3	4	4	10	1,5	0	11,5	

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.2. Análisis Económico a Frecuencias óptimas de Inspección con Detención de Equipo.

Para poder realizar la comparación entre el antes y el después de la aplicación de las frecuencias óptimas, el estudio se realizó en el mismo horizonte de tiempo para ambos casos; equivalente al periodo del historial de fallas (5 años).

A continuación, en la tabla N° 5.2, se presenta una comparación entre los costos asociados a las frecuencias de inspección con detención de equipo.

**Tabla N° 5.2: Comparación entre frecuencia de inspecciones con detención de equipo.**

Modo Correctivo	Antes	Después
	<i>Costos [KUSD]</i>	<i>Costos [KUSD]</i>
Cambio Piñón	73,2	62,54
Cambio Descansos Alimentación-Descarga	73,2	62,54
Cambio de Parrillas Descarga	1,06	0,9
Cambio Bomba de Lubricación	4,5	0,91
Cambio Bomba de Levante	4,5	0,91

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3. Resultado Final.

En la tabla N° 5.3, se presenta un resumen de los costos totales antes y después de la aplicación del plan de mantenimiento y repuestos.

**Tabla N° 5.3: Resumen de comparación costos totales.**

Tipo	<i>Costos (KUSD)</i>			
	Antes	Después	Ahorro	% Ahorro
CGM Modos Correctivos Críticos	1107	470	637	57,5
Frecuencia Inspecciones con Detención de Equipo	156	127	29	18,6
<b>TOTAL</b>	<b>1263</b>	<b>598</b>	<b>666</b>	<b>52,7</b>

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla podemos ver que:

- Debido al plan de mantenimiento y al plan de repuestos que se está proponiendo, el ahorro alcanzado es de 637 [KUSD] en los 5 años, es decir, 127,4 [KUSD/año]. Por lo tanto, se puede apreciar que un plan de repuestos es sumamente vital para lograr la minimización de los CGM, pues se ataca el problema principal, que serían los costos de falla.
- Se puede apreciar que con las frecuencias óptimas de inspecciones con detención de equipo el ahorro alcanzado sería de 29 [KUSD], es decir, 5,8 [KUSD/año].
- Entonces, el ahorro total anual sería de 133,2 [KUSD], aproximadamente 85 millones de pesos chilenos. Los cuales podrían invertirse en la compra de otros repuestos, intervenciones preventivas, e incluso compra de nuevos equipos.

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSIONES**

- En el desarrollo del presente trabajo de título quedó demostrado que la falta de un plan de mantenimiento, la falta de un plan de repuestos y las recurrentes actividades asociadas a labores correctivas, no representan un escenario favorable para el buen funcionamiento del Molino de Bolas G y la economía de la empresa.
- En el desarrollo del análisis de criticidad y el modelo de confiabilidad, era de suma importancia aplicar e interpretar los datos con prudencia, puesto que la hoja de vida del molino presentaba grandes vacíos en la información de las fallas junto con una cantidad de datos muy escasa, entonces, a pesar de obtener valores que se ajustaban a la teoría, es probable que no hayan sido representativos. Por lo tanto, se recomienda imperativamente aplicar las listas de chequeo y reporte de fallas propuestas en el plan de mantenimiento, con el objetivo de comenzar a llevar un registro/historial del equipo que pueda ser utilizado más adelante.
- El FMECA permite visualizar e identificar modos de falla distintos a los entregados por el historial de fallas, otorgando información sumamente relevante sobre la función de los componentes, modos de falla, efectos y eventuales soluciones.
- Con la propuesta del plan de mantenimiento basado en la condición se espera que, con los hallazgos realizados, la tasa de fallas de los componentes disminuya y la ejecución de actividades preventivas aumente. Dando lugar a una mejora en la disponibilidad de los componentes y, por ende, del equipo.
- En el estudio del impacto económico se pudo apreciar que la frecuencia óptima de inspecciones no resultó ser tan relevante en cuanto a la minimización de los costos; pero aun así, es de suma importancia llevarlas a cabo, pues son las actividades que sustentan el plan de mantenimiento propuesto. Por otro lado, el plan de repuestos resultó ser uno de los puntos más relevantes respecto a la minimización de los Costos Globales de Mantenimiento (CGM), puesto que ataca los costos provocados por la no producción por falta de un componente (costo de falla); incidente que más tiempos muertos genera en la empresa. Por lo que se recomienda de forma imperativa aplicar el plan de repuestos.

- Finalmente, la propuesta del plan de mantenimiento debe ser considerada como un plan piloto dentro de compañía Minera Ojos del Salado, el cual irá mejorando con el tiempo en base a la mejor calidad de registros y los resultados obtenidos. La recomendación fundamental se basa, principalmente, en la realización y generación de políticas que permitan el desarrollo de un mantenimiento centrado en la confiabilidad, con la utilización de herramientas de gestión que permitan llevar un control y registro del equipo en base a inspecciones rutinarias; las cuales serán realizadas por el personal mecánico y administrativo de la empresa. Lo ideal sería que se impulse la implementación y seguimiento de este tipo de trabajo, pues los resultados se obtienen a mediano y largo plazo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Svarovsky and M.T. Thew. Hidrociclones Analysis and Applications, volume 53. 2013.
- [2] E.D. Ga'ívez, R. Cruz, P.A. Robles, and L.A. Cisternas. Optimization of dewatering systems for mineral processing. *Minerals Engineering*, 63(2014):110–117, 2014.
- [3] L.R. Plitt, B.C. Flintoff, and T.J. Stuffco. Roping in hydrocyclones. In *Proc. 3rd Int. Conf. Hidrociclones*, Oxford, BHRA (ed P. Wood) Elsevier, pages 21–34, 1987.
- [4] K.T. Hsieh and R.K. Rajamani. Mathematical model of the hydrocyclone based on physics of fluid flow. *AIChE Journal*, 37(5):735–746, 1991.
- [5] S.R. Knowles, D.R. Woods, and I.A. Feuerstein. The velocity distribution within a hidrociclones operating without an air core. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 51(3):263–271, 1973.
- [6] R.K. Dubey, E. Climent, C. Banerjee, and A.K. Majumder. Performance monitoring of a hidrociclones based on underflow discharge angle. *International Journal of Mineral Processing*, 154:41–52, 2016.
- [7] J.A. Gutierrez, T. Dyakowski, M.S. Beck, and R.A. Williams. Using electrical impedance tomography for controlling hydrocyclone underflow discharge. *Powder Technology*, 108(2-3):180–184, 2000.
- [8] Jara, A. (2014). Estudio de Mantenimiento Basado en la Confiabilidad Acodado al Sistema Asset Management Aplicado a la Flota de Bulldozer CAT D10T, Minera Anglo American Operación Mantoverde (Tesis de pregrado). Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile.
- [9] Mendoza, C. (2014). Estudio de Factibilidad en la Implementación de Mantenimiento Basado en Confiabilidad Aplicado a Equipos Médicos Críticos (Tesis de pregrado). Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

## ANEXO A

### SOFTWARE DE CONFIABILIDAD E INSPECCIONES

Para la ejecución de los cálculos desarrollados se utilizó el software de la compañía para facilitar el trabajo personal y, eventualmente, el trabajo del personal mecánico y administrativo de la compañía. Es importante mencionar que la aplicación de estos métodos es conveniente realizarla de manera iterativa, pues de esta forma se irá obteniendo una mayor precisión en los resultados finales junto con la mejora de las acciones de mantenimiento.

#### **Aplicación del Software.**

Antes de iniciar, primero se debe obtener un registro fidedigno de los acontecimientos correctivos del Molino de Bolas (cambio de componentes, fallas, limpiezas, inspecciones, entre otros), con el fin de aprovechar el máximo potencial del software. Para ello, deberán seguirse las recomendaciones del capítulo V como, por ejemplo: contar con la ayuda mutua entre mecánicos y operadores para poder aplicar las listas de chequeo propuestas y completar los reportes de falla de la manera más confiable posible, con el fin de que los resultados obtenidos representen de la mejor forma el comportamiento del equipo.

Posteriormente, cuando se tenga una base de datos sólida respecto a los acontecimientos correctivos, estos deberán ser ingresados en la planilla de datos del software junto con los datos correspondientes a los Costos Globales de Mantenimiento. Con esto, el programa irá entregando de forma instantánea diagramas de Pareto (CGM, N° detenciones y Horas detenidas) y Jack-Knife, además de seleccionar automáticamente los modos más críticos de cada análisis realizado. Luego, el usuario, en base a su criterio y los requerimientos de la empresa, deberá escoger uno de los métodos desarrollados para continuar con el análisis.

