

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA**

**PROPUESTA PARA PLAN DE MANTENIMIENTO EN MOLINO DE ALTA  
INTENSIDAD (HIGMILL)**

Trabajo de Titulación para optar al  
Título de INGENIERO EN  
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

Alumno: Franco Balbontin Ramos

Profesor Guía: Cristian Cuadra

**2023**

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b>	<b>1</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>2</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>4</b>
<b>SIGLAS Y SIMBOLOGÍA</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>6</b>
OBJETIVO GENERAL	7
OBJETIVO ESPECÍFICO	7
<b>1 ANTECEDENTES GENERALES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>8</b>
1.1 Contexto operacional	9
1.2 Descripción del equipo	11
1.2.1 Elementos de desgaste.	15
1.3 Descripción del problema	17
1.3.1 Primeros antecedentes de fallas	17
1.3.2 Problemas de mantenimiento	19
1.3.3 Problemas de eficiencia	21
<b>2 ELECCIÓN DE METODOLOGIA Y HERRAMIENTAS DE ESTA</b>	<b>23</b>
2.1 Elección de estrategia de mantenimiento	24
2.2 Proceso de implementación de RCM	27
2.2.1 Concepto del RCM	27
2.2.2 Pasos clave del proceso de implementación RCM	27
2.3 División e identificación del equipo	32
2.3.1 Componentes de la etapa de alimentación	33
2.3.2 Componentes de la etapa de molienda	33
2.3.3 Componentes de la etapa de descarga	35
2.4 Aplicando RCM al equipo seleccionado	37
2.4.1 Aplicando herramientas para RCM	39
<b>3 DEFINICION DE TAREAS DE MANTENIMIENTO Y ANALISIS DE COSTO</b>	<b>52</b>
<b>V/S BENEFICIOS</b>	<b>52</b>
3.1 Curvas de calibración del equipo	53
3.2 Historial de mantenciones	55
3.2.1 Costos principales de cada mantención	56
3.3 Costo de implementación del plan propuesto	60
<b>CONCLUSION</b>	<b>63</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Vista aérea de la planta SGO .....	10
Figura 1-2: Ubicación de HIGmill y de los principales activos de SGO.....	10
Figura 1-3: Vista general .....	11
Figura 1-4: Vista exterior de molino HIG .....	12
Figura 1-5: Vista interior de molino HIG .....	13
Figura 1-6: Vista interior de anillos estacionarios.....	13
Figura 1-7: Conceptos básicos de conminución.....	14
Figura 1-8: Flowsheet y ubicación típica de molino HIG .....	14
Figura 1-9: Esquema de ensamble de eje.....	15
Figura 1-10: Imágenes de componentes .....	16
Figura 1-11: Liners o revestimientos de carcasa.....	16
Figura 1-12: Trabajo al interior del molino .....	17
Figura 1-13: Rotor con rotura .....	19
Figura 1-14: Ejemplo de algunas de las herramientas especiales .....	20
Figura 1-15: Ejemplo de curva de calibración para 30% de medios de molienda.....	21
Figura 2-1: Patrones de falla.....	30
Figura 2-2: Esquema típico del bloque de válvulas de alimentación .....	33
Figura 2-3: Detalle de componentes del ensamble de eje.....	34
Figura 2-4: Vista general del interior del cuerpo del molino.....	34
Figura 2-5: Motorreductor y unidad lubricadora.....	35
Figura 2-6: Tolva de medios de molienda .....	36
Figura 2-7: Flujograma del proceso de RCM .....	37
Figura 2-8: Ejemplo de registros de fallas en componentes .....	39
Figura 2-9: Diagrama Pareto.....	40
Figura 2-10: Ejemplo de datos para Diagrama Jack Knife.....	42
Figura 2-11: Calculo para límites de Diagrama Jack Knife.....	42
Figura 2-12: Diagrama Jack Knife .....	42
Figura 2-13: Matriz de criticidad.....	48
Figura 2-14: Ejemplo de tabla de probabilidad de detección.....	49
Figura 2-15: Ejemplo de tabla de probabilidad de severidad.....	50
Figura 2-16: Ejemplo de tabla de probabilidad de ocurrencia .....	50
Figura 2-17: Clasificación de subsistemas según RPN .....	51
Figura 2-18: Ejemplo de matriz para RPN. ....	51

Figura 3-1: Curva de calibración para 30% de medios.....	54
Figura 3-2: Curva de calibración para 40% de medios.....	54
Figura 3-3: Curva de calibración para 50% de medios.....	54
Figura 3-4: Rotor con falla.....	55
Figura 3-5: Calendario de mantenciones para molinos .....	58

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2-1: Ejemplo de “Hoja de Análisis” .....	45
Tabla 2-2: Ejemplo de “Hoja de Análisis” .....	46
Tabla 2-3: Jerarquización de activos según matriz de criticidad .....	48
Tabla 3-1: Costos de componentes de eje.....	56
Tabla 3-2: Costos de Liners de interior de molino.....	56
Tabla 3-3: Costo de recursos asignados.....	57
Tabla 3-4: Costos totales anuales de mantenimiento .....	58
Tabla 3-5: Costos de mantenimiento proyectados a 24 meses.....	61

## **SIGLAS Y SIMBOLOGÍA**

### **A. SIGLAS**

HIG: High Intensity Grinding

SGO: Spence Growth Project

OPEX: Operational Exchange

RCM: Reliability Centered Maintenance

SX: Solvent Extraction

EW: Electro Winning

TPD: Toneladas por día

TMF: Tonelada Métrica Fina

STM: Swiss Tower Mills

CIO: Centro Integrado de Operaciones

PLC: Programmable Logic Controller

USD: Dólares Americanos

EUR: Euros

### **B. SIMBOLOGÍA**

t: toneladas

m<sup>3</sup>: metros cúbicos

µm: micrómetros

F80: tamaño correspondiente al 80% del pasante acumulado en la alimentación fresca (µm)

P80: tamaño correspondiente al 80% del pasante acumulado en los finos del último ciclo (µm)

## **INTRODUCCIÓN**

En el siguiente trabajo, se abordará de la manera más clara posible, la problemática de dos aristas provenientes de la adquisición de un equipo con una tecnología completamente nueva en Chile; un molino de alta intensidad, conocido comercialmente como HIGmill (High Intensity Grinding Mill).

Este equipo de procedencia suiza fue instalado en el año 2019 en Minera Spence en el marco del proyecto SGO (Spence Growth Option), que es la implementación de la nueva planta concentradora de la minera perteneciente a BHP.

Este molino, al ser de una tecnología completamente nueva para el usuario y también para el proveedor a nivel nacional, traía consigo una serie de interrogantes a la hora de generar estrategias de mantenimiento y más aún a la hora de ejecutarlas. Temas tales como horas de duración de ciertos componentes, intercambiabilidad de algunas válvulas, rotación de repuestos, montaje, desmontaje, etc.

El equipo, además, fue comisionado en periodo de pandemia, por lo que la ejecución de este paso no fue la óptima debido a las limitaciones de personal y desplazamientos que había. Por otro lado, el personal de comisionamiento, venían con tiempo limitado desde Suiza y Rusia, así que no alcanzaron a completar de manera debida este proceso. Esto trajo como consecuencia, que el equipo no fuese calibrado de manera optimo en su consumo de potencia, medios de molienda, niveles de llenado de pulpa y agua, velocidades de giro y presiones de alimentación.

Con todas estas barreras de entrada, actualmente el equipo no está trabajando de la manera más eficiente, los operarios se ven enfrentados a diferentes problemas relacionados con los puntos mencionados anteriormente, la duración de los elementos de desgaste no está relacionada con algún patrón o con tasas de desgaste predecibles, por lo que el área de mantenimiento no puede establecer planes claros de mantención. Según datos obtenidos de otras plantas en el mundo que poseen estos equipos y que tienen perfiles de mineral similares a los de la Región de Atacama, la duración de los elementos de desgaste bordea los 8 a 10 meses, pero sin embargo en Minera Spence, se está trabajando con una estrategia de mantención cada 3 meses, lo que genera 4 detenciones del área al año, sumado a que son 2 equipos, estamos hablando de 8 detenciones programadas al año, lo que genera un alto impacto en la continuidad operacional de la planta. Se suma a esto el uso de recursos, dotación de personal, repuestos, insumos, etc. Por lo que el OPEX está teniendo niveles demasiado altos para la operación en general. Es por estos motivos, que nace la necesidad de generar un plan de mantenimiento para el equipo en sí, para sus periféricos (válvulas, bombas, reductor) y además trabajar en la optimización del equipo del punto de vista operacional. Para esto, se generará un RCM para el equipo y se determinará su estrategia de mantenimiento. En paralelo, se analizará el funcionamiento del equipo, se realizarán

curvas de calibración y se generara con esto, una guía para el operario a modo de poder saber en qué punto de la curva se encuentra y con esto tener una visibilidad del consumo de potencia del equipo versus el volumen de pulpa tratado y el nivel de medio de molienda respectivo.

### **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un plan de mantenimiento estableciendo la metodología RCM para aumentar confiabilidad y reducir costos.

### **OBJETIVO ESPECÍFICO**

- Identificar problema actual de mantenibilidad y costos, analizando el historial del equipo y los antecedentes recopilados en planta para así poder pasar a la elección de metodología.
- Proponer la metodología ideal para un plan de mantenimiento, identificando y jerarquizando todos los componentes críticos del equipo para definir prioridades entre los elementos de desgaste, repuestos capitales y elementos periféricos (bombas, válvulas, instrumentos, etc.).
- Definir tareas de mantenimiento realizando el respectivo análisis técnico - económico para ver la factibilidad de la implementación.

**1 ANTECEDENTES GENERALES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

## **ANTECEDENTES GENERALES.**

En este primer capítulo, se abordará netamente la problemática relacionada con el equipo del punto de vista operacional, de proceso y del mantenimiento.

Además, se explicará a grandes rasgos como es el equipo en sí, su funcionamiento y su estructura, su partes y piezas y otros detalles importantes, para poder tener una idea más concreta de lo que se seguirá hablando en los demás capítulos.

### **1.1 CONTEXTO OPERACIONAL**

Minera Spence se ubica sobre 1750 msnm en la comuna de Sierra Gorda en la Provincia de Antofagasta, Región de Antofagasta a aproximadamente 50 km al suroeste de Calama y 150 km al noreste de Antofagasta. Esta faena inició sus operaciones en diciembre de 2006. El año 2017 la producción de cobre fino fue 198.039 tmf. Spence, es un yacimiento de pórfidos de cobre con cuatro zonas mineralizadas: mineral oxidado, mineral de sulfuro enriquecido, mineral mezclado y mineral de sulfuro hipógeno. El proceso se inicia con la extracción del mineral, en un proceso de extracción a rajo abierto convencional. La mina fue diseñada para extraer 50.000 t/d de uno u otro mineral, óxido o sulfuro en diferentes fracciones al día. Minerales e óxidos y sulfuros son alimentados en campañas separadas a la unidad de chancado primario, lo que requiere acopiar el mineral por separado.

dependiendo de la campaña, el mineral oxidado o sulfurado se envía alternadamente a una planta de chancado en 3 etapas (primario, secundario y terciario). Posteriormente, el mineral de la campaña en cuestión es alimentado desde un silo mediante alimentadores y correas transportadoras a tambores aglomeradores donde se acondiciona con ácido sulfúrico concentrado. A continuación, se listan los procesos involucrados en las operaciones de Spence: Mina, Chancado Primario, Chancado Secundario y Terciario, Aglomeración, Lixiviación, SX (Extracción por Solvente), EW (Electro obtención).

En el año 2020 se inaugura la planta concentradora SGO (Spence Growth Project), el cual busca extender la vida útil del yacimiento en 50 años más. Además, esta planta le permite a Spence proyectarse en el largo plazo a través del tratamiento de los minerales hipógenos mediante una planta concentradora, que operará en conjunto con el actual proceso de lixiviación FullSal minerales mixtos. SGO contempla una inversión de US\$2.460 millones. A grandes rasgos, comprende una nueva planta concentradora que será capaz de procesar cerca de 95.000 tpd.

Es en este contexto, en el que Minera Spence (Figura 1-1), realiza la adquisición de 2 molinos de alta intensidad, con el fin de incrementar la recuperación del mineral en la zona de remolienda, es decir, después de la batería de hidrociclones (Figura 1-2), que es donde ya el mineral se va a la etapa de flotación y espesación.

Estos molinos fueron adquiridos a través de la empresa Outotec (hoy parte de Metso), y es un equipo diseñado en una asociación estratégica con la empresa STM (Swiss Tower Minerals), la cual se especializa en etapas de remolienda enfocada en granulometría bajo los 50  $\mu\text{m}$ .

Figura 1-1: Vista aérea de la planta SGO



Google. (s.f.). [Fotografía aérea de planta SGO]. Recuperado 2023, de <https://www.mch.cl/wp-content/uploads/2021/01/SGO.jpg>

Figura 1-2: Ubicación de HIGmill y de los principales activos de SGO



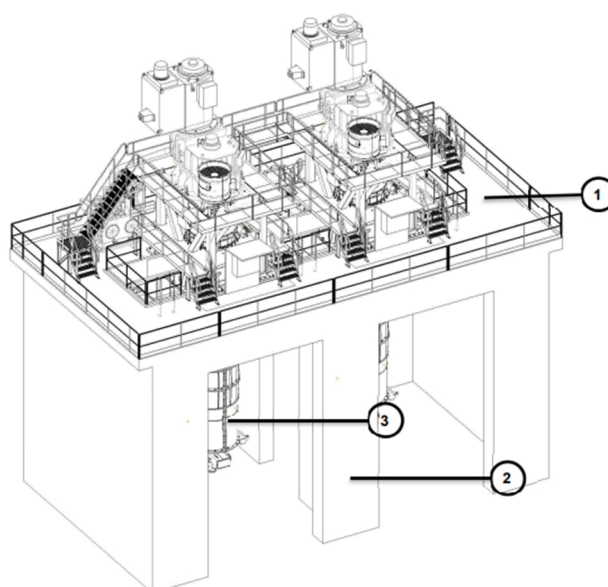
Google. (s.f.). [Esquema de planta]. Recuperado 2023, de [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTkehubic8QxiZtHmbn3wZuPS-BiicTsxbb56F7XxRGHabe6OblXsyrFMvJuyqIamjSX\\_Q&usqp=CAU](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTkehubic8QxiZtHmbn3wZuPS-BiicTsxbb56F7XxRGHabe6OblXsyrFMvJuyqIamjSX_Q&usqp=CAU)

## 1.2 DESCRIPCION DEL EQUIPO

El molino HIG, es un equipo enfocado en la molienda fina y ultrafina, generalmente llamada remolienda, ya que viene del reproceso del material saliente de la batería de hidrociclones, que es la configuración más común para estos equipos.

El molino se sitúa de manera vertical (entrando en la categoría de molinos verticales) y comprende de un cuerpo o shell cilíndrico el cual en su interior esta recubierto por revestimientos y anillos estacionarios que forman recamaras de molienda a lo largo de este (Figura 1-3). Al molino lo atraviesa un eje, también revestido y con rotores de molienda por cada recamara formada en el cuerpo. La cantidad de rotores dependerá del tamaño del equipo, en los molinos más grandes puede haber hasta 20 rotores.

*Figura 1-3: Vista general*



*Manual de mantenimiento HIGmill. (2019). [Vista general de estructura instalada]. Recuperado 2023*

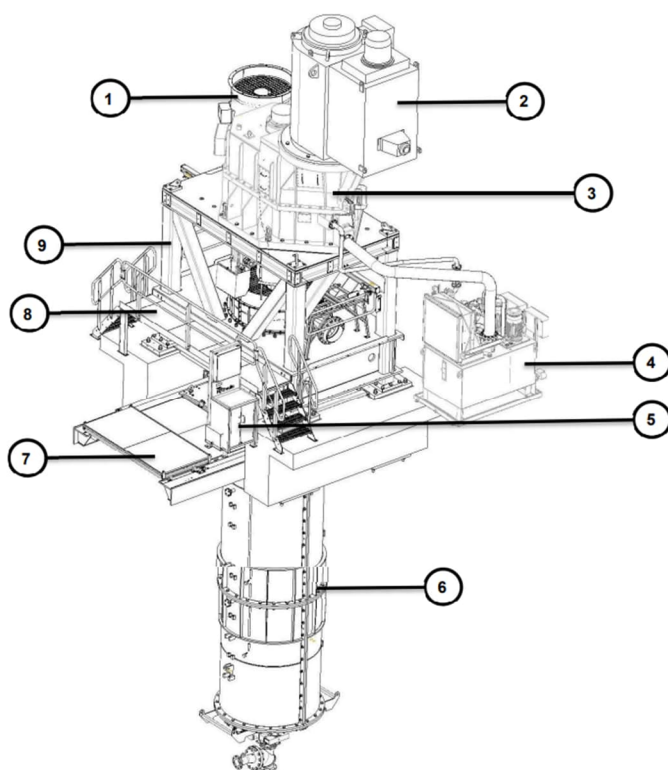
- 1 – Plataforma principal de HIGmill
- 2 – Fundaciones
- 3 – Molinos

El equipo es accionado por un motorreductor que se encuentra en la parte más alta de la torre y este reductor es el encargado de generar el movimiento rotativo del eje con sus respectivos rotores, para así ir generando la molienda por abrasión en cada de estas recamaras formadas por los anillos estacionarios (Figura 1-4).