Después de haber seleccionado el método, el software evaluará si acepta o rechaza la hipótesis, en base al tamaño de la muestra, a través del test de Kolmogorov-Smirnov; en caso de aceptarla entregará inmediatamente el modelo de Weibull (curva de confiabilidad, curva de tasa de fallas y MTBF) para los modos pertenecientes al método de priorización seleccionado; en caso de rechazarla de igual manera arrojará el modelo de Weibull, pero con la advertencia de que el análisis no es representativo y que se recomienda tener una base de datos más robusta.

Posteriormente, el usuario deberá ingresar al software, para cada uno de los modos pertenecientes al método de priorización seleccionado, la cantidad de inspecciones mensuales junto con el tiempo invertido en ellas. Con esto, el programa arrojará la frecuencia de inspecciones óptimas para cada uno de los modos, con el fin de minimizar el CGM y las fallas correctivas.

Finalmente, con los datos que se encuentran dentro del software, se ejecuta inmediatamente la gestión óptima de repuestos. La cual podrá ser modificada por el usuario según la confiabilidad que desea en el sistema al momento de cambiar un componente.

Por otro lado, se podrán tomar acciones preventivas o predictivas según la condición en que se encuentren los componentes, y como resultado aumentar la confiabilidad del sistema junto con la prolongación de la vida útil de los mismos.

Respecto a la interpretación de los datos, hay que tener cuidado y bastante criterio, pues se toman varias consideraciones para la realización de los cálculos.

## ANEXO B

### SISTEMAS, SUB-SISTEMAS Y COMPONENTES DEL MOLINO G

A continuación, se muestra el desglose realizado al molino de bolas G.

Sistema	Sub-Sistema	Componente
1) Manto Cilíndrico	1.1) Cilindro	1.1.1) Lifters/Levantadores 1.1.2) Corazas 1.1.3) Anillo Periférico 1.1.3.1) Tapa Anillo 1.1.4) Manhole/Tapa de Registro 1.1.5) Pernos
2) Sistema Piñón-Corona	2.1) Corona	2.1.1) Pernos
	2.2) Contraeje	2.2.1) Descansos Contraeje 2.2.1.1) Pernos 2.2.2) Eje 2.2.2.1) Chaveta lado Inching Drive 2.2.2.2) Chaveta lado Embrague 2.2.3) Rodamientos
		2.3) Piñón
3) Sistema Girolento	3.1) Motor Eléctrico	3.1.1) Rodamientos
	3.2) Acople	3.2.1) Palanca de Accionamiento 3.2.2) Chaveta Acople
		3.3) Freno Hidráulico
	3.4) Inching Drive	3.4.1) Pines
4) Sistema de Lubricación	4.1) Sistema de Lubricación Descansos Molino Alimentación - Descarga	4.1.1) Estanque de Aceite 4.1.1.1) Termistor de Platino 4.1.2) Bomba de Levante Descansos 4.1.3) Motor de Bomba de Levante 4.1.4) Bomba de Lubricación Descansos 4.1.5) Motor de Bomba de Lubricación
	4.2) Sistema de Lubricación Piñón-Corona	4.2.1) Estanque de Grasa 4.2.1.1) Calentador 4.2.2) Bomba de Lubricación Piñón-Corona 4.2.3) Compresor 4.2.4) Inyectores
5) Sistema Motriz	5.1) Transformador	
	5.2) Tablero Eléctrico	
	5.3) Tablero PLC	
	5.4) Excitatriz	
	5.5) Motor Síncrono	5.5.1) Descansos Motor Síncrono 5.5.1.1) Pernos

6) Descansos de Molino	6.1) Descansos Alimentación - Descarga	6.1.1) Soporte 6.1.2) Cojinete de Deslizamiento Hidrostático 6.1.3) Carter de Aceite 6.1.4) Base de Soportes 6.1.5) Inyectores 6.1.6) Pernos
7) Sistema de Embrague	7.1) Unidad Neumática	7.1.1) Compresor
	7.2) Rotor Seal	
	7.3) Embrague	7.3.1) Zapatas 7.3.2) Chaveta Embrague 7.3.3) Pernos
8) Sistema Alimentación	8.1) Tapa de Alimentación	8.1.1) Lifters/Levantadores 8.1.2) Corazas 8.1.3) Sello Dinámico 8.1.4) Sello Estático 8.1.5) Pernos
	8.2) Ducto/Cono de Alimentación	8.2.1) Spout/Boquilla Alimentación 8.2.2) Trunnion Alimentación Helicoidal 8.2.3) Muñón Alimentación
	8.3) Cajón/Tacho de Alimentación	8.3.1) Parrillas/Revestimientos
9) Sistema Descarga	9.1) Tapa de Descarga	9.1.1) Lifters/Levantadores 9.1.2) Corazas 9.1.3) Tapa Central Descarga 9.1.4) Pernos
	9.2) Ducto/Cono de Descarga	9.2.1) Trommel Descarga Helicoidal 9.2.2) Muñón Descarga
	9.3) Cajón/Tacho de Descarga	9.3.1) Parrillas/Revestimientos
	9.4) Bombas Centrífugas del Hidrociclón	9.4.1) Rodamientos 9.4.2) Revestimientos (carcasa e impulsor) 9.4.3) Motor 9.4.4) Pernos
	9.5) Hidrociclón	9.5.1) Revestimientos 9.5.2) Distribuidor 9.5.3) Pernos

## **ANEXO C**

### **ANÁLISIS FMECA DE SISTEMAS BÁSICOS MOLINO G**

En este anexo se llevará a cabo el FMECA a cada uno de los sistemas que componen el Molino de Bolas, a través del modelo cualitativo. Se entregarán detalles de la función de los sistemas, los posibles modos de falla, las causas que ocasionan estas fallas, los efectos locales y a nivel superior, los métodos de detección, las acciones correctivas y la gravedad que poseen los modos de falla.

Los sistemas a los cuales se les realizará el análisis FMECA son los siguientes:

1. Manto Cilíndrico.
2. Piñón-Corona.
3. Girolento.
4. Lubricación.
5. Motriz.
6. Descansos Molino Alimentación-Descarga.
7. Embrague.
8. Alimentación.
9. Descarga.

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Manto Cilíndrico	Mover el mineral y las bolas que están encargadas de la conminución del mineral.	Fuga de carga	Rotura o mal apriete de pernos, tapa de alimentación y descarga mal instaladas, sello estático y dinámico mal instalados	Pérdida de carga de mineral, caída de revestimientos	Desgaste o abolladura de Manto Cilíndrico, rotura de bolas, salida de chips en la descarga, desgaste estanque de descarga, desgaste bombas de hidrociclón, desgaste de revestimientos	Molino no opera	Inspección visual, revisión de pernos, ruidos anormales en el molino	Verificar y corregir apriete de pernos, instalación de tapas y los sellos; reemplazar pernos cortados o con fallas; reemplazar sellos defectuosos;	2
			Tapa de registro mal sellada y desprendimiento	Pérdida de carga de mineral y bolas	Desgaste o abolladura de Manto Cilíndrico, destrucción de componentes externos producto de la expulsión de las bolas	Molino no opera	Inspección visual, revisión de tapa de registro	Verificar y corregir sello y cierre de la tapa de registro; reemplazar en caso de falla.	4
		Sonidos extraños, alta vibración, flujo en la descarga del molino es anormal	Bajo nivel de carga mineral, nivel de bolas normal	Desgaste prematuro y excesivo de revestimientos, rotura de bolas	Salida de chips en la descarga, desgaste estanque de descarga, desgaste revestimientos, desgaste bombas de hidrociclón e hidrociclones	Molino no opera	Cambio frecuente de impulsores de bombas, ruidos anormales en el molino, inspección visual cintas transportadoras de alimentación, inspección visual en los descansos, inspección visual en la descarga del molino, utilización de instrumentos	Controlar nivel de carga de mineral para mantener proporción óptima; controlar velocidad de las cintas transportadoras de alimentación;	2
			Alto nivel de bolas, nivel de carga de mineral normal					Controlar nivel de bolas para mantener proporción óptima; limpiar descansos en caso de que hayan virutas provocadas por desgaste o bien reemplazarlos	3
			Alto nivel de carga mineral, nivel de bolas normal	Desgaste prematuro y excesivo de revestimientos	Salida de carga de mineral gruesa, desgaste de los descansos, desgaste de bombas de hidrociclón e hidrociclones, desgaste del estanque de descarga	Molino no opera	Cambio frecuente de impulsores de bombas, inspección visual en la descarga del molino, inspección visual en los descansos (Viruta, color), utilización de instrumentos	Controlar nivel de carga de mineral para mantener proporción óptima; controlar velocidad de las cintas transportadoras de alimentación; limpiar descansos en caso de que hayan virutas provocadas por desgaste o bien reemplazarlos	2
			Bajo nivel de bolas, nivel de carga de mineral normal					Controlar nivel de bolas para mantener proporción óptima;	2

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Piñón-Corona	Encargado de transmitir el movimiento rotatorio a la Corona y Manto Cilíndrico	Sonidos extraños, alta vibración, calor	Mal montaje del conjunto, desalineamiento, desplazamiento, poca limpieza del conjunto, mal mecanizado de los componentes	Desgaste prematuro piñón	Ruptura piñón y eventualmente corona, deflexión del contraeje	Molino no opera	Ruidos anormales en Piñón-Corona, inspección visual, utilización de instrumentos, inspección sensorial	Verificar radio de contacto de la corona, verificar concentricidad del piñón, volver a realizar alineamiento si fuese necesario, reemplazar componentes si fuese necesario, comprobar mecanizado de piñón y corona	3
				Desgaste prematuro corona	Ruptura corona y eventualmente piñón, deflexión del contraeje	Molino no opera			3
				Desgaste prematuro de rodamientos contraeje	Ruptura de rodamientos, deflexión del contraeje	Molino no opera	Utilización de instrumentos, ruidos anormales en descansos contraeje, inspección visual, inspección sensorial		2
			Sistema de lubricación no funciona como corresponde o está contaminado	Degaste prematuro piñón-corona	Desgarramiento, ruptura de dientes, sobrecalentamiento y eventual fundición, desgaste abrasivo y adhesivo, corrosión, identificación de partículas	Molino no opera	Ruidos anormales en Piñón-Corona, inspección visual, inspección sensorial, utilización de instrumentos		Controlar nivel de grasa en estanque y rellenar si fuese necesario, revisar y limpiar los inyectores, destapar tuberías, reemplazar bombas si fuese el caso, cambio de filtros, revisar si hay fugas y reparar, controlar presión de las bombas y del sistema neumático

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Girolento	Permite que el equipo pueda partir de una manera más suave a través de un Inching Drive.	Motor no arranca	Falla suministro de energía	Motor funciona	Piñón-Corona no arranca, molino no se mueve;	Molino no opera	Verificar conexiones eléctricas y estado de fuente de alimentación	Reparar conexiones eléctricas en mal estado o estado de fuente de alimentación, reemplazar componentes en caso de ser necesario.	1
		Molino no gira	Rotura palanca de accionamiento	Acople no funciona		Molino no opera	Inspección visual y verificación de componentes	Reparar palanca de accionamiento, reemplazar si es necesario	2
		Dificultad al mover el molino	Alto nivel de carga	Rotura pines Inching Drive	Piñón-Corona no arranca, molino no se mueve; desgaste y fractura de los dientes del sistema Piñón-Corona producto del alto torque; Desgaste de los descansos del molino	Molino no opera	Inspección visual cintas transportadoras y pines Inching Drive, inspección visual en la descarga del molino	Reemplazar componentes y controlar nivel de carga de mineral para mantener proporción óptima; controlar velocidad de las cintas transportadoras de alimentación;	3

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Sistema Lubricación	Se encarga de proveer lubricante y mantener la temperatura óptima de los componentes.	Desgaste en varios componentes del Molino de Bolas, alza de temperatura	Baja capacidad de aceite lubricante, presión del sistema es demasiado baja (bomba muy desgastada, tubería de entrada tapada, tubería de entrada tiene pérdidas de aceite) , presión del sistema es demasiado alta (Bloqueo parcial en tuberías, falla de la válvula de sobreflujo, temperatura del aceite muy baja), presión del sistema es variable, bomba no suministra aceite, acumulación de material	Desgaste de piezas excesivo, agripamiento, fundición	Ruptura de distintos componentes	Molino no opera	Verificar nivel y temperatura de aceite; inspección visual de componentes (color oscuro); inspección sensorial	Reemplazar partes desgastadas de bombas, limpiar tuberías, agregar aceite al estanque, sellar tuberías en caso de fugas, regular presión de trabajo, regular temperatura de aceite, cambiar aceite si es necesario	3
			Baja capacidad de grasa lubricante, presión del sistema es demasiado baja, presión del sistema es demasiado alta, presión del sistema es variable, bomba no suministra grasa, inyectores bloqueados,	Desgaste de piezas excesivo, agripamiento, fundición	Ruptura y desgarramiento de distintos componentes	Molino no opera	Verificar nivel de grasa lubricante y temperatura de componentes, inspección visual de piping lubricación y neumático, inspección visual de componentes; inspección sensorial	Reemplazar partes desgastadas de bomba hidráulica, limpiar tuberías, agregar aceite al estanque, sellar tuberías en caso de fugas, regular presión de trabajo de bomba hidráulica, verificar estado de compresor y presión de trabajo, regular temperatura de grasa, limpiar y desobstruir inyectores junto con piping de lubricación y neumático	3

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Sistema Motriz	Permite otorgarle el torque necesario al Conjunto Piñón-Corona.	Molino no gira	Falla suministro de energía, falla excitatriz, voltaje muy bajo	Motor funciona	Posibles daños mayores	Molino no opera	Inspección visual	Verificar estado de componentes, conexiones y reparar; agregar película de aceite a los rodamientos del motor para ayudarlo en el giro	1
			Carga demasiado grande en el molino	Motor funciona	Posibles daños mayores	Molino no opera	Inspección visual, verificar carga dentro del molino	Se debe realizar una limpieza del interior del molino con la ayuda del Inching Drive (Girolento) hasta que se encuentre en un estado óptimo de operación	3
		Generación de calor en descansos del motor, alta vibración	Desalineamiento, mal montaje de los descansos y el conjunto	Desgaste prematuro de los descansos del motor	Ruptura de los rodamientos, deflexión del eje, problemas en otros componentes	Molino no opera	Ruidos anormales en descansos del motor, inspección visual y sensorial, utilización de instrumentos	Reemplazo de componentes y eventualmente realizar alineamiento	3

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Descansos Molino Alimentación - Descarga	Cumple la función de sostener el Manto Cilíndrico.	Sonidos extraños, alta vibración, calor	Gran aumento de carga en el interior del molino	Desgaste, fundición, agripamiento de los descansos del molino	Salida de carga de mineral gruesa; motor no opera; desgaste y fractura de los dientes del sistema Piñón-Corona producto del alto torque; Desgaste del estanque de descarga, bombas de hidrociclón e hidrociclones; desgaste prematuro y excesivo de revestimientos;	Molino no opera	Ruidos anormales, inspección visual cintas transportadoras de alimentación; inspección visual sistema piñón-corona; inspección visual descansos, utilización de instrumentos; inspección visual en la descarga del molino; cambio frecuente de impulsores de bombas; inspección sensorial	Controlar nivel de carga de mineral para mantener proporción óptima; controlar velocidad de las cintas transportadoras de alimentación	3
			Desalineamiento entre los descansos	Desgaste, fundición, agripamiento de los descansos del molino	Fractura de los dientes del sistema Piñón-Corona; deflexión del contraeje y rotura de los descansos del contraeje	Molino no opera	Ruidos anormales, alta vibración, utilización de instrumentos	Realizar alineamiento	3
			Sistema de lubricación no funciona como corresponde o está contaminado	Desgaste, identificación, fundición, agripamiento de los descansos del molino	Falla total de los descansos y posibles daños mayores	Molino no opera	Verificación del nivel de aceite en el estanque, fugas de aceite en tuberías, verificación de la presión de trabajo de las bombas, cambio frecuente de filtros, ruidos anormales, alta vibración, aumento de temperatura	Controlar nivel de aceite en estanque y rellenar si fuese necesario, revisar y destapar tuberías, reemplazar bombas si fuese el caso, cambio de filtros, revisar si hay fugas y reparar, controlar presión de las bombas, cambiar aceite en caso de ser necesario	3