El molino es alimentado por la zona inferior, mediante líneas de pulpa y agua. La descarga se encuentra en la zona superior, y el mineral va subiendo por efecto de la misma presión de la línea y por el movimiento rotatorio de los rotores.

La molienda se realiza mediante bolas de cerámica de aproximadamente 4 a 6 mm de diámetro.

Figura 1-4: Vista exterior de molino HIG

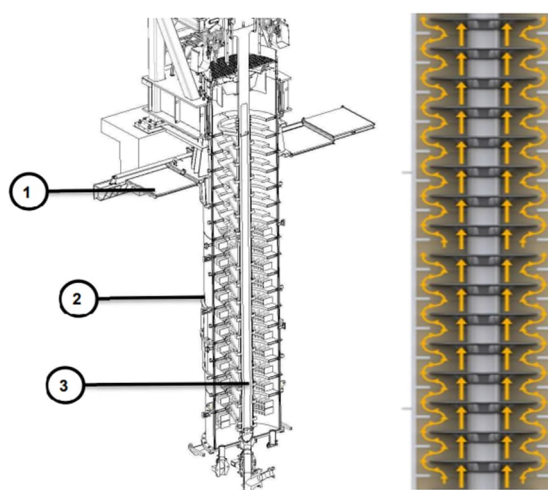


*Manual de mantenimiento HIGmill. (2019). [Vista general de molino]. Recuperado 2023*

- 1- Tolva de medios de molienda
- 2- Motor trifásico
- 3- Reductor
- 4- Unidad de lubricación
- 5- Unidad de separación de carcasa
- 6- Carcasa de molino
- 7- Plataforma de separación de carcasa
- 8- Plataforma de mantenimiento
- 9- Bastidor de molino

Debido a la disposición del cuerpo del molino vertical alto y estrecho, los materiales de molienda se distribuyen de manera uniforme y las partículas minerales permanecen en contacto constante (Figura 1-5), lo que aumenta significativamente la eficiencia de la molienda. El equipo se llena hasta un 70% de su volumen con este medio de molienda cerámico.

Figura 1-5: Vista interior de molino HIG

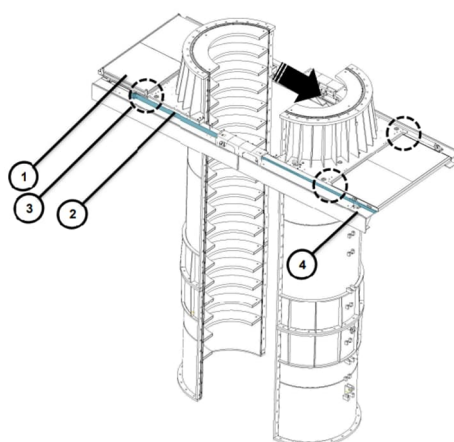


Manual de mantenimiento HIGmill. (2019). [Corte transversal de cuerpo de molino]. Recuperado 2023

- 1- Sistema de separación de carcasa
- 2- Carcasa de molino
- 3- Ensamble de eje y rotores

A medida que el material va subiendo por cada recámara de molienda (Figura 1-6), cada vez va disminuyendo más su granulometría por cada recámara que va pasando. Como se mencionó anteriormente, este equipo está diseñado para trabajar bajo el umbral de los 50  $\mu\text{m}$  (P80), teniendo una alimentación de hasta 150  $\mu\text{m}$  (F80).

Figura 1-6: Vista interior de anillos estacionarios



Manual de mantenimiento HIGmill. (2019). [Vista de carcasa de molino separada mediante el dispositivo neumático].

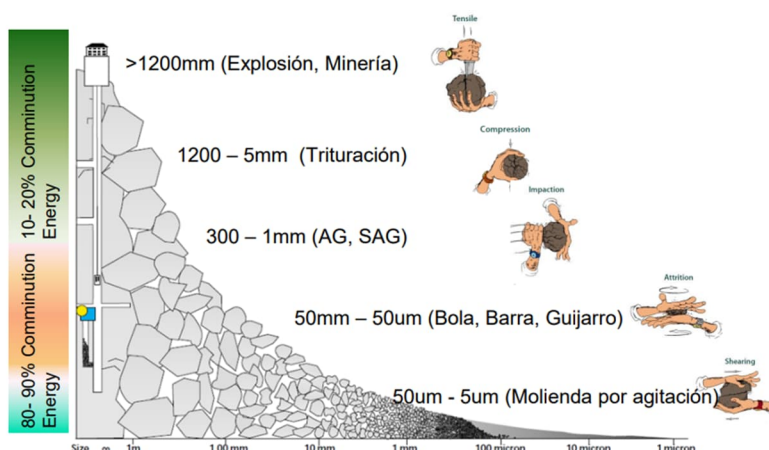
Recuperado 2023

- 10- Grating
- 11- Cilindros de separación de carcasa
- 12- Posición para cilindro vertical
- 13- Riel

Al tratarse de molienda fina y ultrafina, el equipo trabaja bajo grandes fuerzas de abrasión, la molienda para esta granulometría se basa en la agitación del mismo mineral, mezclado

con medios de molienda (Figura 1-7). Esto genera un alto impacto en el desgaste de los elementos internos del equipo.

Figura 1-7: Conceptos básicos de conminución



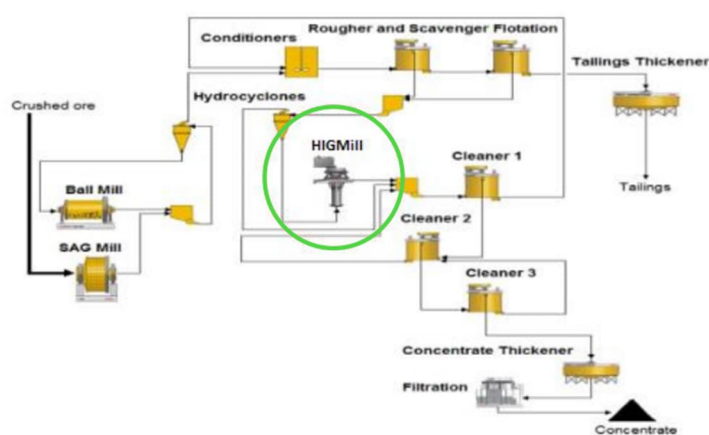
Material de capacitación Metso. (2019). [Diferentes tipos de granulometría y sus formas de molienda]. Recuperado 2023

En la siguiente figura, se puede apreciar en el diagrama de flujo, la configuración más común para la ubicación de este tipo de molino.

En una configuración típica sin molinos de este tipo, la descarga del underflow en los hidrociclones, puede ir a reproceso o directamente a relave, es por eso por lo que este equipo es clave en la recuperación bajo el umbral de los 50  $\mu\text{m}$ .

Como se aprecia en el diagrama (Figura 1-8), la descarga del hidrociclón va hacia el molino HIG para la remolienda y posterior a esto, la descarga del HIG va a cajones de descarga. Dependerá de la configuración de la planta, donde redirige este material luego del proceso del molino HIG.

Figura 1-8: Flowsheet y ubicación típica de molino HIG



Material de capacitación Metso. (2019). [Flowsheet típico de plantas concentradoras y posicionamiento típico de HIGmill].

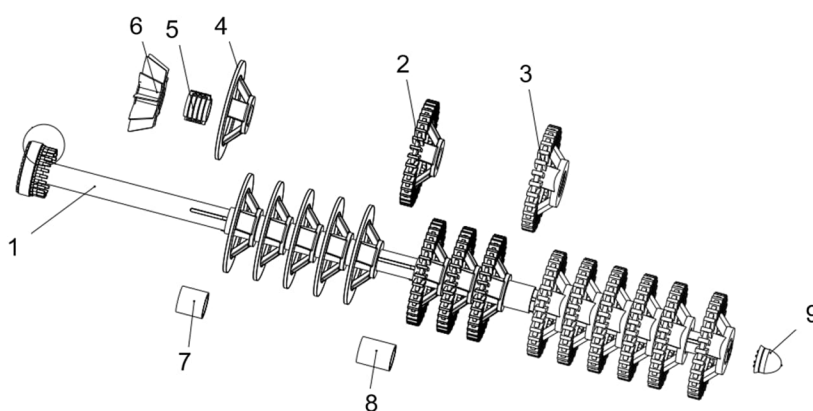
Recuperado 2023

### 1.2.1 Elementos de desgaste.

A continuación, se explica brevemente en qué consisten los elementos internos del equipo. Es importante mostrar este detalle, para poder entender parte de los problemas y analizar luego el plan de mantenimiento realizado.

Como se comentó anteriormente, el equipo posee un eje el cual atraviesa todo el cuerpo de molino. Este eje lleva en toda su extensión (Figura 1-9), 17 rotores de acero laminado revestidos en caucho, los cuales están separados por tubos espaciadores también de acero laminado y revestidos en caucho (Figura 1-10).

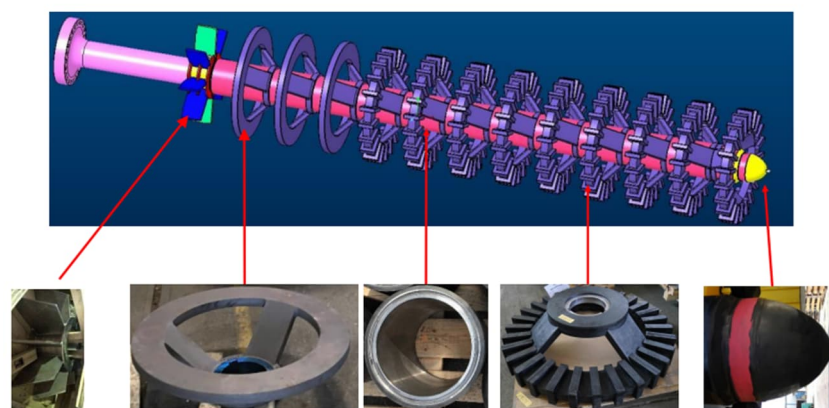
Figura 1-9: Esquema de ensamble de eje



Manual de mantenimiento HIGmill. (2019). [Explosión de eje de HIGmill y su respectiva distribución de rotores]. Recuperado 2023

- 1- Eje
- 2- Rotor almenado
- 3- Rotor almenado
- 4- Rotor liso
- 5- Prensa
- 6- Impulsor
- 7- Espaciador
- 8- Espaciador
- 9- Tapa de extremo de eje

Figura 1-10: Imágenes de componentes



Material de capacitación Metso. (2019). [Muestra en detalle de componentes reales de eje]. Recuperado 2023

A su vez, la carcasa o Shell del molino, se encuentra recubierto en su interior por una serie de revestimientos de poliuretano que a su vez están separados por anillos estacionarios también fabricados en poliuretano (Figura 1-11). Estos cubren todo el interior del cilindro de la carcasa y van subdivididos en 6 secciones para cada mitad.

Figura 1-11: Liners o revestimientos de carcasa

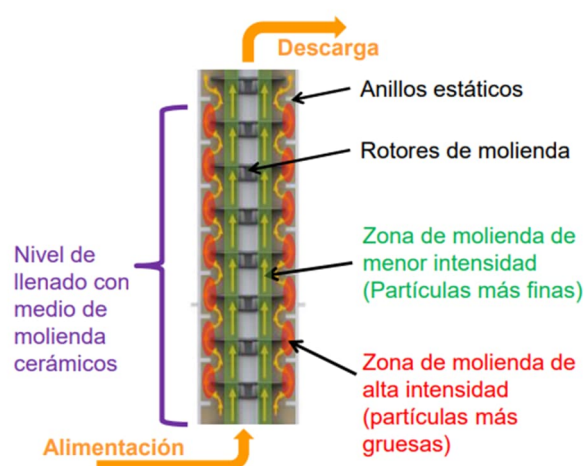


Material de capacitación Metso. (2019). [Fotografía de interior de molino mostrando disposición de revestimientos]. Recuperado 2023

- 1- Respaldo de revestimiento
- 2- Anillo estático

Cabe destacar, que, debido a la manera de alimentar este molino, es decir con una alimentación de pulpa desde la parte inferior (Figura 1-12), los elementos inferiores tienen tasas de desgaste superiores a los elementos superiores, tanto para rotores como revestimientos. Esto debido a que la zona inferior, es una zona de trabajo con partículas más gruesas, por lo tanto, una zona de molienda de alta intensidad. A medida que el mineral va subiendo, va reduciendo su tamaño y volviéndose más fino, por lo que se generan zonas de molienda de menor intensidad.

Figura 1-12: Trabajo al interior del molino



Material de capacitación Metso. (2019). [Muestra de distribución de material a lo largo del cuerpo del molino].

Recuperado 2023

### 1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La adquisición de estos molinos trajo consigo una serie de desafíos para los equipos de mantención y de operación. Si bien hubo capacitaciones formales al personal, tanto para la operación, la lógica y el control del molino, como para el equipo de mantenimiento. Por motivos obvios, al tratarse de equipos nuevos, la capacitación de mantenimiento fue solo de manera teórica, quedando toda la parte práctica, pendiente para la ocasión en la que se efectuara el primer mantenimiento.

Por otro lado, se entregó un plan de ramp-up para el primer año, el cual no fue respetado ni llevado a cabo por el usuario. Esto provocó una serie de problemas durante el primer año de funcionamiento y trajo una serie de incertidumbres sobre el equipo, las cuales el usuario interpreto de una manera y los fabricantes indicaban lo contrario.

A estos problemas mencionados, se les sumó la rotación de personal, el cual dejó tanto el área de mantenimiento como el área de operaciones, sin personal calificado para operar el equipo y para llevar a cabo tareas rutinarias de inspección y mantenimiento preventivo que estaban incluidas en los manuales del equipo.

Por estos motivos, es que además se hace necesario trabajar en la optimización del equipo desde el punto de vista operacional, en pocas palabras, la producción por tonelada de este equipo está saliendo a costo muy elevado debido al alto costo de mantenimiento que se tiene hasta ahora.

#### 1.3.1 Primeros antecedentes de fallas

Uno de los primeros problemas a los que se vio enfrentado el equipo de mantenimiento, es que el equipo no tiene una manera física de poder revisar el desgaste de los elementos internos

como rotores y revestimientos. El equipo se encuentra completamente cerrado, no posee escotillas de inspección alguna, no posee sensores ni nada que nos diga cuanta vida útil les quedan a los revestimientos. Debido a esto, es que la única manera de realizar una inspección interna es deteniendo el equipo, vaciándolo, lavándolo y trasvasijando los medios de molienda cerámico hacia algún medio de almacenaje. Dependiendo del nivel de llenado en el que se encuentre el molino, los medios de molienda pueden llegar a ser de un total de 42 t de peso, unos 11,7 m<sup>3</sup> llevados a volumen (densidad de medio de molienda: 3.59 t/m<sup>3</sup>).