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Sistema Embrague	Encargado de acoplar el Conjunto Motriz con el Conjunto Piñón-Corona.	Molino no gira	Presión del sistema neumático es demasiado bajo (fuga de aire a través de cañerías, compresor con averías)	Embrague no funciona	No hay transmisión de movimiento al Piñón-Corona	Molino no opera	Inspección visual del embrague; verificación de la presión de trabajo del compresor, inspección visual de cañerías y comprobación de fugas	Controlar presión de compresor y ajustar si es necesario, revisar si hay fugas y reparar; reparar componentes defectuosos de compresor y de ser necesario reemplazarlo	1
			Presión del sistema neumático es demasiado alto	Falla en el rotorseal (sello dinámico); desgaste prematuro de balatas y zapatas	Transmisión deficiente al Piñón-Corona y eventual falla	Molino no opera	Verificación de la presión de trabajo del compresor; inspección visual rotorseal	Controlar presión de compresor y ajustar si es necesario, reparación de rotorseal y si fuese necesario reparar	2
			Gran aumento de carga en el interior del molino	Rotura de zapatas, desgaste de balatas; corte de pernos de sujeción (debido al aumento de torque)	No hay transmisión de movimiento al Piñón-Corona	Molino no opera	Inspección visual, ruidos anormales en embrague	Controlar nivel de carga de mineral para mantener proporción óptima; controlar velocidad de las cintas transportadoras de alimentación; limpiar el interior del molino	3

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad
Sistema Alimentación	Permite la entrada de la carga de mineral al equipo.	Fuga de carga	Rotura o mal apriete de pernos	Pérdida de carga de mineral, caída de revestimientos	Mayor nivel de bolas dentro del molino, desgaste o abolladura de Manto Cilíndrico, rotura de bolas, desgaste de los revestimientos, salida de chips en la descarga, desgaste estanque de descarga, desgaste bombas de hidrociclón	Molino no opera	Ruidos anormales, alta vibración, inspección visual	Verificar y corregir apriete de pernos, reemplazar pernos cortados o con fallas	1
			Rotura estanque de alimentación	Pérdida de carga de mineral		Molino no opera		Verificación y reparación de estanque de alimentación	1
			Rotura Spout/Boquilla a alimentación	Pérdida de carga de mineral; contaminación de los descansos		Molino no opera		Verificación y reparación de Spout, de ser necesario reemplazar componente	2
			Mala instalación de sello dinámico y estático	Pérdida de carga de mineral; contaminación de los descansos		Molino no opera		Verificación y re-instalación de sellos, de ser necesario reemplazar sellos defectuosos	1
			Mala instalación de trunnion linner o desgaste de trunnion	Pérdida de carga de mineral; contaminación de los descansos		Molino no opera		Verificación y re-instalación de trunnion linner, de ser necesario reemplazar componente	2

Sistema	Función	Modo de Falla	Causas	Efectos Locales	Efectos de Nivel Superior	Efectos Finales	Métodos de Detección	Acciones Correctivas	Gravedad			
Sistema Descarga	Permite la salida de la carga de mineral tratada del equipo.	Fuga de carga	Rotura o mal apriete de pernos	Pérdida de carga fina, caída de revestimientos	Falla en bombas por aireación (revestimientos), mala clasificación de los hidrociclones	Molino no opera	Inspección visual, ruidos anormales en bomba e hidrociclones	Verificar y corregir apriete de pernos, reemplazar pernos cortados o con fallas	1			
			Rotura estanque de descarga	Pérdida de carga fina		Molino no opera		Verificación y reparación de estanque de descarga	1			
			Mala instalación trommel de descarga o desgaste de trommel	Pérdida de carga fina		Molino no opera		Verificación y re-instalación de trommel, de ser necesario reemplazar componente	2			
		Sonidos extraños, alta vibración, flujo en la descarga del molino es anormal	Gran aumento de carga en el interior del molino; bajo nivel de bolas; mala fabricación parrillas	Desgaste excesivo estanque de descarga, desgaste excesivo parrillas de descarga		Salida de carga de mineral gruesa; Desgaste del estanque de descarga, bombas de hidrociclón e hidrociclones; desgaste prematuro y excesivo de revestimientos; mala clasificación de mineral	Molino no opera	Inspección visual en la descarga del molino, ruidos anormales en bomba e hidrociclones, frecuente cambio de impulsores	Controlar nivel de carga de mineral para mantener proporción óptima; controlar velocidad de las cintas transportadoras de alimentación; limpiar descansos en caso de que hayan virutas provocadas por desgaste o bien reemplazarlos	3		
			Mayor nivel de bolas ; baja carga mineral; mala fabricación bolas						Salida de chips en la descarga, desgaste bombas de hidrociclón e hidrociclones; mala clasificación de mineral		Molino no opera	Controlar nivel de bolas para mantener proporción óptima; limpiar descansos en caso de que hayan virutas provocadas por desgaste o bien reemplazarlos
			Gran aumento de carga y muy bajo nivel de bolas						No hay flujo de descarga (Parrillas Tapadas)		Falla de bombas de hidrociclón por aireación	Molino no opera

## ANEXO D

### PROPUESTA DE HIDROCICLÓN CAVEX 500 CVX

#### Weir Minerals Latín América

San José 0815  
San Bernardo  
Santiago de Chile  
T: +56 (2) 7542100

W: www.weirminerals.cl

De Oficina  
Copiapó

T: +56 (52) 215511  
F: +56 (52) 214944

Excellent  
Minerals  
Solutions



Copiapó, 09 Abril del 2014

Señores  
Cía. Contractual Minera Ojos del Salado  
Sr.: Héctor Quevedo

#### Propuesta de Hidrociclón CAVEX 500 CVX.

Estimados señores, junto con saludar hacemos entrega en la presente propuesta tendiente a mejorar la clasificación en la sección de molienda unitaria.

Para este estudio nos hemos basado en los datos entregados del balance realizado al Molino de Bolas Allis Chalmers N° 2 y hemos simulado la condición actual. A su vez hemos realizado una simulación del máximo tonelaje que sería posible procesar por el circuito, utilizando los hidrociclones CAVEX.

Queremos destacar que nuestra propuesta considera el cambio de Hidrociclón completo por la Tecnología CAVEX, la cual ha demostrado en muchas pruebas contra resultado ser el Hidrociclón más eficiente del mercado, con bajos niveles de desgaste, transformándose en el hidrociclón preferido en la mayoría de las plantas concentradoras de nuestro país.

La instalación del Hidrociclón puede realizarse reemplazando Hidrociclón por Hidrociclón, sin la necesidad de cambios mayores, tarea de instalación que ofrecemos sea realizada por nuestro equipo de servicio, sin costo para la Cía. Minera Ojos del Salado.

**WARMAN®**  
Centrifugal Slurry Pumps  
**VULCO®**  
Wear Resistant Linings  
**GEHO®**  
PD Slurry Pumps  
**CAVEX®**  
Hydrocyclones  
**FLOWAY®**  
**PUMPS**  
Vertical Turbine Pumps  
**ISOGATE®**  
Slurry Valves  
**MULTIFLO®**  
Mine Dewatering Pumps  
**HAZLETON®**  
Specialty Slurry Pumps  
**LEWIS PUMPS™**  
Vertical Chemical Pumps  
**BEGEMANN**  
**PUMPS™**  
Centrifugal Process Pumps



## Weir Minerals Latín América

San José 0815  
San Bernardo  
Santiago de Chile  
T: +56 (2) 7542100

W: www.weirminerals.cl

De Oficina  
Copiapó

T: +56 (52) 215511  
F: +56 (52) 214944

Excellent  
Minerals  
Solutions



### 1.- Propuesta Comercial

A continuación detallamos los elementos requeridos para la implementación de esta prueba y los costos asociados a ella.

Para su instalación se requiere el cambio de:

- Hidrociclón
- Ductos de alimentación y overflow
- Camisa de descarga
- Fabricación de abrazadera para soporte de Hidrociclón

Item	Cant	Código	Descripción	Valor Unitario	Valor Total
1	1	CICLON500CVX002	Hidrociclón Cavex 500 CVX	US\$ 7.920	US\$ 7.920
2	1		Reducción de alimentación a hidrociclón		
3	1		Reducción de over flow de hidrociclón		
4	1		Camisa de Under Flow de Hidrociclón		
Totales					US\$ 7.920

Tabla 1.1.- Precios Dolares americanos

### 2.- INSTALACIÓN 01 UNIDAD 500 CVX

La instalación del Hidrociclón CAVEX, modelo 500CVX en el molino N°2, se realizará sobre la actual estructura; Se requiere nuevo soporte para permitir el pivoteo del Hidrociclón según el ángulo de trabajo requerido, además de las reducciones de alimentación, overflow y camisa de descarga.