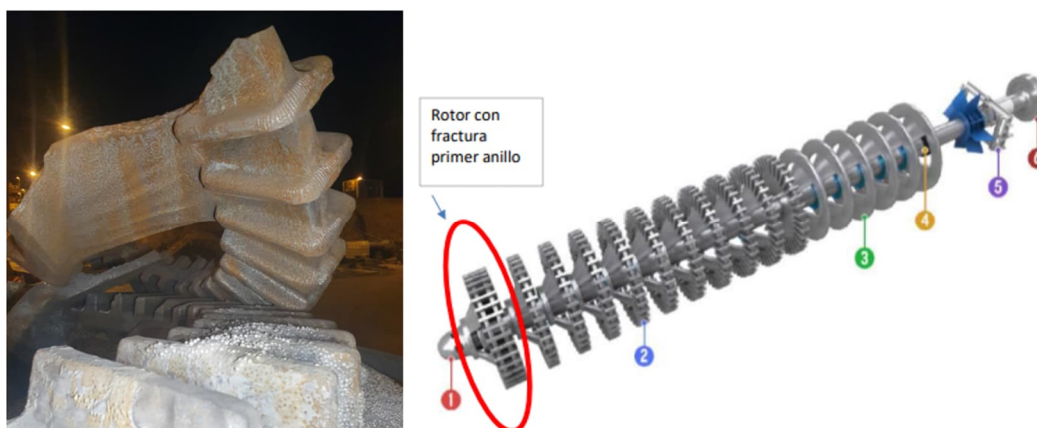
El vaciado, lavado y descarga de medios de molienda, puede llegar a tomar hasta 6 horas en algunos casos, por lo que este procedimiento claramente toma una cantidad de tiempo demasiado alta para el proceso, por lo que no es del todo eficiente ni recomendable realizarlo tan seguido. Es por esto por lo que prácticamente los operadores trabajaban a ciegas en ciertas temporadas de producción, ya que no sabían realmente que estaba pasando al interior del molino.

Cabe destacar, que dentro del plan de ramp-up entregado por el proveedor, se indica que los rotores deben cambiarse a los 3 meses de uso, esto debido a que el equipo venia con rotores fabricados en acero fundido, material estándar que era usado para todas las entregas de proyecto realizadas. Este plan, contemplaba que tanto los revestimientos como los rotores, fueran cambiados cada 3 meses durante el primer año, para así poder realizar mediciones de desgaste en estas 4 campañas y contrastar con la data operacional para poder obtener tasas de desgaste y así poder proyectar la vida útil de los componentes. Este proceso no se realizó ya que cliente desestimo recomendaciones de fabricante y confió en que el desgaste no sería tan severo durante los primeros meses de uso.

Por otra parte, se debe mencionar que, al tratarse de una planta concentradora nueva, esta también estaba pasando por un proceso de ramp-up, con lo cual la producción era inestable y a periodos intermitente. Esto hizo que con mayor razón el usuario no tomara en cuenta las recomendaciones del cliente debido a que el área de mantenimiento asumió que la cantidad de material procesado no sería suficiente para poder producir niveles de desgaste tan críticos como para tener que realizar cambios de componentes.

Este fue el primer error del usuario ya que le costó una detención no programada debido a la falla de uno de los rotores después de casi 8 meses de uso. Durante una inspección de rutina, uno de los mantenedores, se percató de un ruido anómalo al interior del equipo, por lo que se solicitó la detención al CIO (Centro Integrado de Operación) y se programó la apertura del molino. Al interior de este, se encontraba un rotor completamente destrozado (Figura 1-13), producto del desgaste de uno de los nervios de soporte.

Figura 1-13: Rotor con rotura



*Informe de falla, Departamento de MonCon BHP. (2021). [Evidencia fotográfica de falla de rotor al interior de molino]. Recuperado 2023*

Esta falla, trajo consigo interrogantes sobre la duración real de los componentes, sobre la frecuencia de cambio, planes de mantenimiento que el usuario no consideraba y sobre la confiabilidad real del equipo.

Claramente la falla fue producto de no haber seguido el plan de ramp-up recomendado por fabricante y por no ejecutar al menos las inspecciones recomendadas.

Es por este motivo, que el área de Confiabilidad en conjunto con el área de Mantenimiento, acuerdan trazar una estrategia de mantenimiento cada 3 meses y además establecer la política de cambio integro de componentes independiente del estado de estos, ya que tampoco había un procedimiento claro ni tampoco criterios claros por parte del usuario, de cómo medir el desgaste de los elementos internos y las respectivas tolerancias.

Es por toda esta manera de trabajar, que esta estrategia comenzó a tener repercusiones en el presupuesto anual de mantenimiento, ya que se consideraba que el equipo consumía demasiados recursos de OPEX para el beneficio real de recuperación que daba. A pesar de esto, se siguió con esta estrategia y política, ya que la planta y los equipos de la concentradora nueva, contaban con el respaldo de gerencia para poder estabilizar la operación independiente de los costos de producción.

### 1.3.2 Problemas de mantenimiento

La segunda arista de todo el problema planteado, la trae la manera en la que se iba a implementar esta estrategia de mantenimiento. Hasta el momento, la estrategia solo contempla la inspección y cambio de los componentes internos de desgaste del equipo. Pero sin embargo el molino trae consigo, una serie de periféricos que merecen la atención por parte del área de

mantenimiento, ya que muchos de ellos son críticos para el funcionamiento del equipo y como consecuencia, críticos para la continuidad de la línea de remolienda.

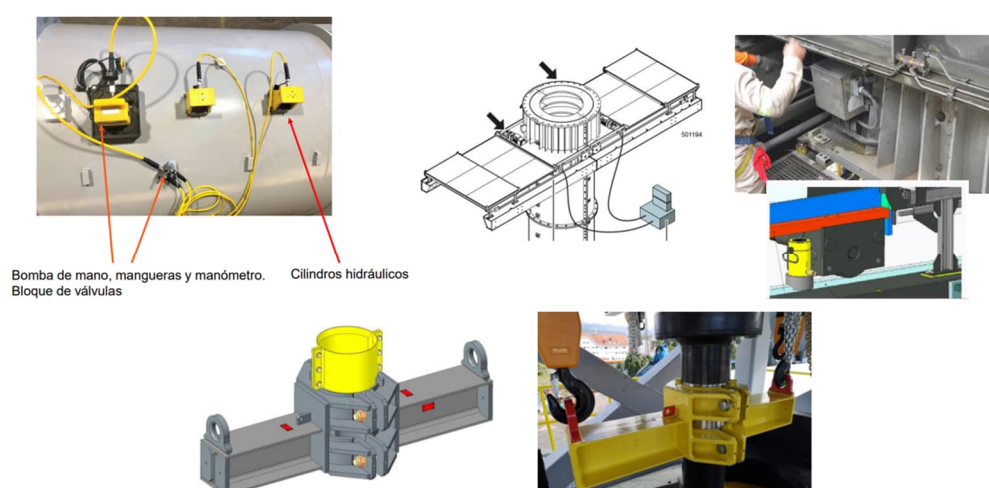
Si nos enfocamos aguas abajo del cuerpo del molino, nos encontramos con una serie de válvulas, sensores, manómetros, líneas hidráulicas y bombas, las cuales cumplen roles fundamentales en la operación de este. Todo esto, sumado a que el molino es operado mediante una lógica de control, comandada por un PLC.

Además de lo mencionado, el equipo cuenta con un motorreductor en la parte superior, que trae consigo su respectiva unidad de lubricación y sensores varios.

En paralelo, tenemos un sistema de carguío de bolas, el cual también es comandado mediante el PLC de acuerdo con un lazo de control, que va revisando el consumo de potencia y la velocidad, y así comparar con las curvas de calibración si el equipo cuenta con la suficiente cantidad de medios de molienda.

Otro punto importante para destacar es que, para este molino, se entregaron una serie de herramientas para mantenimiento (Figura 1-14), las cuales servían para desmontar, izar y transportar, diferentes partes y piezas del equipo durante su desarme para rutinas de mantenimiento.

*Figura 1-14: Ejemplo de algunas de las herramientas especiales*



*Material de capacitación Metso. (2019). [Muestra de las herramientas entregadas durante el proyecto para el mantenimiento del equipo]. Recuperado 2023*

El problema de estas herramientas es que estas se entregaron casi 3 años antes del realizar el primer mantenimiento, por lo que muchas de ellas no fueron almacenadas de la manera más cuidadosa y otras derechamente se encuentran extraviadas.

Si hablamos del cuerpo de molino, este también cuenta con un sistema de rieles y cilindros hidráulicos, los cuales realizan la tarea de separar ambas mitades y poder contar con el equipo abierto para el desmontaje del eje y también para el cambio de revestimientos.

Todo esto, gatillo en que los mantenedores, primero; no tenían claridad de como efectuar algunas de las tareas de desmontaje y desarme del equipo, ya que algunos no fueron correctamente

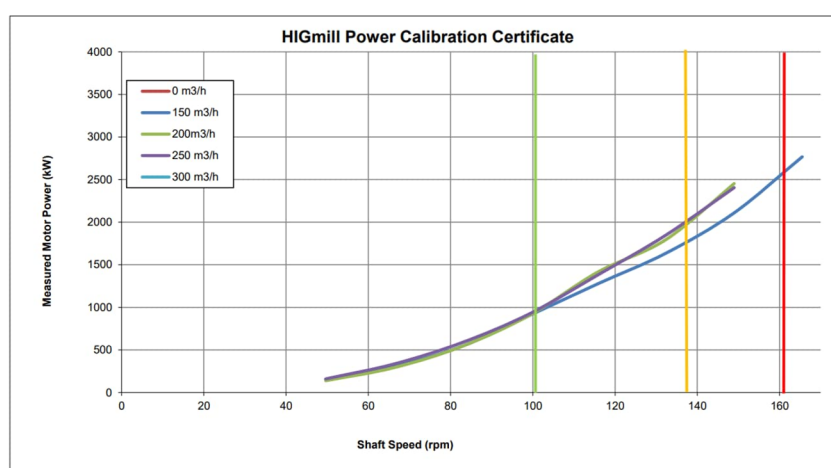
capacitados y otros sencillamente no fueron capacitados, y segundo; muchos no sabían cómo usar estas herramientas y como se comentó anteriormente, muchas de estas herramientas ya no estaban disponibles.

### 1.3.3 Problemas de eficiencia

Como última parte de la problemática, el área de operaciones se vio enfrentada a problemas netamente relacionados con la eficiencia del equipo. Como se mencionó anteriormente, durante la etapa de comisionamiento, hubo algunos problemas tanto logísticos como de falta de personal producto de la pandemia, por lo que el equipo no fue correctamente comisionado ni calibrado en sus curvas de eficiencia. Incluso, la calibración fue hecha solamente con agua de proceso y no se alcanzó a realizar con pulpa como correspondía, debido a los retrasos propios del proyecto y a los problemas ya mencionados de personal.

Para poner en contexto, las curvas de calibración son las que se realizan haciendo trabajar el equipo bajo ciertos niveles preestablecidos de medios de molienda. La calibración se realiza con 30%, 40%, 50% y 60% de medios de molienda. El método es que, por cada porcentaje de medios de molienda, se vaya subiendo paulatinamente la velocidad de giro del eje, con esto podemos ir viendo el aumento de consumo de potencia, a medida que también se va aumentando el flujo de alimentación. Una vez obtenidas estas curvas que básicamente son “Potencia consumida v/s Velocidad de giro” (Figura 1-15), podremos realizar la inversa una vez que el equipo esté funcionando, y así saber qué porcentaje de medios de molienda se encuentran al interior del equipo, ya que estos obviamente van sufriendo desgaste a medida que pasa el tiempo.

Figura 1-15: Ejemplo de curva de calibración para 30% de medios de molienda



*Informe de calibración de molinos, Minera Cobre Panamá. (2016). [Curva de calibración de molino, realizada para la empresa Cobre de Panamá]. Recuperado 2023*

Al no realizar estas curvas de calibración de una manera correcta en el periodo de comisionamiento, los operadores quedaron trabajando a ciegas en lo que respecta niveles de

medios de molienda, es por eso por lo que, para compensar la falta de estos, trabajaban generalmente aumentando la velocidad del equipo cada cierto periodo de tiempo cuando veían que el producto final no salía con la granulometría deseada, con lo que se arrastraba el problema del desgaste prematuro de los componentes. Y si a esto le sumamos que tampoco se realizaban las inspecciones correspondientes para revisar el desgaste de los rotores y revestimientos, teníamos el aumento de velocidad por dos factores que perfectamente podían ser evitados. Los molinos llevan trabajando de esta manera desde su puesta en marcha, así que se hace necesario realizar estas calibraciones nuevamente para así poder mejorar la eficiencia de ambos equipos.

## 2 **ELECCIÓN DE METODOLOGIA Y HERRAMIENTAS DE ESTA**

## **2.1 ELECCION DE ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**

Antes de comentar el porqué de la elección de la estrategia, se debe comentar que luego de analizar algunas de las estrategias mas comunes y conocidas que hay, se descartaron varias ya que no cumplían con las necesidades actuales de la planta. En minería se maneja evidencia y experiencia en estrategias como el RCM y TPM mas que en ninguna otra estrategia. Por otro lado, ambas estrategias buscan como principal objetivo la mejora de la confiabilidad de los activos y la reducción de costes o eliminación de tareas innecesarias.

También se debe mencionar, que actualmente se esta trabajando con 3 de las principales estrategias del mantenimiento; Mantenimiento Preventivo, Mantenimiento Correctivo y Mantenimiento Reactivo, por lo que la elección se basa en la premisa de que se mejoraría la performance de estas estrategias y para algunos componentes se podrían llegar a mantener en caso resulten beneficiosas para el proceso.

Para este equipo y sus periféricos, se analizó tanto su contexto operacional como su entorno, por entorno nos referimos a operarios, turnos, formato de trabajo, equipos aguas arriba y aguas abajo del circuito y también su ubicación en el Flowsheet de la planta.

Se barajo entre una estrategia de TPM y RCM para poder elevar el nivel del actual plan de mantenimiento. Actualmente se está trabajando con mantenciones preventivas para todos los componentes, de acuerdo con estimaciones del cliente y según la experiencia adquirida en estos últimos 2 años. Como se comentó anteriormente, el área de mantenimiento está trabajando en una estrategia de mantenimiento cada 3 meses, lo cual le representa 8 mantenciones al año considerando ambos equipos. Como se puede deducir, 8 detenciones del circuito en particular, es perjudicial del punto de vista productivo y además el consumo de recursos se transformó en un problema, ya que, a esta cantidad de detenciones, se le suma que tampoco la operación esta optimizada, por ende, el área de confiabilidad, opto por realizar el cambio de todos los componentes de desgaste independiente de su estado, ya que aún no saben bien en la manera que trabajara y se comportara internamente. No hay datos claros sobre tasas de desgaste para poder realizar proyecciones, tampoco hay un método eficiente y claro de medir la cantidad de medios de molienda, por lo que actualmente el resultado del producto final (P80), está siendo controlado mediante el aumento de velocidad de giro del eje para poder realizar la molienda deseada. Esto ha llevado a incertezas de desgaste de tal nivel, que, en algunas campañas, los revestimientos han durado 3 meses y en otras 7 meses. Por otro lado, hay componentes a los cuales el cliente aún no tiene planes de mantenimiento y simplemente se encuentran trabajando a la falla.

Por este motivo se decidió realizar el análisis para generar una propuesta de una estrategia de mantenimiento al nivel esperado para el tipo de industria como lo es la minería. Como se mencionó antes, se contemplaron 2 tipos de estrategias; el TPM y el RCM.

Si bien el TPM es una metodología muy poderosa y prolija al momento de generar gestión de mantenimiento, tiene ciertos factores que son complejos de alinear en una industria tan dinámica como la minería. Sabemos que para implantar una metodología de TPM, se debe enfocar como su nombre lo indica, en la calidad de la producción y la eficiencia a través de distintos principios y conceptos claves los cuales son complejos de implementar si no hay una filosofía y una cultura organizacional que lo permita.

Si lo planteamos de una manera simplista, en el proceso minero no se busca la calidad en la producción, si no que se apuesta a la maximización de la producción, debido a que sin importar en las condiciones generales que se encuentre la planta, la calidad del mineral será la misma solo dependiendo de la ley del mineral con el que se trabaje.

Otro ejemplo que tenemos, que es uno de los puntos clave para esto, es delegar muchas de las tareas de mantenimiento e inspecciones a los mismos operarios. La idea es capacitarlos y empoderarlos para realizar estas actividades tales como inspección, planes de lubricación, limpieza y algunas tareas menores. Por otro lado, se incentiva a los trabajadores en tomar decisiones e implementar mejoras. También sabemos que dentro del TPM, se promueve la mejora continua de los procesos y equipos a través de reducción de pérdidas, se eliminan actividades innecesarias que no aporten con la producción y se implementan prácticas más eficientes.