**WARMAN®**  
Centrifugal Slurry Pumps  
**VULCO®**  
Wear Resistant Linings  
**GEHO®**  
PD Slurry Pumps  
**CAVEX®**  
Hydrocyclones  
**FLOWAY®**  
**PUMPS**  
Vertical Turbine Pumps  
**ISOGATE®**  
Slurry Valves  
**MULTIFLO®**  
Mine Dewatering Pumps  
**HAZLETON®**  
Specialty Slurry Pumps  
**LEWIS PUMPS™**  
Vertical Chemical Pumps  
**BEGEMANN**  
**PUMPS™**  
Centrifugal Process Pumps



## Weir Minerals Latín América

San José 0815  
San Bernardo  
Santiago de Chile  
T: +56 (2) 7542100

W: www.weirminerals.cl

De Oficina  
Copiapó

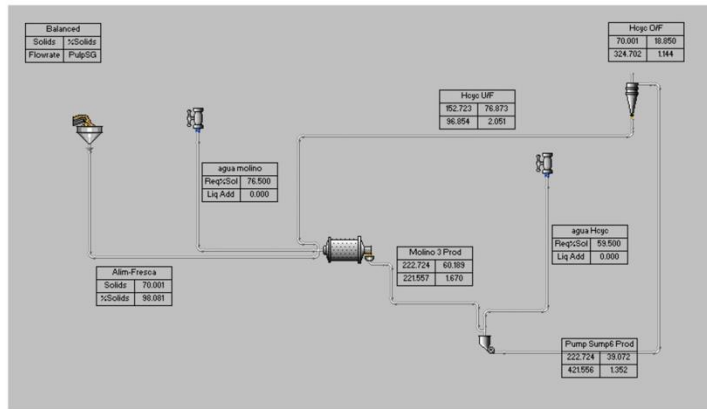
T: +56 (52) 215511  
F: +56 (52) 214944

Excellent  
Minerals  
Solutions



### 3.- Soporte integral y simulaciones

El objetivo principal de esta prueba, es optimizar la operación del circuito molienda-clasificación. Para ello ponemos a disposición de Cía. Minera Ojos del Salado nuestras herramientas de simulación y know how en el modelamiento de circuitos en estado estacionario mediante la utilización del software JK SimMet el cual nos permite mediante los datos obtenidos en terreno analizar el comportamiento del circuito como conjunto.



Se entregará sin costo adicional a la prueba las simulaciones y recomendaciones operacionales realizadas.

Por otra parte, este es un servicio ofrecido a todos nuestros clientes que hoy en día utilizan la tecnología CAVEX.

### 4.- Condiciones Comerciales y alcances Objetivos y evaluación

Tal como se ha planteado se propone realizar una prueba de un Hidrociclón CAVEX, modelo 500CVX cuyos objetivos son:

- Disminuir el cortocircuito de agua para llegar un valor cercano al 22%.
- Disminuir el Bypass de fino a un valor inferior al 30%

**WARMAN®**  
Centrifugal Slurry Pumps  
**VULCO®**  
Wear Resistant Linings  
**GEHO®**  
PD Slurry Pumps  
**CAVEX®**  
Hydrocyclones  
**FLOWAY® PUMPS**  
Vertical Turbine Pumps  
**ISOGATE®**  
Slurry Valves  
**MULTIFLO®**  
Mine Dewatering Pumps  
**HAZLETON®**  
Specialty Slurry Pumps  
**LEWIS PUMPS™**  
Vertical Chemical Pumps  
**BEGEMANN PUMPS™**  
Centrifugal Process Pumps



## Weir Minerals Latín América

San José 0815  
San Bernardo  
Santiago de Chile  
T: +56 (2) 7542100

W: www.weirminerals.cl

De Oficina  
Copiapó

T: +56 (52) 215511  
F: +56 (52) 214944

Excellent  
Minerals  
Solutions



- Obtener una carga circulante de alrededor de un 100%; siempre y cuando los dos objetivos anteriores se cumplan.
- Aumentar el tonelaje en un 5% ( 70 tph Actual)
- Mantener el tamaño de corte actual ( $P_{80}=200 \mu\text{m}$ ) con el fin de no mermar la recuperación de la planta
- Mejorar el parámetro alfa (agudeza de la clasificación) a un valor superior a 1.0

Molino 3					
	Lagrange	JKSimMet	Esperado	CAVEX	unidades
Alim Hcyc	59,5	66,8	60,0	60,0	[% sol peso]
Overflow	49,3	52,1	49,0	49,0	[% sol peso]
Underflow	79,6	76,8	77,0	77,0	[% sol peso]
Bypass finos	29,1	32,2	< 30	< 30	[%]
Bypass agua	17,0	41,6	22,6	22,6	[%]
Carga Circulante	81,9	216,7	101,7	101,7	[%]
P80	200,0	200,0	200,0	200,0	[micrones]
Tratamiento	70,0	70,0	70,0	70,0	[t/h]
Caudal Pulpa Hcyc	132,1	189,3	144,5	144,5	[m3/h]
Parámetro Alfa	< 1	-	> 1	> 1	[-]

Tabla 1.2.- Mejoras del circuito con Tecnología CAVEX

**WARMAN®**  
Centrifugal Slurry Pumps  
**VULCO®**  
Wear Resistant Linings  
**GEHO®**  
PD Slurry Pumps  
**CAVEX®**  
Hydrocyclones  
**FLOWAY®**  
**PUMPS**  
Vertical Turbine Pumps  
**ISOGATE®**  
Slurry Valves  
**MULTIFLO®**  
Mine Dewatering Pumps  
**HAZLETON®**  
Specialty Slurry Pumps  
**LEWIS PUMPS™**  
Vertical Chemical Pumps  
**BEGEMANN**  
**PUMPS™**  
Centrifugal Process Pumps



## Weir Minerals Latín América

San José 0815  
San Bernardo  
Santiago de Chile  
T: +56 (2) 7542100

W: www.weirminerals.cl

De Oficina  
Copiapó

T: +56 (52) 215511  
F: +56 (52) 214944

Excellent  
Minerals  
Solutions



### 5.- Tiempo de ejecución Prueba:

La prueba tendrá un tiempo de ejecución de 4 meses, en los cuales el primer periodo será para la puesta a punto del equipo, el segundo periodo para estabilizar la operación y un tercer periodo para realizar el análisis comparativo en distintas condiciones de operación.

Se recomienda se realice una evaluación preliminar a fines del segundo mes.

### Toma de muestra y análisis de los datos.

La toma de las muestras y el procesamiento de estas, se realizará por parte de Cía. Minera Ojos del Salado, con presencia de personal Weir Vulco.

Los resultados de estos muestreos, serán analizados por ambas partes.

### Instalación del Hidrociclón:

La ingeniería de detalle requerida para la instalación del Hidrociclón CAVEX modelo 500CVX, y lo que sea necesario para su instalación, será responsabilidad de Weir Vulco así como también la ejecución de la instalación.

Cía. Minera Ojos del Salado, prestara apoyo con operador de puente grúa.

### 6.- Alcances Comerciales.

- Weir Minerals, desea agregar valor a la gestión de Cía. Minera Ojos del Salado.  
Por tal motivo y con el convencimiento de que los ciclones CAVEX cumplirán con todas las expectativas, ofrece las siguientes condiciones comerciales.
- Al final de la prueba, cuatro meses, se evaluarán los resultados alcanzados respecto de los objetivos planteados en nuestro protocolo, Si los resultados alcanzados cumplen con las expectativas operacionales y económica, Cía. Minera Ojos del Salado cancelará el valor de esta propuesta.
- En el caso de que Cía. Minera Ojos del Salado, decida suspender la prueba por alguna decisión ajena a los resultados hasta ese momento alcanzados, Cía. Minera Ojos del Salado cancelará solo los revestimientos utilizados en la prueba.
- En ningún caso Weir Mineral Vulco será responsable de Lucro Cesante.

**WARMAN®**  
Centrifugal Slurry Pumps  
**VULCO®**  
Wear Resistant Linings  
**GEHO®**  
PD Slurry Pumps  
**CAVEX®**  
Hydrocyclones  
**FLOWAY®**  
**PUMPS**  
Vertical Turbine Pumps  
**ISOGATE®**  
Slurry Valves  
**MULTIFLO®**  
Mine Dewatering Pumps  
**HAZLETON®**  
Specialty Slurry Pumps  
**LEWIS PUMPS™**  
Vertical Chemical Pumps  
**BEGEMANN**  
**PUMPS™**  
Centrifugal Process Pumps



## Weir Minerals Latin América

San José 0815  
San Bernardo  
Santiago de Chile  
T: +56 (2) 7542100

W: [www.weirminerals.cl](http://www.weirminerals.cl)

De Oficina  
Copiapó

T: +56 (52) 215511  
F: +56 (52) 214944

Excellent  
Minerals  
Solutions



- De no ser exitosa la prueba, es de responsabilidad Weir Vulco el retiro de Hidrociclón CAVEX y el montaje del antiguo Hidrociclón; con la ayuda del operador del puente grúa suministrado por Cía. Minera Ojos del Salado.
- Los materiales serán entregados en bodega de Cía. Minera Ojos del Salado los cuales serán llevados a planta por cuenta Weir Minerals.
- Cía. Minera Ojos del Salado, prestara apoyo con un operador de puente grúa, para realizar las maniobras de izaje del Hidrociclón.

**WARMAN®**  
Centrifugal Slurry Pumps  
**VULCO®**  
Wear Resistant Linings  
**GEHO®**  
PD Slurry Pumps  
**CAVEX®**  
Hydrocyclones  
**FLOWAY®**  
**PUMPS**  
Vertical Turbine Pumps  
**ISO GATE®**  
Slurry Valves  
**MULTIFLO®**  
Mine Dewatering Pumps  
**HAZLETON®**  
Specialty Slurry Pumps  
**LEWIS PUMPS™**  
Vertical Chemical Pumps  
**BEGEMANN**  
**PUMPS™**  
Centrifugal Process Pumps

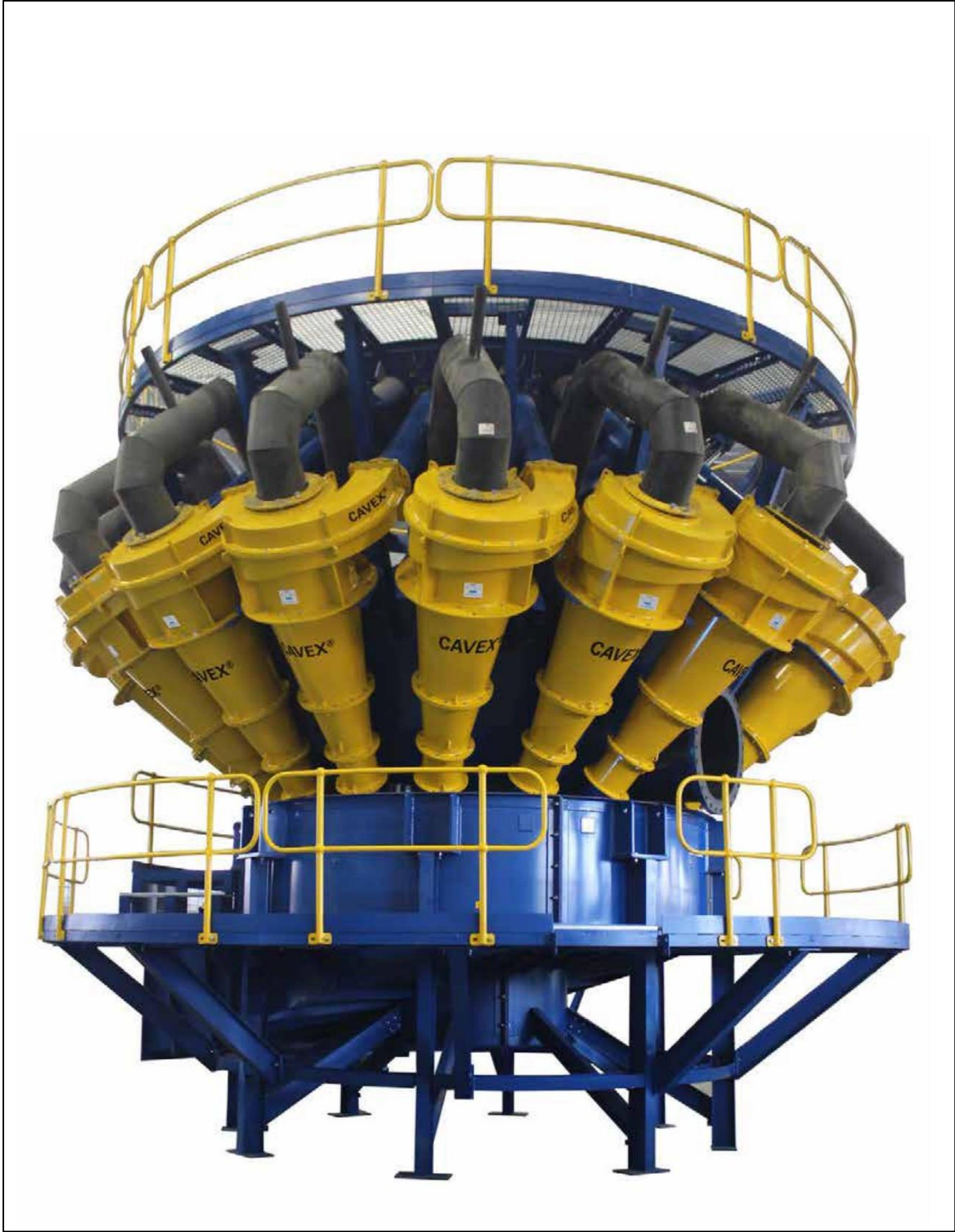


Eduardo Cepeda  
Jefe de Ingeniería  
Weir Minerals

Héctor Quevedo  
Superintendente de operaciones  
Cía. Minera Ojos del Salado

**ANEXO E**  
**HIDROCICLONES CAVEX**





**Con una geometría de entrada en espiral laminar, los hidrociclones Cavex® están diseñados para entregar una excelente eficiencia, capacidad y larga vida útil.**



El innovador diseño de los hidrociclones Cavex® brinda una excelente eficiencia de clasificación y capacidad hidráulica, lo que reduce el número de hidrociclones requeridos para una tarea dada.

Con una amplia gama de buscadores de vórtices y tamaños de ápex, nuestros hidrociclones ofrecen una flexibilidad operacional máxima.

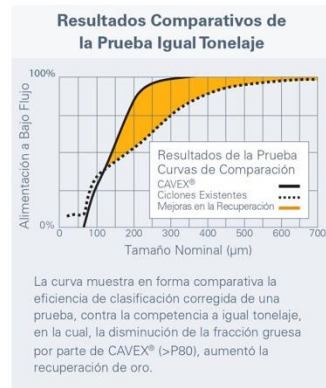
Los hidrociclones Cavex® ofrecen:

- Mejorar la eficiencia del proceso de clasificación
- Altas capacidades unitarias
- Carcasas de alta resistencia
- Una amplia gama de opciones de revestimientos resistentes al desgaste para maximizar la vida útil

#### Características de diseño

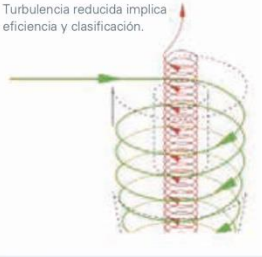
- La forma Cavex®: entrada en espiral laminada, está diseñada para entregar una excelente eficiencia de separación y capacidad hidráulica, así como también una máxima vida útil de la cámara de alimentación.
- Carcasas de poliuretano o acero al carbono resistentes a la corrosión.
- Está disponible una amplia gama de tamaños en buscadores de vórtice y ápex.
- Múltiples ángulos de conos.
- Múltiples diámetros de entrada de la cámara de alimentación.
- Opciones especializadas para maximizar aún más la eficiencia del hidrociclón Cavex®.

## Maximice su capacidad hidráulica, aumente la capacidad del circuito y obtenga una mayor vida útil.



### Diseño CAVEX®= Alta Recuperación

Turbulencia reducida implica eficiencia y clasificación.



### Turbulencia= Partículas desclasificadas

Pero con diseños convencionales...



### Cómo funciona

El diseño geométrico en espiral laminar proporciona un camino natural al flujo dentro del hidrociclón Cavex®. Su forma única, sin bordes agudos ni ángulos rectos, permite que el flujo de alimentación se combine de mejor forma con la pulpa, girando dentro de la cámara de alimentación.

### Incrementando la capacidad del circuito

Para aplicaciones de circuito de molienda, los hidrociclones Cavex® aumentan la capacidad del circuito al minimizar la cantidad de elementos finos que se desvían hacia el flujo inferior. Esto se logra maximizando el diámetro del núcleo de aire al interior del hidrociclón, gracias al diseño hidráulico del hidrociclón Cavex®.