Tomando en cuenta estas actividades, es que se hace complejo implementar la metodología TPM dentro de esta planta, debido a que al menos allí y la mayoría de la industria minera, es un sector muy dinámico. Se manejan turnos rotativos del personal de operaciones y de mantenimiento, turnos que además de trabajar semanas intermedias, luego alternan en diurnos y nocturnos, por ende, en un periodo de 2 semanas, los equipos pasan hasta por 4 operarios diferentes, cada uno con diferente experiencia, diferente manera de ver y tratar al equipo, diferentes formaciones profesionales y diferente cultura organizacional intrínseca. A esto le podemos sumar el constante movimiento de personal producto de la fuga de talentos muy común en la minera, movimientos por promoción profesional y con esto la llegada de operarios nuevos muchas veces con poca experiencia. Esto hace que el TPM en un modelo de trabajo así, sea difícil de implementar. ¿Imposible?, claro que no, pero ciertamente es añadirle grados de dificultad a una reforma que de por sí sola ya es compleja y que requiere de disciplina y personal preparado.

Debido a esto es que se decidió por el RCM, ya que esta metodología en sí requiere de personal capacitado que pueda seguir los planes de mantenimiento asignados a cada equipo. Planes que quedan establecidos desde un comienzo de acuerdo con el análisis que pueda realizarse como por ejemplo con un FMECA. En estos planes de mantención, la evaluación está más pauteada, no se deja a criterio de los operarios el estado de los equipos, simplemente se deja desde un principio establecido los modos de falla y las acciones a tomar con su respectiva frecuencia. Por otro lado, el RCM no se enfoca en buscar calidad de producción, que no es el objetivo

principal de la minería, la minería necesita continuidad y confiabilidad, las detenciones en esta industria son millonarias y perjudiciales para la dotación ya que muchas veces perciben bonos por producción. También podemos inducir por simple deducción, que el TPM conlleva una mayor inversión debido a su proceso de implementación, no así con el RCM que justamente uno de sus beneficios al implementarlos, es el ahorro que se percibe en muchos de los activos al interpretar e implementar un adecuado plan de mantenimiento para cada uno. Justamente este último punto es el que hace que sea mucho más atractivo para la minería cuyo fin es obtener el menor costo productivo posible.

## 2.2 PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DE RCM

En este apartado, se contextualizará sobre el uso del RCM y del por qué su elección para esta ocasión. Se explicará de manera general el proceso de implementación con algunos ejemplos, para luego poder ir dando forma al modelo RCM que se quiere adoptar para este equipo.

### 2.2.1 Concepto del RCM

En la industria es imprescindible tener el control de los costes de mantenimiento, el aumento de la confiabilidad y el aumento de la producción es por eso por lo que la implementación de estrategias claras y adecuadas para cada equipo y planta, son necesarias al momento de pensar en continuidad operacional.

No es secreto que las áreas de mantenimiento son un gasto totalmente necesario, pero jamás deseado para un área productiva. Siempre está la disyuntiva del concepto sobre si el área de mantenimiento de una planta es una inversión o no. Quizás es un debate que seguirá por muchos años más, pero de lo que, si estamos seguros, es que es un gasto que se tiene que hacer si o si y cada planta intenta a su manera de poder reducir lo más posible este costo de operación.

Aquí es donde la metodología RCM se hace fuerte. Con la implementación de esta metodología, no solo disminuimos las detenciones no programadas, sino que también le asignamos el plan de mantenimiento más adecuado a cada equipo, y con esto, logramos optimizar el recurso asignado para dicho equipo y extendemos al máximo su uso dependiendo de su confiabilidad. El más clásico ejemplo es el de una ampolleta; sería absurdo pensar que le podemos asignar un tiempo de vida útil y cambiarla según un periodo estipulado dentro del plan de mantenimiento, para este caso lo más optimo del punto de vista del costo, es cambiarla cada vez que se queme. Con esto optimizamos al máximo su vida útil y además optimizamos el costo del repuesto. Pasos clave del proceso de implementación RCM

### 2.2.2 Pasos clave del proceso de implementación RCM

Según la mayoría de los libros, manuales, memorias o cualquier documento que podamos leer al respecto, para poder generar un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad, necesitamos de ciertos pasos básicos. Estos difieren levemente unos de otros según la redacción y/o edición de lo que estemos leyendo, pero básicamente es la misma estructura. Según el libro RCM de John Moubray, este proceso nos genera 7 preguntas que deben ser contestadas para poder establecer la estrategia, estas 7 preguntas son las que nos generan cada paso a seguir para poder confeccionar nuestra estrategia.

### 2.2.2.1 Las 7 preguntas claves

Las siguientes preguntas, son las que nos ayudaran a generar el paso a paso de nuestra estrategia de mantenimiento. Estas dan a lugar a cada uno de los pasos asociados a la implementación.

#### 2.2.2.1.1 ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento del activo?

Para esto necesitamos determinar hacer dos cosas; determinar qué es lo que queremos que el equipo haga, o sea, determinar su función. Y además he de asegurarnos que esta función se cumpla bajo las condiciones que necesitamos. Por este motivo, es que el primer paso del RCM, es definir las funciones del activo bajo su contexto operacional y con los parámetros deseados (Ej.: Necesito que mi automóvil me lleve del punto A al B).

Además, se establecerán funciones primarias y secundarias. Las primarias son la base del por qué se adquirió el activo, su tarea principal. Las secundarias son las funciones que se esperan más allá de la primaria y pueden ser o no relacionadas con la primaria (Ej.: Necesito que el automóvil me lleve a una velocidad promedio de 120 km/h y con Aire Acondicionado).

#### 2.2.2.1.2 ¿Cuáles son las fallas que privarían dichas funciones?

Lo único que se interpone entre el activo y sus funciones, es algún tipo de falla. Es por esto, que el objetivo del mantenimiento se define por las funciones asociadas al activo. La idea es que el mantenimiento cumpla el objetivo de adoptar una política para el manejo de una falla. Pero antes de esto, debemos identificar que fallas podrían ocurrir, para así tener las herramientas para el manejo de estas.

Primero se debe identificar las circunstancias que llevaron a esta falla y luego preguntarse qué eventos causan dichas fallas.

En esta disciplina del mantenimiento, se les llama “fallas funcionales”, porque ocurren cuando el activo no es capaz de cumplir la función de acuerdo con el parámetro aceptable considerado por el usuario. En estas fallas, se pueden encontrar las “fallas parciales”, que son aquellas en las que el activo puede seguir funcionando, pero bajo los niveles esperados por el usuario. Además, están las “fallas totales” que son aquellas en las que el activo dejó derechamente de funcionar.

Siguiendo con los ejemplos anteriores, una falla parcial sería que el automóvil no está logrando llegar a más de 100 km/h.

Como se puede deducir según la explicación, la falla total es que el automóvil se detuvo producto de alguna falla (panne).

#### 2.2.2.1.3 ¿Cuál es la causa de cada falla?

Una vez que se detectan las fallas funcionales, se deben identificar los hechos o causas que gatillan dichas fallas. Estos son los llamados “modos de falla”, son eventos posibles que ya se tienen en registro en equipos iguales o similares, también se incluyen eventos que se consideren posibles de ocurrir bajo determinados escenarios. Siguiendo con el ejemplo del auto, dos modos

de la falla parcial mencionada (disminución de velocidad), es que se haya dañado una bujía o un cable de bujía y el vehículo esté funcionando solo con 3 cilindros, con lo cual no alcanza la velocidad deseada. Para la falla total, los modos de falla podrían ser un neumático pinchado, un sobrecalentamiento del motor o la descarga de la batería.

Dentro de este listado de modos, se deben incluir los daños propios del activo (desgaste, roturas, daño, etc.), daños de operación y/o errores por causa humana como también errores de diseño.

#### 2.2.2.1.4 ¿Qué sucede cuando ocurre dicha falla?

El cuarto paso de este proceso tiene que ver con el listado que se generara de los efectos de la falla sobre el activo. Aquí se analiza y describe lo que ocurre con cada modo de falla detallado en el paso anterior. Aquí se incluye toda la información necesaria para la evaluación de la consecuencia, información tal como:

- Evidencia de que la falla haya ocurrido anteriormente
- Que amenaza representa para la seguridad y medio ambiente (si aplica)
- De qué manera afecta a la operación o a la producción
- Daños físicos causados por esta falla
- Acciones por tomar para la reparación

#### 2.2.2.1.5 ¿En qué sentido es importante cada falla?

En este punto del análisis, se debe ver que efectos tendrá la falla sobre el activo, es decir que consecuencias nos traerá dicha falla. Estas fallas afectan a la organización en alguna manera, ya sea en calidad, seguridad, medio ambiente u continuidad operacional. Hay que destacar que estas fallas toman un tiempo determinado en ser reparadas y además cuestan dinero. Aquí es donde se comienza a discernir que tipo de mantenimiento se podría realizar en ciertos activos. Lo lógico es que, si la falla nos trae un costo alto en alguno de los puntos mencionados, intentaremos evitarla a toda costa, por el lado contrario, si una falla no tiene consecuencias o sus consecuencias son leves, podemos realizar rutinas más simples o en algunos casos “trabajar a la falla”. Aquí toma suma importancia el concepto de que la consecuencia es más importante que la falla, básicamente el mantenimiento se centra en evitar las consecuencias más que la propia falla.

#### 2.2.2.1.6 ¿Qué puede hacerse para prevenir cada falla?

Como se mencionó en el punto anterior, para cada consecuencia de los modos de falla, se debe establecer que acciones se tomaran para evitar o reparar dichas fallas (dependiendo de la consecuencia). Lo más sensato, es que para equipos que tienen consecuencias altas, se establezcan planes de mantenimiento exhaustivos, análisis, inspecciones, etc., es decir todo lo necesario para asegurarse que el equipo no falle y poder anticiparse a su falla. Aquí es donde mediante una matriz de riesgo, se clasifican los equipos para poder establecer planes y estrategias de mantenimiento para cada uno. Generalmente se establecerán estrategias más agresivas para las fallas en equipos

que generan consecuencias graves y se van estableciendo planes o rutinas más blandas para equipos de menores consecuencias.

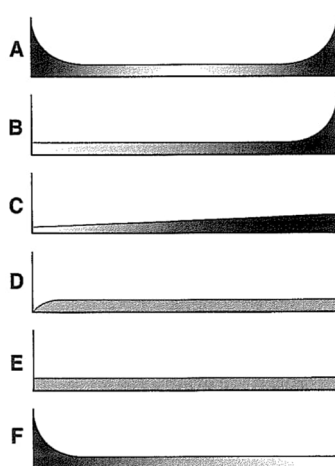
Las técnicas para manejar las fallas se dividen en dos categorías:

- Tareas proactivas: son aquellas que ejecutamos antes de que ocurran las fallas y nos sirven para prevenir que el ítem llegue al estado de falla. Aquí es donde están por ejemplo las categorías conocidas como “mantenimiento predictivo” o “mantenimiento preventivo”.
- Acciones a falta de: aquí es donde se trata directamente con el estado de falla y estas se realizan cuando no hay una tarea proactiva efectiva. Estas acciones incluyen rediseño de componentes, mantenimiento a la falla y la búsqueda de la falla.

#### 2.2.2.1.7 ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Muchas veces en la industria, se plantea que a todos los equipos se les debe asignar un plan y una estrategia de mantenimiento. En muchas de las plantas y/o empresas del área industrial, se tiende a tener rutinas asignadas para cada equipo, con intervalos calendarizados, compras de repuestos programadas y recursos asignados para cada ocasión. Los años de estudio del mantenimiento, han determinado que no todos los equipos en la industria tienen el clásico comportamiento de vida útil de la “curva de la bañera”. Se han encontrado diferentes patrones de vida útil en distintos equipos de la industria. Como se aprecia en la Figura 2.1, se ven patrones como el de la letra F, en el cual la probabilidad condicional de la falla es alta en el inicio de la vida útil (mortalidad infantil), pero luego se mantiene a través de los años de manera indefinida.

Figura 2-1: Patrones de falla



*Reliability-centered maintenance, John Moubray. (1997). [Representación gráfica de los diferentes ciclos de vida que puede llegar a tener un activo]. Recuperado 2023*

Estos patrones son los que contradicen la creencia de que siempre hay conexión entre confiabilidad y vida útil. Esta misma creencia es la que plantea que los equipos deben ser mantenidos con periodicidad para prevenir fallas. Hoy en día esto es cierto en pocos casos, a menos que la falla esté relacionada con la edad del activo, los límites de vida útil hoy no tienen mucho que ver con la mejora de la confiabilidad de los componentes o sistemas más complejos. Algunas reparaciones tienden a aumentar el promedio de fallas generales al introducir el concepto de mortalidad infantil en sistemas que quizás podrían ser más estables.

Es por todo esto, que muchas organizaciones, han dejado de lado la idea del mantenimiento proactivo. Y quizás es la decisión más sabia en muchos casos, como en los casos en que la consecuencia de la falla es menor, pero cuando las consecuencias son graves, se debe generar una estrategia bien planificada para prevenirlas o bien reducirlas.

Aquí entran nuevamente las “tareas proactivas”, y para este punto del proceso, las podemos dividir en tres categorías:

- Tareas de reacondicionamiento cíclicas: es el conocido como “mantenimiento preventivo”, que consiste en fabricar componentes cada ciertos periodos establecidos, independiente de la condición actual de estos. Estas tareas se basan en datos históricos obtenidos de equipos similares o muchas veces dados por el fabricante del equipo.
- Tareas de sustitución cíclicas: es la misma acción de la tarea anterior, salvo que aquí se reemplazan componentes en formato de repuestos.
- Tareas a condición: en este tipo de tareas, las decisiones se basan en las advertencias denominadas como “fallas potenciales”, que son las advertencias que el activo nos mostrara, las cuales nos dirán que está a punto de producirse una falla o incluso que la falla está en el proceso de ocurrir. Dentro de estas tareas, encontramos el mantenimiento predictivo, el monitoreo de condiciones y el mantenimiento basado en la condición.

### 2.3 **DIVISION E IDENTIFICACION DEL EQUIPO**

Lo primero que haremos para este análisis, es establecer los límites de batería para nuestra jerarquización, es decir que estableceremos hasta donde llegaremos con el análisis para RCM aguas arriba y aguas abajo del equipo. Esto para poder acotar los equipos a los que se le hará el análisis para la propuesta de la metodología, ya que si miramos el diagrama de flujo del equipo, veremos que este depende de ciertas válvulas de entrada, estas válvulas reciben alimentación de bombas de pulpa y agua y a su vez estas bombas reciben mineral de líneas de agua y cajones alimentadores, por ende si seguimos aguas arriba del equipo, veremos que para el funcionamiento de este molino, podríamos seguir tomando en cuenta muchos procesos más, incluso si exageramos, hasta el rajo de extracción.

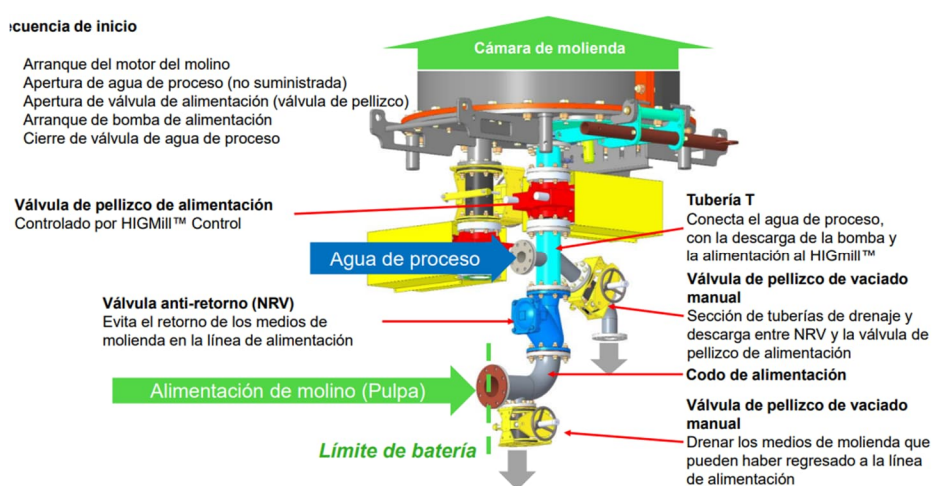
En el capítulo anterior se detalló la descripción del equipo y su funcionamiento. Desde esa explicación, podemos dividir al equipo en 3 zonas según sus etapas:

- Alimentación: las bombas de alimentación suministran mezcla de agua de proceso y pulpa proveniente de un cajón alimentador. Esta mezcla es llevada a la cámara de molienda a través de una válvula check de 3 vías ubicada en la parte inferior del molino. El caudal es controlado por la misma bomba de alimentación y la densidad se controla con la bomba de agua.
- Molienda: durante la operación, la mezcla fluye aguas arriba y va avanzando a través de las cámaras de molienda, donde se va produciendo el proceso de conminución mediante los rotores montados en el eje.
- Descarga: el mineral ya conminuido, es elevado hacia la cámara de descarga, producto del flujo proveniente de la bomba y del mismo impulso que le otorgan los rotores. Ahí es derivado a través de piping hacia otro cajón acumulador para luego seguir su proceso en estanques limpiadores.

### 2.3.1 Componentes de la etapa de alimentación

Para esta etapa, tomaremos como componente inicial la bomba booster que se utiliza como apoyo para la bomba de succión del cajón acumulador al inicio del circuito. Esta bomba booster es la encargada de proporcionar la presión adecuada de trabajo para el molino, además de apoyar también la impulsión de la pulpa hacia la parte superior del equipo mientras va pasando a través de las cámaras de molienda. A esta bomba, le sigue en el circuito una válvula pinch, la cual sirve de vaciado para cuando quedan medios de molienda estancados en el circuito de alimentación. Luego de la válvula pinch, nos encontramos con una válvula check o antirretorno (NRV) de 3 vías, la cual es la encargada de dar el paso del agua mientras bloquea el paso de la pulpa y viceversa y al mismo tiempo evitar el retorno de ambos fluidos al circuito de alimentación. Solidaria a esta válvula, se encuentra otra válvula pinch para drenaje y descarga del molino. Finalmente, este bloque del sistema se termina con una válvula pinch principal de alimentación, la cual se acciona neumáticamente para dar paso a la mezcla de agua y pulpa y se mantiene en posición normal cerrada, para que los medios de molienda no se devuelvan al circuito de alimentación (Figura 2-2).

Figura 2-2: Esquema típico del bloque de válvulas de alimentación



Material de capacitación Metso. (2019). [Esquema general de distribución de válvulas en la mayoría de los molinos instalados]. Recuperado 2023

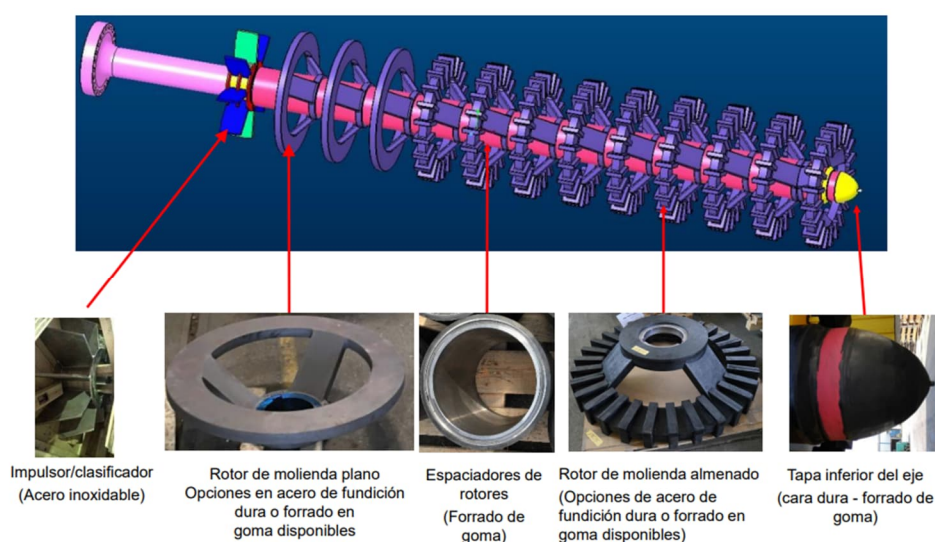
### 2.3.2 Componentes de la etapa de molienda

En esta etapa nos centramos derechamente en el molino como cuerpo, aislándolo totalmente de cualquier periférico del sistema. Aquí podemos separar el cuerpo de este, en dos grupos, el ensamble del eje y el shell o carcasa del cilindro.

El ensamble de eje, como lo indica su nombre, consta de un eje con componentes de desgaste montados en él (Figura 2-3). Este ensamble parte con una caperuza de protección en el extremo inferior del eje, luego a lo largo del eje, le siguen montados los 17 rotores que son los encargados de generar la agitación de la pulpa y los medios de molienda en cada cámara de

molienda. Cada uno de estos rotores, van separados por tubos espaciadores. Al llegar al último rotor, este va solidario a un anillo prensa que es el encargado de sostener y fijar todo el paquete de rotores con tubos espaciadores contra la caperuza de protección inferior del eje. Finalmente, un poco más arriba de la prensa, va un impeller el cual es el encargado de mantener los medios de molienda dentro del molino mediante el giro de sus alabes.

Figura 2-3: Detalle de componentes del ensamble de eje



Material de capacitación Metso. (2019). [Muestra en detalle de componentes reales de eje]. Recuperado 2023

La segunda parte del cuerpo del molino corresponde a la carcasa o shell del molino. Esta consiste en un cilindro metálico, el cual se encuentra dividido en 2 en el largo de este. Ambas mitades van revestidas interiormente con los revestimientos del shell (Figura 2-4). Los revestimientos se dividen en 6 filas a lo largo del molino, teniendo un total de 12 unidades de estos revestimientos.

Figura 2-4: Vista general del interior del cuerpo del molino



Material de capacitación Metso. (2019). [Fotografía de molino momentos después de realizarle mantenimiento completo].

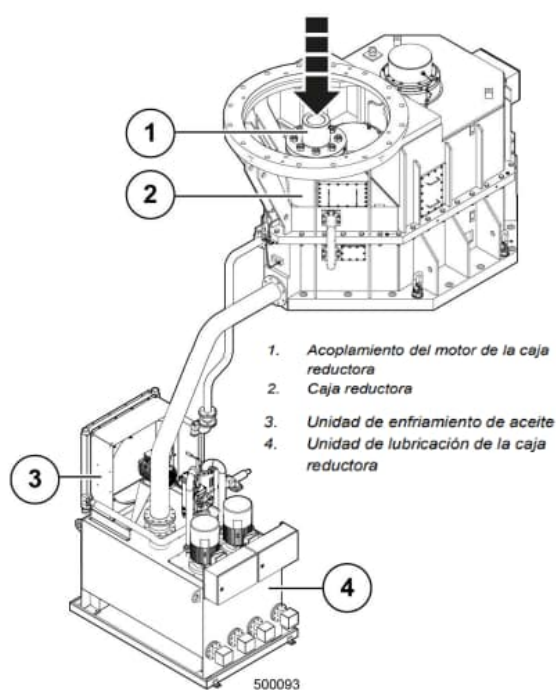
Recuperado 2023

### 2.3.3 Componentes de la etapa de descarga

En esta etapa final del equipo, nos encontramos principalmente con el housing de descarga, que es una parte estructural del equipo en donde se va acumulando el mineral ya conminuido y este es evacuado y bombeado hacia los estanques limpiadores.

Además, en esta etapa se consideraron dos equipos más, por un tema de posicionamiento físico ya que ambos se encuentran en la zona superior del equipo. Uno es el motorreductor el cual se encuentra justo sobre el housing de descarga (Figura 2-5). Esta unidad motriz, es la encargada de transmitir potencia al eje para el trabajo giratorio que realiza este y así realizar el proceso de conminución. Además, emplazado en la misma zona superior del equipo junto al motorreductor, se encuentra la tolva de medios de molienda (Figura 2-6), que es la forma en la que el equipo se alimenta automáticamente de medios de molienda mediante el control automático que el equipo posee en base a su granulometría de salida (P80).

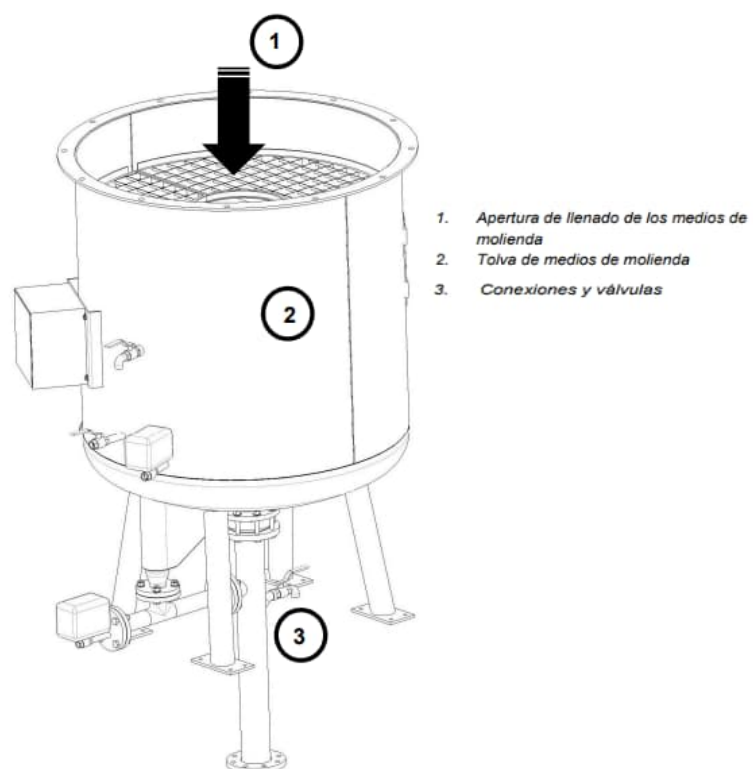
Figura 2-5: Motorreductor y unidad lubricadora



Manual de mantenimiento HIGmill. (2019). [Vista general de sistema motriz del molino con su respectiva unidad lubricadora].

Recuperado 2023

Figura 2-6: Tolva de medios de molienda

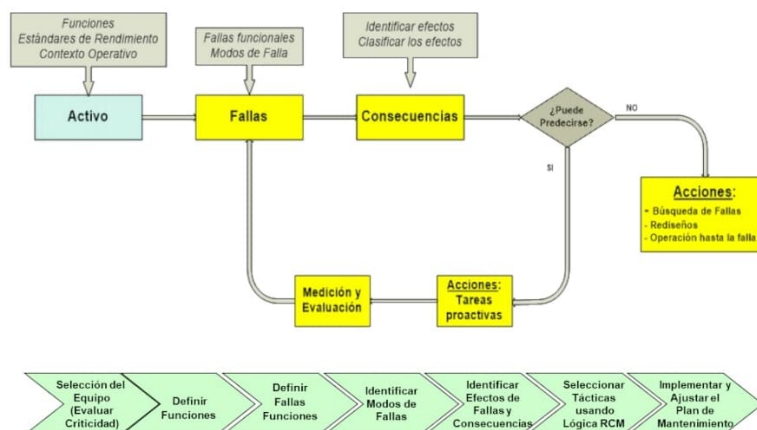


*Manual de mantenimiento HIGmill. (2019). [Vista general de tolva de medios de molienda, componente que alimenta de medios al molino de manera automática]. Recuperado 2023*

## 2.4 APLICANDO RCM AL EQUIPO SELECCIONADO

Como se explicó en uno de los puntos anteriores, sobre el proceso de implementación y los pasos para esto, se aclaró que consta de 7 pasos (Figura 2-7).

Figura 2-7: Flujoograma del proceso de RCM



Google. (s.f.). [Flujoograma para la implementación en 7 pasos de un proceso RCM]. Recuperado 2023, de [https://sp-ao.shortpixel.ai/client/to\\_auto,q\\_glossy,ret\\_img,w\\_1024,h\\_576/https://angelmendizabal.com/wp-content/uploads/2020/06/Proceso-RCM\\_1-1024x576.jpg](https://sp-ao.shortpixel.ai/client/to_auto,q_glossy,ret_img,w_1024,h_576/https://angelmendizabal.com/wp-content/uploads/2020/06/Proceso-RCM_1-1024x576.jpg)

En base a esto, es que el primer paso es elegir los activos que se analizarán para la implementación y definir las funciones principales y secundarias de dichos activos que se eligieron para esta implementación. Estas deben contener en sus enunciados, un verbo, un objeto y el estándar de desempeño, por ejemplo:

“Bomba booster: bombear (*verbo*) agua (*objeto*) desde la línea de agua de proceso hacia la alimentación del molino a una presión de 9.2 bar y no menor a 3.5 bar (*estándar de desempeño*)”.

Estas funciones irán en la primera columna de la hoja de análisis, suponiendo que se realizara en una planilla estilo Excel.

A continuación, por cada función, se enlistan las fallas funcionales, es decir cuando el componente deja de cumplir el estándar de desempeño especificado.

Ejemplo: “Dejar de bombear agua”  
 “Bombear agua a menos de 3.5 bar”

Dichas fallas funcionales, corresponden a la segunda columna de nuestra planilla.

En la tercera columna, se especificarán los modos de falla, que se podría decir que es la parte más importante del análisis de RCM, ya que aquí es donde se analiza técnicamente, la causa raíz de que el equipo no cumpla con el estándar de desempeño.

Se debe tener en cuenta, además, que las fallas funcionales pueden ser causadas por más de un modo de falla, así como el mismo modo de falla puede provocar más de una falla funcional. También se debe considerar que los modos de falla pueden ser humanos, físicos, administrativos o de diseño.

En análisis de equipos o sistemas complejos y que sus modos de falla dependen de diversas variables, se recomiendan una serie de herramientas de mucha utilidad para los análisis correspondientes. Dentro de estas, se destacan las siguientes:

- Brainstorming: más conocido como lluvia de ideas, es un proceso creativo que envuelve a más de un área. Se usa generalmente como Kick-off para establecer criterios frente al mismo objetivo.
- Los 5 por qué: este proceso deductivo, nos lleva a la búsqueda de una causa raíz. Como su nombre lo indica, consiste en preguntar de manera sucesiva el “por qué” a cada pregunta anterior.
- Diagrama de Ishikagua: este diagrama estilo espina de pescado, nos ayuda de manera grafica a establecer la causa-efecto de un problema. Cada causa es la espina de este diagrama y la cabeza viene siendo el efecto de estas causas.
- Árbol de fallas: método deductivo y analítico que busca simular las situaciones causa-efecto que llevan a una falla funcional. Se usan operadores lógicos a los cuales se les asigna una probabilidad de ocurrencia a cada suceso y con esto se puede realizar un análisis cuantitativo.
- RCA: de sus siglas en ingles “Root Cause Análisis”, el análisis causa raíz, se utiliza generalmente cuando la falla ya ha ocurrido. Como su nombre lo indica, se usa para la búsqueda de la causa raíz del problema y así determinar la causa de la falla funcional. Luego de esto se pueden establecer soluciones e implementar las desarrolladas en las herramientas anteriores.

El resultado del análisis explicado, el detalle y la certeza de listar los modos de falla, dependerá únicamente del conocimiento y la experiencia del equipo de trabajo que se forme para esta implementación.

Para el siguiente paso de este análisis, es decir la cuarta y última columna de nuestra planilla, se responderá sobre el efecto que tendrá cada falla funcional enlistada. Esta descripción de efectos debe tener suficiente información tal que en el próximo paso se pueda evaluar de manera certera las consecuencias de cada falla.

## 2.4.1 Aplicando herramientas para RCM

Para poder conseguir todo este análisis explicado en el punto anterior, nos podemos valer de una serie de herramientas las cuales nos permitirán cubrir varios de los aspectos presentados en el paso a paso.

Dentro de las herramientas más comunes y utilizadas, encontramos las siguientes:

### 2.4.1.1 Principio de Pareto

Este análisis corresponde a una comparación cuantitativa de elementos o factores y que nos permite ver como estos contribuyen a un determinado efecto. El objetivo es organizar dichos elementos o factores en dos grupos; los elementos muy importantes y los poco importantes. ¿Y por qué es cuantitativo? Porque la relación que nos mostrara es sobre el 80/20 de una comparativa. Esto quiere decir que, para muchos de los resultados obtenidos de análisis, el 80% de las consecuencias, proviene del 20% de las causas.

Llevado a la industria, generalmente esto se traduce como el 20% de los equipos que nos ocasionan el 80% de las fallas o detenciones. Con este análisis podemos clasificar y decidir sobre que equipos centraremos nuestros recursos para la ejecución del RCM.

Como se aprecia en la Figura 2-8 a continuación, se muestra como ejemplo algunos de los componentes del equipo analizado y su frecuencia de fallas.