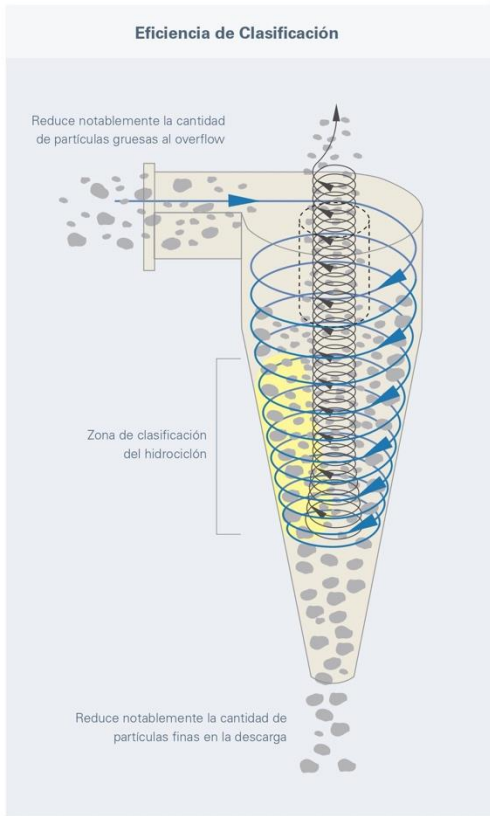
### Un flujo mejorado significa más con menos

Los hidrociclones Cavex® están diseñados para maximizar el volumen de pulpa procesada al minimizar la resistencia del flujo dentro de la cámara de alimentación, lo cual permite reducir la cantidad de los hidrociclones requeridos.

### Mayor vida útil

Se ha comprobado que los hidrociclones Cavex® entregan hasta tres veces la vida útil de los revestimientos de la cámara de alimentación bajo las mismas aplicaciones.

Los hidrociclones Cavex® pueden ser suministrados sin revestimiento o con una variedad de materiales resistentes al desgaste desarrollados por Weir Minerals. La gama de opciones incluye revestimientos de elastómeros, tile de cerámica, cerámicos monolíticos, revestimientos de uretano y fundición blanca.



## Opciones especializadas de vanguardia para maximizar aún más la eficiencia del hidrociclón Cavex®.

### Incrementa capacidad y eficiencia con los hidrociclones Cavex® equipados con Air Core Booster™ (ACB)

Los hidrociclones Cavex® equipados con nuestros dispositivos ACB™ patentados, están diseñados para incrementar la capacidad y la eficiencia de los hidrociclones, reduciendo la presión requerida y aumentando la partición volumétrica del flujo al overflow.

El dispositivo ACB™ permite el uso de grandes ápex para un bypass de agua dado hacia el underflow, lo cual produce un núcleo de aire más grande y más estable, incrementando la capacidad reduciendo el bypass de fino.

El ACB™, por otra parte, permite disminuir la probabilidad de que el hidrociclón opere bajo condición de acordonamiento, o su bloqueo.



#### Hidrociclones Cavex® de poliuretano

El hidrociclón Cavex® de poliuretano está sólidamente construido y es capaz de entregar una excelente eficiencia de separación, capacidad hidráulica, así como una vida útil del revestimiento de cámara de alimentación más larga que los diseños convencionales.

- Ligero
- Exterior resistente a la corrosión
- Bajo costo

#### Hidrociclones Cavex® DE

El hidrociclón Cavex® DE es una unidad de clasificación de doble efecto que trabaja en una sola etapa, sin necesidad de bombeo intermedio.

El hidrociclón Cavex® DE genera un muy bajo bypass de finos hacia el underflow y al mismo tiempo reduce los desclasificados gruesos de partículas hacia el overflow.

La característica principal del hidrociclón Cavex® DE es su mecanismo de control interno, el cual permite la remoción de la capa viscosa, liberando el material fino atrapado y controlado la partición de masa entre la primera y segunda etapa de clasificación, aumentando con ello la eficiencia global de clasificación.

El Cavex® DE está diseñado para la clasificación de materiales finos, lo cual lo convierte en el equipo ideal para la separación de relaves, concentrados, entre otros.

#### Cánisters de hidrociclones Cavex®

Nuestros cánister de hidrociclones Cavex® entregan un método único de agrupamiento de pequeños hidrociclones de poliuretano, permitiendo altas capacidades con una disminución significativa del espacio utilizado.

- Diseño compacto
- Bajo desgaste
- Alta capacidad por unidad
- 40CVX cánister 30-50 m3/hora
- 100CVX cánister 100-150 m3/hora



Arriba: Hidrociclones Cavex® DE con ACB™ instalados en una mina en Chile.

En el medio: Cánister de hidrociclón Cavex® 40CVX funcionando en una mina en Brasil.

Abajo: Hidrociclón Cavex® 150CVX.

## Los hidrociclones Cavex® son los más eficientes para numerosas aplicaciones y entornos operativos.

### Aplicaciones y revestimientos

Los hidrociclones Cavex® están disponibles en una amplia gama de tamaños y revestimientos para adecuarse a los requerimientos específicos de su operación. Están hechos a la medida para la minería, industria del carbón y otros requerimientos del procesamiento de minerales tales como clasificación y desaguado. Nuestros hidrociclones Cavex® son perfectos para circuitos de molienda, relaves y etapas unitarias o múltiples de deslamado. Los hidrociclones Cavex® se utilizan también para varios tipos de aplicaciones de medios densos, como el procesamiento de diamantes y limpieza de carbón.

#### Aplicaciones de los Hidrociclones Cavex®

APLICACIÓN	40CVX	100CVX	150CVX	250CVX	400CVX	500CVX	650CVX	700CVX	800CVX	1000CVX	1200CVX
Separación de medio denso				■	■	■	■	■	■	■	■
Circuito de molienda		■	■	■	■	■	■	■	■		■
Arena y gravilla		■	■	■	■	■	■	■	■		■
Relaves		■	■	■	■	■	■	■	■		■
Fosfato	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■
Concentrado de Mineral	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■
FGD/Cal	■	■	■	■	■						
Oil & Sands	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■
Clasificación de Carbón			■	■	■	■	■	■			
Remolienda	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Aguas residuales	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■

#### Revestimientos de los Hidrociclones Cavex®

MODELO	PU SÓLIDO	CERÁMICOS MONOLÍTICOS	REV. DE URETANO	REV. CON ELASTÓMERO	CARCASA DE POLIURETANO REFORZADO	CARCASA METÁLICA	TILE DE CERÁMICA	HIDROCICLÓN CAVEX® DE	ACB™
40CVX	■	■							
100CVX	■	■		■	■	■			
150CVX	■	■	■	■	■	■			
250CVX	■	■	■	■	■	■	■	400/250	■
400CVX		■	■	■	■	■	■	500/400	■
500CVX		■	■	■		■	■	650/500	■
650CVX		■	■	■		■	■		■
700CVX		■		■		■			■
800CVX		■		■		■	■		■
1000CVX						■	■		
1200CVX				■		■	■		



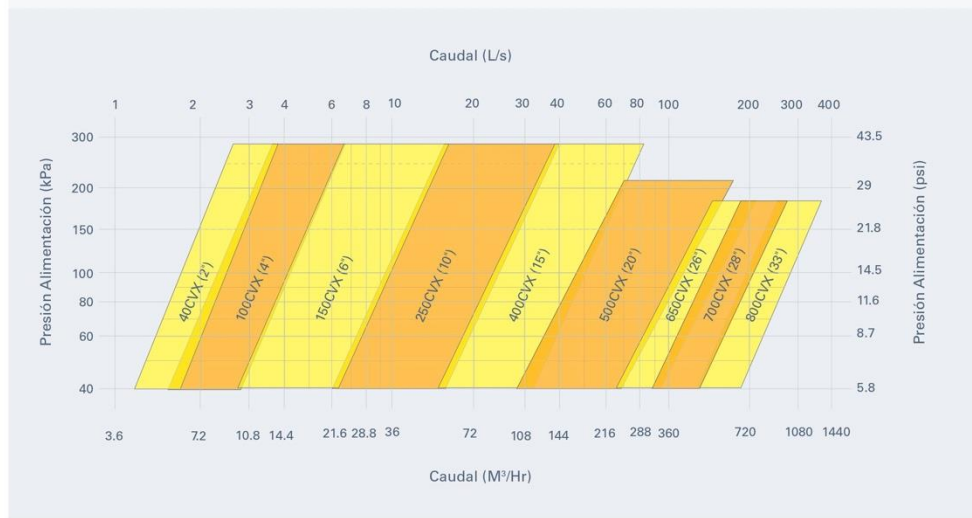
**Modelos 100, 150, 250 y 400**

- Carcasa de plástico reforzado con fibras (FRP).
- Revestimientos de elastómero con montaje a presión y reemplazables y revestimiento de cerámico disponibles.
- Abrazaderas de liberación rápida de acero inoxidable.
- Buscadores de vórtices de poliuretano, elastómero e hipercromo.
- Apex de elastómero, uretano o cerámica.
- Descargas overflow en HDPE moldeado y acero revestido en elastómero.
- También disponibles con carcasas metálicas.
- ACB™ disponible para modelos 250CVX y 400CVX.