*Figura 2-8: Ejemplo de registros de fallas en componentes*

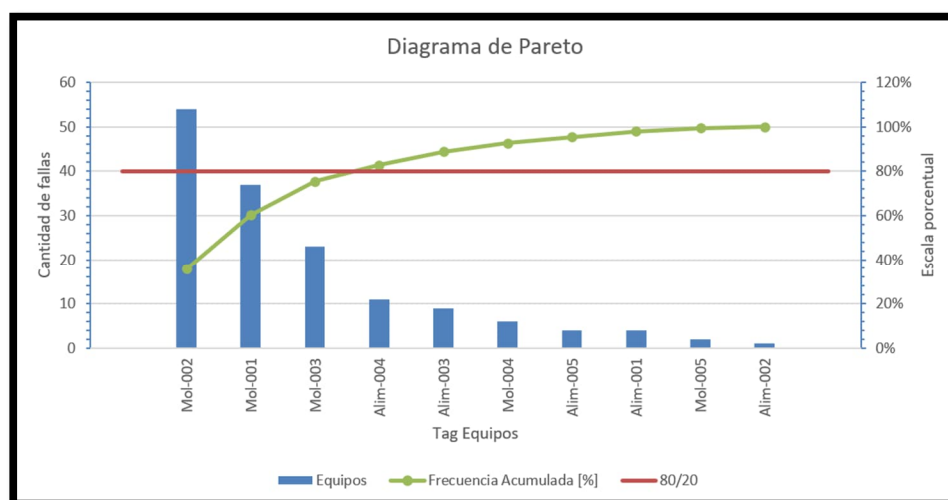
Tag Equipo	Cantidad de Fallas (Frecuencia Absoluta)	Frecuencia Relativa [%]	Frecuencia Acumulada [%]
Mol-002	54	36%	36%
Mol-001	37	25%	60%
Mol-003	23	15%	75%
Alim-004	11	7%	83%
Alim-003	9	6%	89%
Mol-004	6	4%	93%
Alim-005	4	3%	95%
Alim-001	4	3%	98%
Mol-005	2	1%	99%
Alim-002	1	1%	100%
<b>Total</b>	<b>151</b>	<b>100%</b>	

*Elaboración propia. (2023). [Estadísticas de fallas recopiladas desde planta a través del departamento de confiabilidad].*

*Recuperado 2023*

Se puede ver en la columna de “Frecuencia Acumulada”, que, hasta la cuarta línea de equipos, hay un total de 83% de fallas acumuladas. Esto nos da una idea de cómo está diversificado el universo de fallas en un sistema o una planta. Con esto podemos tener una primera aproximación sobre los equipos en los que debemos enfocarnos para eliminar o disminuir ese 83% de fallas.

Figura 2-9: Diagrama Pareto



Elaboración propia. (2023). [Gráfico obtenido a partir de las estadísticas de la Figura 2-8]. Recuperado 2023

En la imagen podemos ver de manera gráfica el análisis sobre las fallas en los 10 equipos analizados (Figura 2-9). Se puede apreciar que nuestra línea de corte del 80% está casi coincidente con la línea de “Frecuencia Acumulada” en nuestro 4to equipo.

Si bien el análisis de Pareto, nos sirve para una primera aproximación, debemos estar conscientes de que no es un análisis del todo certero para nuestro fin, ya que aquí no se analiza el efecto de las fallas sobre el sistema, es decir las consecuencias no son parte de este análisis, por lo que quizás dentro de ese 80% de fallas, hay más de algún componente en el que la consecuencia puede ser mínima o nula para nuestro proceso y estaríamos poniendo esfuerzos y recursos en detalles que quizás no valen la pena. A modo de ejemplo; existe la posibilidad de que estemos incluyendo en ese 83%, que corresponden a 125 fallas de un total de 150, a algún fusible que solamente protege un visor led de algún dato operacional del equipo. Es por esto por lo que este análisis debe llevar un poco más de profundidad en el contexto operacional y no solamente quedarse con los números que nos entregue.

#### 2.4.1.2 Diagrama Jack Knife

Este método sirve para analizar el tiempo de indisponibilidad de activos o sistemas mediante el uso de diagramas de dispersión. Este diagrama conserva el esquema de clasificación del Pareto y además aporta información extra, respecto a la frecuencia de falla y al MTTR. Este gráfico se divide en 4 cuadrantes los cuales nos permiten dividir las fallas o activos en; agudos, crónicos, críticos y bajo control o leves. Además, con esta información, podemos inferir en la manera que estos activos, inciden en indicadores como la mantenibilidad y la confiabilidad del sistema.

Con este análisis, también podemos tomar decisiones para priorizar activos en función de la cantidad de fallas que tenga en un periodo determinado, pero además también nos permite segmentar por el tiempo medio de reparación de ellas (MTTR).

Un punto importante para considerar para este análisis es que el resultado de este depende mucho de la calidad del dato que se tenga. Depende tanto de la calidad del registro a través del tiempo de las fallas, como de la calidad del registro al momento de producirse la falla (temperaturas, corrientes, flujos, presiones, etc.).

Para construir este diagrama, primero debemos obtener el MTTR para tener nuestro eje de coordenadas y las tasas de falla el cual se transformará en nuestra abscisa. Una vez que tenemos esta base, debemos obtener el promedio de ambas variables y con estos dos promedios, trazamos dos rectas paralelas a cada eje. En nuestra recta paralela a las coordenadas, situaremos nuestra ISO Confiabilidad y en la recta paralela a la abscisa situaremos la recta correspondiente a la ISO Mantenibilidad.

Las tablas que haremos en este proceso descrito representaran un gráfico de dispersión que distribuiremos de la siguiente manera (Figura 2-10):

Figura 2-10: Ejemplo de datos para Diagrama Jack Knife

Tag de equipo	N° de Fallas ( $Cf$ )	Tiempo de detención ( $T_d$ )	MTTR $\frac{T_d}{Cf}$
Mol-002	54	15	10
Mol-001	37	23	23
Mol-003	23	12	5
Alim-004	11	5	12
Tag-00X	X	XX	X
	$Cf_T = \sum_{i=1}^X Cf_i$	$T_{d_T} = \sum_{i=1}^X T_{d_i}$	

Elaboración propia. (2023). [Muestra de las fórmulas usadas para la obtención del MTTR]. Recuperado 2023

Las rectas limites, que son las paralelas a los ejes que nos servirán como ISO Mantenibilidad e ISO Confiabilidad, se obtienen de la siguiente manera (Figura 2-11):

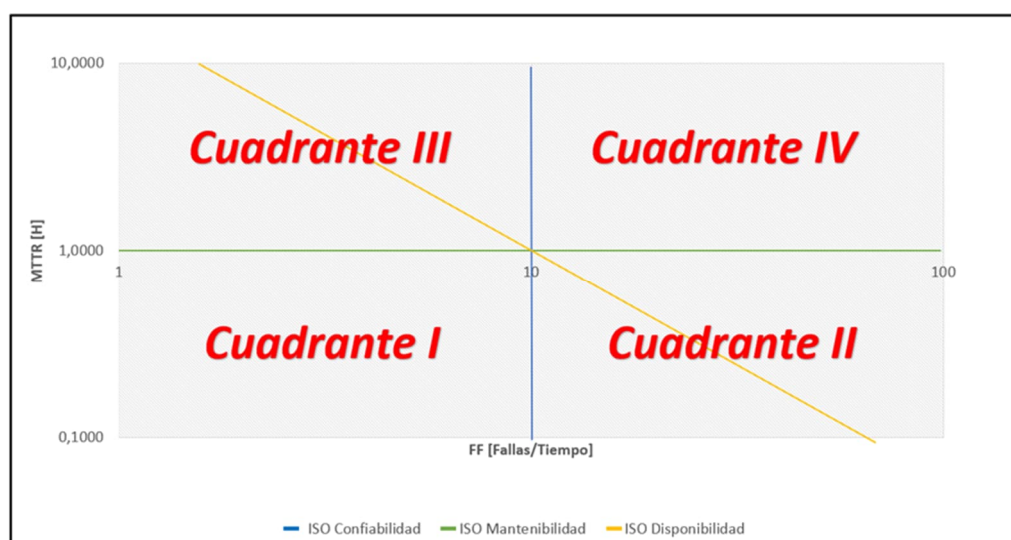
Figura 2-11: Calculo para límites de Diagrama Jack Knife

ISO Mantenibilidad	$T_{d_T}/Cf_T$	Limite MTTR
ISO Confiabilidad	$Cf_T/X$	Limite N° de Fallas

Elaboración propia. (2023). [Formulas utilizadas para el cálculo de los límites que dividirán nuestro Diagrama Jack Knife].  
Recuperado 2023

Luego se genera el grafico de dispersión esperado, en el cual se catalogan y comparan los datos (Figura 2-12).

Figura 2-12: Diagrama Jack Knife



Elaboración propia. (2023). [Ejemplo de resultado final de un Diagrama Jack Knife]. Recuperado 2023

Como se observa, el gráfico se divide en cuatro cuadrantes, esta división la generan las rectas de ISO Mantenibilidad y la de ISO Confiabilidad.

Las zonas están determinadas para segmentar y clasificar los equipos en las cuatro categorías que ya se habían comentado anteriormente:

- Cuadrante I: esta zona es para los equipos catalogados como “Leves”, es decir equipos los cuales tienen baja tasa de falla y también el MTTR es bajo en comparación con el resto. Por lo que estos ítems son menos relevantes para el desarrollo.
- Cuadrante II: zona para equipos “Crónicos”. Estos equipos son los equipos que fallan de manera recurrente, por lo tanto, tienen una baja confiabilidad, pero, sin embargo, su MTTR también es bajo.
- Cuadrante III: zona de equipos “Agudos” o equipos con baja tasa de fallas, pero con alto MTTR, es decir con una baja mantenibilidad.
- Cuadrante IV: zona de equipos “Críticos” que vendrían siendo generalmente en los que se pone atención durante este análisis. Estos equipos tienen baja mantenibilidad también y poca confiabilidad. Su MTTR es de los más altos del análisis.

Esta herramienta nos permitirá evaluar de manera cualitativa y cuantitativa estos indicadores relacionados con el mantenimiento y así nos permite un primer acercamiento para considerar en que equipos debemos poner atención y recursos para obtener beneficios.

Como se comentó igualmente con el Diagrama Pareto, es necesario considerar la posibilidad de que dentro del cuadrante de equipos “Leves”, se nos infiltra algún equipo que igual pueda ser vital para el sistema o planta, ya que, si bien puede ser un equipo de alta confiabilidad y mantenibilidad, por ende, con baja tasa de fallas, puede ser que esa baja tasa de fallas nos traiga consecuencias altas para el proceso productivo, o consecuencias al medio ambiente o a la seguridad.

### 2.4.1.3 Análisis FMECA

De las siglas en inglés “Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (en español “Análisis de Modos de Fallo, Efectos y Criticidad”), es un análisis realizado a un sistema o equipo, el cual básicamente es la columna vertebral de los pasos del RCM. Este análisis nos contesta las 4 primeras preguntas que debemos realizar cuando comenzamos con la implementación del RCM. Y visto de un modo simplista, solo nos quedaría después contestar las 3 preguntas restantes para tener nuestra implementación hecha. Este análisis se basa en la búsqueda de los modos de falla de nuestro activo elegido, en el análisis de los efectos y luego de ver las consecuencias de dichas fallas.

Este análisis tiene dos grandes etapas principales, la primera es en la que establecemos todas las funciones, fallas funcionales, modos de fallas y sus efectos. Con esto respondemos las 4 primeras preguntas del análisis. Con toda esta información ordenada, generamos nuestra “Hoja de Análisis”.

La segunda etapa es en la que contestamos las últimas 3 preguntas del análisis y aquí es donde definimos las actividades de mantenimiento más idóneas y eficientes para evitar los modos de falla mencionados en la Hoja de Análisis. Esta se conoce como “Hoja de Resultados” y aquí quedan registradas las tareas a realizar, la frecuencia y los responsables de aquellas tareas.

Una vez completadas estas dos hojas, ya habremos generado nuestra planilla FMECA.

A continuación, se muestra la manera de ir ejecutando esta hoja de análisis y su respectiva hoja de resultados. Se toma como ejemplo uno de los componentes pertenecientes a la etapa de alimentación del molino. El componente corresponde a una válvula pinch y se usará un extracto de la planilla generada para los componentes del equipo.

Según los pasos descritos para generar nuestro FMECA, se comienza estableciendo una función para cada componente dentro del equipo seleccionado.

Estas funciones pueden ser más de una por equipo y deben ser descritas de manera genérica como se indicó en el paso a paso (verbo + objeto + estándar de desempeño).

Tabla 2-1: Ejemplo de “Hoja de Análisis”

Componente	Función	Falla Funcional
<b>Válvula Pinch de Alimentación</b>	Abrir/Cerrar paso de pulpa hacia interior de molino	No permite paso de alimentación de pulpa al interior del molino
		No permite corte de alimentación de pulpa al interior del molino
	Mantener cerrado el retorno de pulpa hacia la línea de alimentación	Retorna pulpa hacia las líneas de alimentación de pulpa y de agua
	Mantener cerrado el retorno de medios de molienda hacia la línea de alimentación	Retornan medios de molienda hacia las líneas de alimentación de pulpa y agua

*Elaboración propia. (2023). [Extracto de planilla generada para la hoja de análisis del equipo, aquí se enlistan las funciones de un componente determinado y sus respectivas fallas funcionales]. Recuperado 2023*

En el ejemplo se muestra la válvula pinch de alimentación del molino (Tabla 2-1), en la segunda columna se enlistan sus funciones y seguido a esta, en la tercera columna, se explican las fallas funcionales para cada función descrita.

Estas fallas funcionales son las acciones que harían que el componente realizara todo lo contrario a la función requerida.

Luego de generar el listado completo de las funciones y sus fallas funcionales, debemos enfocarnos en buscar los modos de falla para cada falla funcional, que podrían eventualmente ser más de uno por cada falla y también los efectos de dichas fallas sobre el sistema, equipo, planta o cualquier elemento que sea vea directamente afectado con este modo de falla.

En la tabla a continuación (Tabla 2-2), se sigue explicando la metodología con el mismo ejemplo tomado de la planilla en base a la válvula pinch de alimentación.

Tabla 2-2: Ejemplo de “Hoja de Análisis”

Falla Funcional	Modo de falla	Efecto de falla
<b>No permite paso de alimentación de pulpa al interior del molino</b>	Fallo de relé	No es posible accionar válvula de cilindro neumático
	Corte de suministro de aire comprimido	No es posible accionar mecánicamente el cilindro neumático
	Fallo del cilindro	No es posible la apertura de la cámara de la válvula
<b>No permite corte de alimentación de pulpa al interior del molino</b>	Fallo de relé	No es posible accionar válvula de cilindro neumático
	Corte de suministro de aire comprimido	No es posible accionar mecánicamente el cilindro neumático
	Fallo del cilindro	No es posible el cierre de la cámara de la válvula
	Rotura de camisa	Filtración de pulpa a través de la recamara de la válvula
<b>Retorna pulpa hacia las líneas de alimentación de pulpa y de agua</b>	Contaminación de línea de agua de proceso, con la pulpa retornada	Probabilidad de embancamiento con pulpa de la línea de agua una vez la pulpa se seca
	Embancamiento de línea de pulpa	Una vez la pulpa se seca, se embanca la línea de alimentación
<b>Retornan medios de molienda hacia las líneas de alimentación de pulpa y agua</b>	Contaminación de línea de agua de proceso, con medios de molienda	Medios de molienda bloquean el paso de agua
	Contaminación de línea de pulpa, con medios de molienda	Medios de molienda bloquean paso de pulpa
	Bloqueo de bola de válvula check con medios de molienda	Bola de la válvula, es bloqueada por los medios de molienda, dando paso a filtración tanto de agua como de pulpa

*Elaboración propia. (2023). [Extracto de planilla generada para la hoja de análisis del equipo, aquí se muestran los modos de falla de un componente determinado]. Recuperado 2023*

Una vez completada esta parte del análisis, ya habremos contestado las 4 primeras preguntas de esta herramienta.

Luego de esta parte, debemos generar nuestra “Hoja de Decisiones”, que será nuestra planilla en la que plasmaremos también en columnas, que tarea debemos realizar para prevenir el modo de falla descrito, la frecuencia con la que se realizará dicha tarea y, por último, el o los responsables de ejecutar estas tareas en las frecuencias determinadas.

Para este caso, tomaremos como ejemplo solo uno de los modos de falla para no extendernos con una planilla muy amplia. Prácticamente el formato será el mismo para el resto de la planilla.

Modo de falla	Tarea Propuesta	Frecuencia	Responsable
Fallo de relé	Reemplazo de relé	Semestralmente	Eléctrico de turno

Para complementar esta información, el FMECA utiliza una matriz de criticidad, la cual nos permite jerarquizar los componentes de activo, de manera que podamos priorizar aquellos que generan una mayor consecuencia en el entorno.

Esta matriz se genera en base a unas ponderaciones que se determina por un cuerpo de expertos, en la cual se le dan valores, es decir se usa una escala cualitativa para diferentes escenarios.

Este análisis, determinara las consecuencias que cada modo de falla genera en la producción, la seguridad y el medio ambiente. Además, también se genera una escala para la frecuencia.

#### 2.4.1.3.1 Matriz de criticidad

La matriz de criticidad es una de las herramientas fundamentales para un análisis FMECA. Con esta, priorizaremos cuál de los activos tendrá mayor importancia para generar el análisis y así priorizar el recurso.

La matriz dentro del contexto del FMECA, generalmente se obtiene combinando dos parámetros:

- **Probabilidad de ocurrencia (O):** aquí se evalúa la frecuencia o probabilidad con que el activo pueda fallar.
- **Consecuencia (C):** evalúa el impacto de la falla de dicho activo en el sistema.

El producto de estos dos parámetros es el “Índice de Criticidad” (CR):

$$CR = O \times C$$

Luego los activos se clasifican en función del resultado obtenido, generando un ranking en donde los valores más altos, son los equipos más críticos y los que deben recibir mayor atención para el proceso del RCM con implementación de los planes de mantenimiento y/o medidas mitigadoras.

A continuación (Fig. 2-13), se puede ver una matriz típica de 5x5, la cual será usada para el análisis del trabajo actual.

Figura 2-13: Matriz de criticidad

<b>Frecuencia</b>	<b>5</b>	A	A	MA	MA	MA
	<b>4</b>	M	M	A	A	MA
	<b>3</b>	M	M	M	A	MA
	<b>2</b>	B	B	B	M	A
	<b>1</b>	B	B	B	M	A
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
		<b>Consecuencias</b>				

Elaboración propia. (2023). [Matriz elaborada para la evaluación del análisis de criticidad de los componentes del molino].

Recuperado 2023

En donde las zonas presentadas quieren decir MA (Muy Alta Criticidad), A (Alta Criticidad), M (Media Criticidad) y B (Baja Criticidad). Con estas zonas clasificaremos nuestros activos según las ponderaciones.

Según esta matriz, se calculan las ponderaciones para generar el ranking para todo el grupo de subsistemas presentes dentro del molino como equipo (Tabla 2-3).

Tabla 2-3: Jerarquización de activos según matriz de criticidad

TAG	COMPONENTE	FF	SHA	CA	IP-CM	CONSEC.	TOTAL	JERARQUIZACIÓN
DESC-001	Tolva de medios de molienda	1	1	2	2	2	2	Baja Criticidad
DESC-002	Motor trifásico principal	2	1	5	4	5	10	Alta Criticidad
DESC-003	Caja Reductora principal	2	1	5	4	5	10	Alta Criticidad
DESC-004	Unidad de lubricación	1	3	3	3	3	3	Baja Criticidad
DESC-005	Unidad de separación de carcasa	1	2	1	2	2	2	Baja Criticidad
DESC-006	Unidad hidráulica	1	4	1	2	4	4	Media Criticidad
MOL-001	Carcasa de molino	2	3	3	4	4	8	Media Criticidad
MOL-002	Eje de molino (ensamble)	3	1	5	4	5	15	Muy Alta Criticidad
MOL-003	Revestimientos de carcasa	3	3	4	4	4	12	Alta Criticidad
MOL-004	Polipasto de cadena de izaje de eje	1	5	1	2	5	5	Alta Criticidad
MOL-005	Cámara de descarga	1	2	2	2	2	2	Baja Criticidad
MOL-006	Tapa inferior de molino	2	3	4	3	4	8	Media Criticidad
ALIM-001	Válvula antirretorno	2	1	2	2	2	4	Baja Criticidad
ALIM-002	Válvula de drenaje	1	1	1	2	2	2	Baja Criticidad
ALIM-003	Válvula de alimentación	1	1	4	3	4	4	Media Criticidad
ALIM-004	Sensor de temperatura de cámara	1	1	1	1	1	1	Baja Criticidad
ALIM-005	Sensor de posición de válvula de alimentación	1	1	1	1	1	1	Baja Criticidad
ALIM-006	Sensor de posición de válvula de drenaje	1	1	1	1	1	1	Baja Criticidad

Elaboración propia. (2023). [Tabla generada para la jerarquización de los subsistemas del molino]. Recuperado 2023

### 2.4.1.3.2 Numero de Prioridad de Riesgo (NPR)

Esta herramienta del FMECA, es un número adimensional que se denomina “Numero de Prioridad de Riesgo”, conocido también como RPN (del inglés Risk Priority Number). Dicho valor se obtiene del producto de la Probabilidad de Detección (D), Severidad (S) y de la Probabilidad de Ocurrencia (O).

$$RPN = D \times S \times O$$

Como se comentó, este número se debe calcular para todos los modos de falla y nos permite establecer el rango de riesgo en función del cual establecemos el tipo de mantenimiento recomendado por la hoja de decisión.

Es una herramienta complementaria junto con la matriz de criticidad la cual tiene el mismo principio básico, jerarquizar elementos. Pero en este caso nos servirá para establecer prioridades en base al ranking de riesgo de los modos de falla.

La probabilidad de detección (D), nos indica la posibilidad de detectar la falla antes que ocurra (Figura 2-14).

Figura 2-14: Ejemplo de tabla de probabilidad de detección

Probabilidad de detección	Descripción	Evaluación
Virtualmente imposible	Las medidas de prueba y/o monitoreo de máquinas pueden no detectar la posible causa / fallas secuenciales o <b>no hay</b> medidas de prueba / <b>monitoreo</b> de máquinas instaladas	10
Extremadamente baja	<b>Extremadamente baja</b> posibilidad de que medidas de prueba / monitoreo de máquinas van a <b>reconocer</b> posible causa / <b>fallas</b> secuenciales o <b>chequeos son aleatorios</b> .	9
Muy baja	<b>Muy baja</b> posibilidad de que medidas de prueba / monitoreo de máquinas van a <b>reconocer</b> posible causa / <b>fallas</b> secuenciales o <b>monitoreo no es confiable</b> .	8
Baja	Las medidas de prueba / monitoreo de máquinas no previenen la ocurrencia del error, <b>monitoreo va a identificar la causa y habilitar la aislación de la falla</b> después de su ocurrencia.	7
Media baja	Baja posibilidad de que medidas de prueba / monitoreo puedan identificar la posible causa / fallas secuenciales. <b>Monitoreo va a mostrar una falla</b> .	6
Media	Posibilidad media de que medidas de prueba / monitoreo puedan reconocer la causa o fallas secuenciales. <b>Monitoreo va a mostrar una falla anticipadamente</b> .	5
Media alta	Posibilidad ligeramente alta de que medidas de prueba / monitoreo puedan reconocer la causa o fallas secuenciales. <b>Monitoreo puede prevenir una falla anticipadamente</b> .	4
Alta	Alta posibilidad de que medidas de prueba / monitoreo puedan reconocer causa o fallas secuenciales. <b>Monitoreo muestra dato en tiempo real</b> para identificar fallas y causas anticipadamente. <b>Fallas pueden ser prevenidas con éxito</b> .	3
Muy alta	Muy alta posibilidad de que medidas de prueba / monitoreo puedan reconocer la causa o fallas secuenciales. <b>Monitoreo muestra dato en tiempo real</b> para identificar fallas y causas anticipadamente. <b>Fallas pueden ser prevenidas con éxito</b> .	2
Casi cierta	La medida de prueba / monitoreo ciertamente reconoce la causa o fallas secuenciales. <b>Monitoreo muestra dato en tiempo real</b> para identificar fallas y causas anticipadamente. <b>Fallas pueden ser prevenidas con éxito</b> .	1

Diseño e implementación de plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para etapa crítica del proceso de secado de hoja de Celulosa. (2020). [Ponderaciones relativas de la probabilidad de detectar la falla antes de que ocurra según Celulosa

Arauco]. Recuperado 2023

La severidad de la falla (S), nos dice el impacto que tendrá la falla cuando ocurre (Figura 2-15). Esta debe ser generada por una mesa multidisciplinaria, ya que debe incluir factores tanto como de seguridad, medio ambiente y de nivel productivo.

Figura 2-15: Ejemplo de tabla de probabilidad de severidad

Severidad	Descripción	Evaluación
Riesgo de seguridad personal.	Vida y seguridad de la gente está en riesgo: la falla afecta la seguridad del proceso. Eso puede llevar a daños corporativos altos.	10
Violación de la ley.	Violaciones de la ley son posibles: la falla causa una violación de la ley o no cumple con reglas regulatorias (e.g., polución). Personas no están en peligro.	9
Falla total de función primaria, impacto alto en producción.	Función primaria falló totalmente. El equipo no está operacional y genera parada de producción significativa: 100% de pérdida productiva por más de 24 horas.	8
Falla parcial de función primaria, impacto medio en producción.	Función primaria falló parcialmente. El equipo no está totalmente operacional según especificaciones y genera limitación de producción significativa: 100% de pérdida productiva por 12-24 horas o más de 50% de pérdida productiva por más de 24 horas.	7
Falla total de función secundaria, impacto bajo en producción.	Función secundaria falló totalmente: 100% de pérdida productiva por 6-12 horas o más de 50% de pérdida productiva por más de 12 horas.	6
Funciones secundarias limitadas, algún impacto en producción.	Función secundaria falló parcialmente: 100% de pérdida productiva por 2-6 horas o restricciones de capacidad de equipo en standby comprometiendo producción en hasta 50% por hasta 12 horas.	5
Impacto en producción bajo.	100% de pérdida productiva por 0,5-2 horas o restricciones de capacidad de equipo en standby comprometiendo producción en hasta 20% por hasta 12 horas.	4
Impacto en producción muy bajo.	100% de pérdida productiva por hasta 0,5 hora o restricciones de capacidad de equipo en standby comprometiendo producción en hasta 20% por hasta 6 horas.	3

Diseño e implementación de plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para etapa crítica del proceso de secado de hoja de Celulosa. (2020). [Ponderaciones relativas de severidad de las fallas cuando ocurren según Celulosa Arauco]. Recuperado 2023

La probabilidad de ocurrencia (O) está relacionada con la probabilidad de que ocurra la falla en un tiempo determinado (Figura 2-16). Para esto necesitamos datos reales obtenidos del historial del equipo de tal manera que podamos interpolar lo más aproximado posible los grados de ocurrencia. De no tener datos, se debe generar por expertos.

Figura 2-16: Ejemplo de tabla de probabilidad de ocurrencia

Probabilidad	Descripción	Evaluación
Falla ocurre a cada hora	Una falla por hora	10
Falla ocurre a cada turno	Una falla por 8 horas	9
Falla ocurre a cada día	Una falla por día	8
Falla ocurre a cada semana	Una falla por siete días	7
Falla ocurre a cada mes	Una falla por mes	6
Falla ocurre a cada tres meses	Una falla por tres meses	5
Falla ocurre a cada seis meses	Una falla por seis meses	4
Falla ocurre a cada año	Una falla por año	3
Falla ocurre a cada 2 años	Una falla por dos años	2
Falla ocurre a cada 5 años o mas	Una falla por cinco años o mas	1

Diseño e implementación de plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para etapa crítica del proceso de secado de hoja de Celulosa. (2020). [Ponderaciones relativas de probabilidad de ocurrencia de falla según Celulosa Arauco]. Recuperado 2023

Una vez tengamos todos los valores calculados para cada modo de falla en una planilla, podemos realizar la comparación con alguna matriz de criticidad ya establecida por el equipo de trabajo (Figura 2-17).

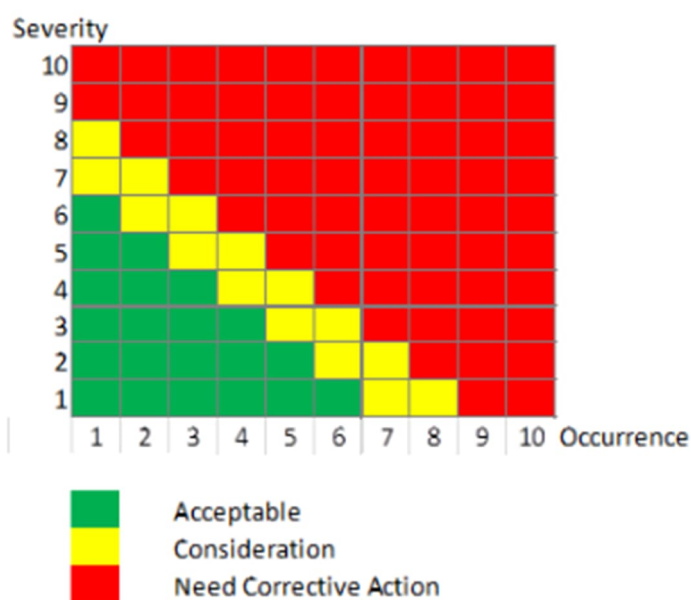
Figura 2-17: Clasificación de subsistemas según RPN

	Probabilidad de detección	Severidad	Probabilidad de Ocurrencia	RPN	Riesgo
Elementos principales de molino	D	S	O		
Tolva de medios de molienda	7	2	3	42	Medio
Motor trifásico principal	3	8	4	96	Alto
Caja Reductora principal	3	8	4	96	Alto
Unidad de lubricación	5	4	3	60	Alto
Unidad de separación de carcasa	7	2	2	28	Medio
Unidad hidráulica	6	2	2	24	Medio
Carcasa de molino	3	4	1	12	Bajo
Eje de molino (ensamble)	4	8	4	128	Alto
Revestimientos de carcasa	4	5	3	60	Medio
Polipasto de cadena de izaje de eje	2	2	1	4	Bajo
Cámara de descarga	1	4	1	4	Bajo
Tapa inferior de molino	1	6	3	18	Medio
Válvula antirretorno	1	4	3	12	Bajo
Válvula de drenaje	1	1	4	4	Bajo
Válvula de alimentación	3	6	4	72	Alto
Sensor de temperatura de cámara	1	1	2	2	Bajo
Sensor de posición de válvula de alimentación	1	1	2	2	Bajo
Sensor de posición de válvula de drenaje	1	1	2	2	Bajo

Elaboración propia. (2023). [Categorización de subsistemas del molino según RPN]. Recuperado 2023

Esta matriz también debe ser evaluada por este equipo para ponderar las zonas y así poder catalogar toda la planilla obtenida con los resultados de RPN (Figura 2-18).

Figura 2-18: Ejemplo de matriz para RPN.



Google. (s.f.). [Ejemplo de matriz de riesgo para RPN]. Recuperado 2023, de <https://www.iqasystem.com/wp-content/uploads/2017/08/Risk-Matrix-Severity-and-Occurence.png>

**3      DEFINICION DE TAREAS DE MANTENIMIENTO Y ANALISIS DE COSTO**  
**V/S BENEFICIOS**

### 3.1 CURVAS DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

En los capítulos anteriores, se habló sobre las curvas de calibración que debían realizarse, puesto que estas nos darán un rango del trabajo del equipo en el cual podremos movernos e ir sabiendo de manera aproximada las tasas de desgaste que tendremos al interior del molino.

Estas curvas se realizaron en conjunto con el personal de operación de la planta, obteniendo los resultados necesarios para construir los gráficos y lograr cerrar esta etapa de calibración.

Se realizaron las pruebas en ambos equipos, con 30%, 40% y 50% de medios de molienda, lo que corresponde a 15.000 kg, 20.000 kg y 25.000 kg de medios respectivamente. La calibración con 60% de medios no alcanzo a realizarse debido a factores externos de la gestión y porque Operaciones necesitaba comenzar a utilizar los molinos.

La calibración se realizó con el rango de flujo de alimentación partiendo desde cero m<sup>3</sup>/h hasta los 300 m<sup>3</sup>/h, además se hizo girar el equipo en el rango de 50 rpm hasta 166 rpm.

La idea es que, con estas curvas de consumo de potencia, luego podamos obtener la aproximación de los medios de molienda que tenemos al interior del equipo a medida que logremos obtener el P80 deseado.

Cuando la búsqueda de medios de molienda se comience a salir de los parámetros de los gráficos y no logremos dar con el dato, esto nos dirá que los rotores comenzaron a gastarse y por ende debe planearse una inspección para medir espesores y desde ya, planificar una mantención.

En esta inspección, podemos obtener la tasa de desgaste, realizando la medición de cuanto material perdió el rotor en comparación con uno nuevo y haciendo el contraste con el tonelaje de material procesado. Esta relación es completamente proporcional y lineal, por lo que podemos realizar la proyección y determinar en qué momento el rotor cumplirá su ciclo de vida. Este mismo ejercicio lo podemos realizar con los Liners de carcasa.