**Modelos 500, 650, 700 y 800**

- Carcasas de acero estructurado o fundición.
- Revestimientos de elastómero reemplazables hasta 45 mm de espesor. Revestimiento de cerámica disponible.
- Buscadores de vórtices de elastómero
- Apex de elastómero o cerámica
- Ductos overflow en acero, revestido en elastómero o dispositivo ACB™ disponible.

**Capacidades de los Hidrociclones Cavex® (aproximadas)**



**Nuestro compromiso es entregar a nuestros clientes diseños de hidrociclones a medida, toda nuestra experiencia y servicio técnico, para maximizar la producción y al mismo tiempo minimizar el costo total de operación.**



Arriba: Sensor de monitoreo conectado al ACB™ de un hidrociclón Cavex®.

Abajo: Sistema de monitoreo instalado en hidrociclón Cavex® en una mina en Chile.

#### Sistema de Monitoreo Cavex®

Nuestro sistema de monitoreo permite evaluar a distancia sus hidrociclones Cavex® para asegurar que operan de forma continua con un máximo rendimiento.

Este sistema puede detectar las condiciones subestándar de funcionamiento del hidrociclón, tales como el acordonamiento, para asegurar que se maximice el rendimiento en todo momento.

#### Cómo funciona

Los sensores fijados al exterior de su hidrociclón Cavex® detectarán alteraciones y el sistema le mostrará en tiempo real el estado de la operación de su equipo.

El sistema de monitoreo registra la historia operacional de los hidrociclones Cavex® en forma unitaria, recolectando y archivando datos de todos los cambios de condición.

Los datos almacenados en el sistema pueden ser transmitidos al DCS, lo cual permite acceder a información operacional en tiempo real.



**Nuestro equipo de Weir Minerals Services™: su socio de confianza**

Los hidrociclones Cavex® cuentan con el soporte de la amplia red de Servicios Weir Minerals™. Nuestros expertos están a su disposición para apoyarle en todo momento, donde sea que esté.

Nuestro equipo de expertos trabajará en conjunto para entregar:

- Un análisis completo del rendimiento del hidrociclón para:
  - Incrementar el tratamiento
  - Aumentar la eficiencia
  - Reducir el consumo de energía
  - Reducir el consumo de agua
- Soluciones de baterías a medida
- Revestimientos a medida para maximizar la vida útil y la confiabilidad

Nuestro equipo de expertos puede diseñar baterías de hidrociclones que se adaptan a los espacios existentes para dar respuesta a desafíos operacionales y de mantenimiento.

Nuestra experiencia asegura que su operación y sus equipos tengan un rendimiento óptimo. Trabajamos con usted para lograr la máxima productividad y eficiencia para su operación, combinada con opciones comerciales flexibles.

Contamos con una red global capaz de proveer servicios en terreno, o en uno de nuestros 150 centros de servicio alrededor del mundo.





## Minerals

Casa Matriz  
 Av. San José 0815,  
 San Bernardo, Santiago, Chile  
 T +56 2 2754 2200  
 F +56 2 2859 5686  
 chile.minerals@mail.weir  
 www.minerals.weir

WARMAN® Centrifugal Slurry Pumps  
 GEHO™ PD Slurry Pumps  
 LINATEX® Rubber Products  
 VULCO® Wear Resistant Linings  
 CAVEX® Hydrocyclones  
 ENDURON® Comminution Equipment  
 FLOWAY® Vertical Turbine Pumps  
 ISOGATE® Slurry Valves  
 DELTA INDUSTRIAL™ Knife Gate Valves  
 MULTIFLO® Mine Dewatering Solutions  
 HAZLETON™ Specialty Slurry Pumps  
 LEWIS® Vertical Chemical Pumps  
 TRIO™ Comminution Equipment  
 WEIR MINERALS SERVICES™

### Nuestras Oficinas de Ventas y Servicios en Latinoamérica

#### Chile

##### Iquique

Barrio Industrial, Ruta A-616, Lote 4  
 Manzana 5, Alto Hospicio  
 T +56 (57) 249 0645  
 +56 (57) 249 0644  
 vulco.iquique@mail.weir

##### Antofagasta

Radomiro Tomic 7585  
 T +56 (55) 288 3910  
 +56 (55) 288 3940  
 vulco.antofagasta@mail.weir

##### Calama

Parque Industrial APIAC, Sitio N°10  
 Camino Antofagasta s/n  
 T +56 (55) 231 4932  
 F +56 (55) 231 0206  
 vulco.calama@mail.weir

##### Copiapó

Ruta 5 Acceso Sur N°425  
 Block 2, Módulos 1-8  
 T +56 (52) 248 3400  
 vulcocopiapo@mail.weir

##### La Serena

Eduardo de la Barra 251, Casa Interior  
 T +56 (51) 221 8125  
 F +56 (51) 221 8183  
 vulco.laserena@mail.weir

#### Argentina

##### Centro de Servicios

Ruta 40 N° 6431 Sur (Colectora Oeste)  
 Departamento Pocito  
 Provincia de San Juan, Argentina  
 T +54 (264) 428 1333  
 +54 (264) 428 7130  
 argentina.minerals@mail.weir

#### Brasil

Av. José Benassi 2151  
 Cond. Indl. FAZGRAN  
 Cep: 13213-085, Jundiá, SP, Brasil  
 T +55 (11) 2448 9200  
 F +55 (11) 2448 9211  
 brazil.minerals@mail.weir

Belo Horizonte, Minas Gerais  
 Rua Manoel Pereira Mendes, 275  
 Cinco, Contagem, MG, Brasil  
 CEP 32010-040

T +55 31 3311 1888  
 F +55 31 3311 1899  
 brazil.minerals@mail.weir

Vitória, Espírito Santo  
 Rua 2 B N 293, Quadra 3  
 Lotes 23 e 24, CIVIT II, Serra, ES, Brasil  
 CEP 29168-068  
 T +55 27 2127 4700  
 F +55 27 2127 4707  
 brazil.minerals@mail.weir

Carajás, Pará  
 Rua Rio Azul, 230, Beira Rio  
 Parauapebas, Pará, Brasil  
 CEP 68.515-000  
 T +55 94 3356 0602  
 brazil.minerals@mail.weir

#### Colombia

Carrera 43B # 16-41  
 Edif. Staff, Ofc 904  
 Medellín, Antioquia, Colombia  
 T+ 57 4 536 0046  
 F +57 4 536 0046  
 colombia.minerals@mail.weir

#### Perú

##### Lima

Av. Separadora Industrial 2201  
 Urbanización Vulcano, Ate, Lima, Perú  
 T +51 (1) 618 7575  
 F +51 (1) 618 7576  
 peru.minerals@mail.weir

##### Cajamarca

Av. Evitamiento Norte 302  
 Cajamarca, Perú  
 T +51 (76) 343 859  
 peru.minerals@mail.weir

##### Arequipa

Urb. Industrial Cayro,  
 Manzana "D", Lote 8, Arequipa, Perú  
 T +51 (54) 465 353  
 F +51 (54) 463 131  
 peru.minerals@mail.weir

#### México

##### Monterrey

Nafta 775, Parque Stiva Aeropuerto  
 Apodaca, Nuevo León, México  
 T +52 (81) 8131 2400  
 mexico.minerals@mail.weir

##### Chihuahua

Ecuador 212 Col. Panamericana  
 CP 31210, Chihuahua, Chihuahua  
 T +52 (614) 414 5300  
 mexico.minerals@mail.weir

##### Querétaro

Acceso 11 No. 1 Int. 4  
 Zona Industrial Benito Juárez  
 Querétaro, Qro. C.P. 76120  
 T +52 (442) 218 1449  
 mexico.minerals@mail.weir

##### Sonora

Carretera a Bacoachi Km. 1 s/n  
 Cananea C.P. 84623, Sonora  
 mexico.minerals@mail.weir

Copyright © 2017, Weir Minerals Australia Ltd. All rights reserved. WARMAN is a trademark and/or registered trademark of Weir Minerals Australia Ltd and Weir Group African IP Ltd; CAVEX, ACCUMIN and MULTIFLO are trademarks and/or registered trademarks of Weir Minerals Australia Ltd; GEHO is a trademark and/or registered trademark of Weir Minerals Netherlands bv; FLOWAY is a trademark and/or registered trademark of Weir Floway Inc.; VULCO is a trademark and/or registered trademark of Vulco SA; ISOGATE is a trademark and/or registered trademark of Weir do Brasil Ltda.; LINATEX is a trademark and/or registered trademark of Linatex Ltd; ENDURON is a trademark and/or registered trademark of Weir Minerals Europe Ltd; WEIR is a trademark and/or registered trademark of Weir Engineering Services Ltd. AU0578/112014.