A continuación, se muestran las curvas obtenidas para los 3 porcentajes de medios de molienda y sus respectivas curvas de consumo de potencia (Figura 3-1, 3-2, 3-3).

Figura 3-1: Curva de calibración para 30% de medios

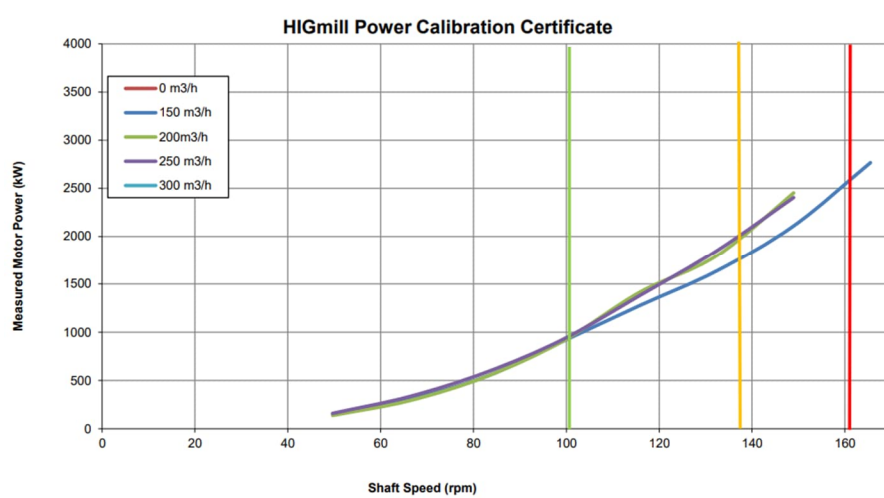


Figura 3-2: Curva de calibración para 40% de medios

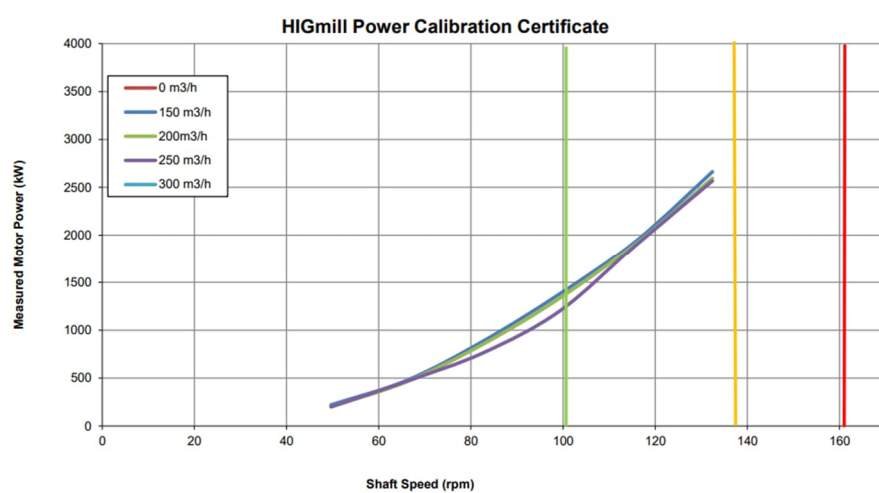
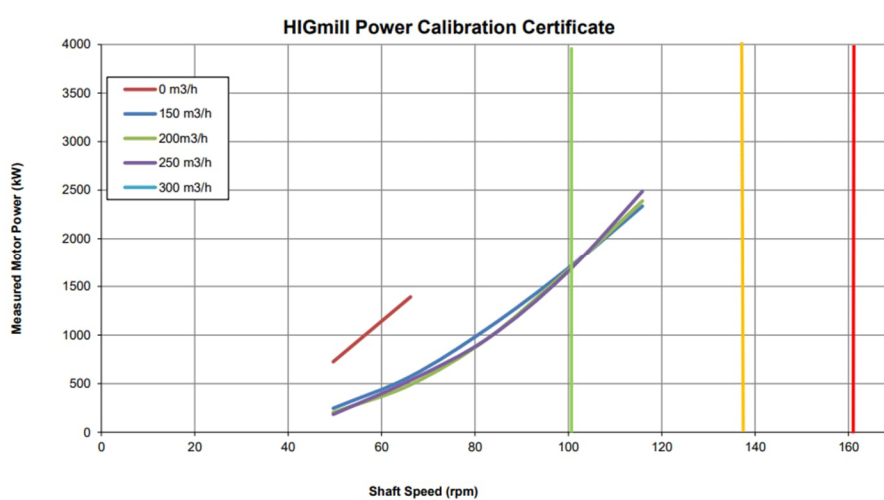


Figura 3-3: Curva de calibración para 50% de medios



Informe de calibración para molinos 27 y 28 planta SGO, Área de Process Optimization Metso. (2023). [Extracto de las curvas de calibración realizadas para uno de los molinos de planta SGO]. Recuperado 2023

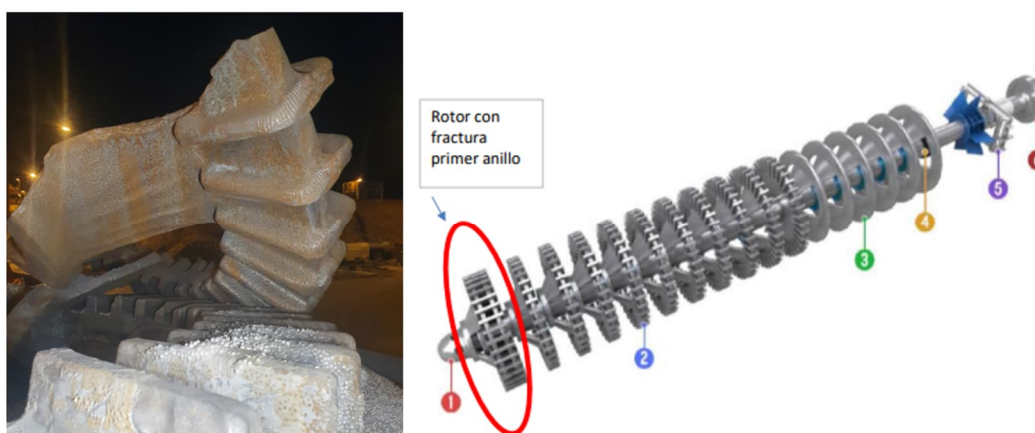
### 3.2 HISTORIAL DE MANTENCIONES

Los registros de mantenimiento del equipo comenzaron a mediados del año 2021. Al tiempo después de realizar el comisionamiento y la puesta en marcha de los equipos, estos comenzaron a mostrar signos de funcionamiento erróneo, poca eficiencia en la molienda y peaks de sobre consumo en potencia de trabajo.

Al poco tiempo de estos eventos, ya estaba programada una mantención cuando en uno de los turnos, un operador sintió ruidos anómalos al interior del equipo. Esto conllevó una detención de emergencia para poder realizar una inspección.

El resultado, fue que uno de los rotores, se desgastó hasta el punto de desprenderse de la zona donde se encontraba montado en el eje (Figura 3-4).

Figura 3-4: Rotor con falla



*Informe de falla, Departamento de MonCon BHP. (2021). [Evidencia fotográfica de falla de rotor al interior de molino].*

*Recuperado 2023*

Para la mantención programada por este evento, el área de Mantenimiento en conjunto con el área de Confiabilidad, decidieron comenzar con una estrategia de mantenimiento preventivo, en el cual se realizaría el cambio completo de componentes del eje. Así mismo, se decidió establecer frecuencias de mantenimiento cada 3 meses, independiente de la condición del equipo, puesto que, durante la primera campaña de uso, consideraron que los componentes tuvieron un poco vida útil tomando en cuenta que el equipo no estaba operando al 100% de su capacidad y, aun así, los componentes duraron cerca de 7 u 8 meses.

En el caso de los Liners, se analizaría el cambio en cada mantención que se realizara, ya que, al momento de la falla comentada, estos se encontraban en condiciones relativamente mejores que los rotores.

### 3.2.1 Costos principales de cada mantención

De acuerdo con los datos entregados por la empresa y además datos recogidos desde las cotizaciones entregadas por el proveedor, se estima que solo en concepto de repuestos y HH por el servicio de mantención del eje, los valores pueden llegar hasta los €450.000 (Tabla 3-1), esto sin contar la dotación necesaria para el desmontaje, recursos como grúas, horas de indisponibilidad de la planta, transporte, etc.

Tabla 3-1: Costos de componentes de eje

Ítem	Valor unitario (USD)	Cantidad por eje	Total
Rotores castelados	\$ 20.028	11	\$ 220.308
Rotores no castelados	\$ 18.369	6	\$ 110.214
Espaciadores	\$ 4.580	15	\$ 68.700
Protección de extremo eje	\$ 50.453	1	\$ 50.453
Impulsor	\$ 27.212	1	\$ 27.212
<b>Total</b>			<b>\$ 476.887</b>

Elaboración propia. (2023). [Costos obtenidos según información interna de la compañía]. Recuperado 2023

Además, por el lado de los revestimientos, tenemos que, bajo la estrategia actual, se están reemplazando 2/3 de los revestimientos interiores del molino independiente de la condición, es decir de las 6 filas de Liners que posee el equipo, se reemplazan las 4 inferiores en cada ocasión. Este reemplazo se realiza cada 6 meses, por lo que calza en programación con uno de los reemplazos del eje.

Al igual que con los datos del eje, se recopilaron los últimos costos declarados de los Liners utilizados (Tabla 3-2).

Tabla 3-2: Costos de Liners de interior de molino

Ítem	Valor unitario (USD)	Cantidad por molino	Total
Tapa Inferior	\$ 56.287	1	\$ 56.287
Liner superior (5ta y 6ta fila)	\$ 54.326	4	\$ 217.304
Liner superior (4ta fila) ←	\$ 50.477	2	\$ 100.954
Liner central (3ra fila) ←	\$ 46.679	2	\$ 93.358
Liner inferior (2da fila) ←	\$ 46.679	2	\$ 93.358
Liner inferior (1ra fila) ←	\$ 41.912	2	\$ 83.824
<b>Total</b>			<b>\$ 645.085</b>

Elaboración propia. (2023). [Costos obtenidos según información interna de la compañía]. Recuperado 2023

Como se mencionó, para estos componentes solo se realiza el cambio de los ítems marcados con amarillo, es decir las 4 filas inferiores del molino. Esto nos da un costo de USD \$371.000.

A continuación, se realizará un desglose de los costos de recursos asociados para cada mantención realizada (Tabla 3-3), tomando en cuenta los factores mencionados anteriormente. La idea es dimensionar el costo que se está asumiendo hoy en día con la estrategia propuesta por el área de Mantención. Luego de esto, podremos también valorizar el ahorro que podría realizarse tomando en cuenta las recomendaciones del plan de mantenimiento RCM propuesto en este trabajo.

Tabla 3-3: Costo de recursos asignados

Recursos	Valor unitario (USD/día)	Cantidad por servicio	Total
Dotación (Mecánicos)	\$ 120	100	\$ 12.000
Dotación (Riggers)	\$ 150	10	\$ 1.500
Dotación (Eléctricos)	\$ 120	30	\$ 3.600
Dotación (Varios)	\$ 200	40	\$ 8.000
Grúa	\$ 2.500	6	\$ 15.000
Transporte (servicio de armado)	\$ 2.500	2	\$ 5.000
Servicio armado (externo)	\$ 46.700	1	\$ 46.700
<b>Total</b>			<b>\$ 91.800</b>

Elaboración propia. (2023). [Costos obtenidos según información proporcionada por BHP]. Recuperado 2023

El ítem de “Dotación” considera el personal para el desmontaje y montaje del eje en turno día y turno noche durante 5 días que son los que generalmente se destinan para esta mantención. Por ejemplo, los mecánicos, se necesitan 10 en cada turno, por lo que son en total 20 mecánicos para ambos turnos durante 5 días, nos da un total de 100 “unidades” para toda la mantención.

El ítem “Transporte” considera viaje ida y vuelta del eje hacia el centro de servicio donde se realiza esta actividad.

La grúa se considera generalmente durante ambos turnos del primer día para el desarme y desmontaje del molino, luego al final de la mantención para el montaje y armado del molino y un día entremedio para el carguío de componentes varios y el carguío del eje desmontado en el camión para transporte hacia su futura reparación. En total son 6 turnos.

Si esto lo llevamos a la programación durante un año calendario (Figura 3-5), nos queda algo similar a esto:

Figura 3-5: Calendario de mantenimientos para molinos

Meses		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Molino 1	Eje												
	Liners												
Molino 2	Eje												
	Liners												

Elaboración propia. (2023). [Esquema de calendarización de mantenimientos, según fechas proporcionadas por la Gerencia de Mantenimiento]. Recuperado 2023

Cada cuadro en verde representa la mantención para el ítem señalado en las columnas. Como se puede apreciar, las de Liners se hacen coincidir con los cambios de eje para así poder optimizar los recursos y evitar tantas detenciones de los equipos durante el año.

Se debe considerar que, para cada mes marcado, se suman además los costos según la Tabla 3-3 sobre los recursos asignados.

Si llevamos todo esto a un resumen de costos por actividad y multiplicado por la cantidad de veces que se realizan estas actividades (Tabla 3-4), tenemos lo siguiente:

Tabla 3-4: Costos totales anuales de mantenimiento

Actividad	Costo (USD)	Cantidad por año	Total
Cambio de eje	\$ 449.675	8	\$ 3.597.400
Cambio de liners	\$ 270.540	4	\$ 1.082.160
Recursos (dotación, grúas, etc.)	\$ 91.800	8	\$ 734.400

Total	\$ 5.413.960
-------	--------------

Elaboración propia. (2023). [Resumen de costos totales relacionados con el mantenimiento]. Recuperado 2023

Como podemos apreciar, los costos totales para la mantención de los molinos en un año calendario, ascienden a \$5.5 MM aproximadamente. De acuerdo con los cálculos, se contemplan solo las horas planificadas para esta actividad, no se consideran contratiempos ni retrasos.

Se debe aclarar también, que estos costos están contemplando el cambio total de componentes del eje. No se está considerando evaluación según condición de ningún componente.

A esto debemos sumar por defecto, el costo por indisponibilidad del equipo, que según datos recogidos informalmente (ya que tiende a ser información confidencial), bordea los USD \$35.000 / hrs.

Esta mantención generalmente se programa para 100 hrs. Es decir, estamos hablando que este molino detenido, deja de producir cerca de USD \$3.5 millones durante su shutdown. Si esta cifra la multiplicamos por las 8 detenciones anuales que se generan para estas actividades, nos da un total de USD \$28 millones durante el año, si a esto le sumamos los USD \$5,5 que teníamos en concepto de repuestos y recursos, nos da una cifra final de USD \$33,5 millones al año.

Si bien la estrategia analizada en este trabajo no busca reducir el MTTR del equipo, se busca aumentar el MTBF para tener menos detenciones al año y además de esto, optimizar el reemplazo de componentes con frecuencias más adecuadas y así lograr una reducción de costos más consistente.

### **3.3 COSTO DE IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN PROPUESTO**

Según vimos en el punto anterior, los costos actuales están siendo cercanos a los USD \$33,5 millones por año tomando en cuenta repuestos necesarios, recursos asignados y horas de indisponibilidad del equipo.

Con este plan de mantenimiento propuesto, se espera poder adaptar las frecuencias de cambio de componentes para así poder aumentar el MTBF de estos.

Como ya se había comentado, la estrategia actual estaba siendo tanto según el criterio de los mantenedores como también de los comentarios de los operadores. Es por esto, que está siendo exageradamente conservadora y se estaban generando reemplazos de componentes que aun gozaban de una considerable vida útil remanente. Es por esto por lo que nace esta inquietud de analizar el espectro de componentes asociados a cada mantención y así generar rutinas de mantenimiento más adecuadas, en las que analicemos por separado la duración de cada componente según el corto historial que se tiene de operación del equipo.

Según el análisis realizado, el cual se basó en información proporcionada por la planta en lo que se refiere a análisis de tasas de desgaste, indicaciones del fabricante y también el análisis del historial de las mantenciones, la vida útil de los componentes que menos duran es cercana a los 7 meses, ese sería el tiempo mínimo que se tendría de MTBF para ambos equipos.

Según los datos recogidos, los 5 rotores inferiores son los que más están sufriendo desgaste en los primeros 7 meses de uso. Por lo que no será necesario estar realizando el cambio de todos los componentes en este periodo. A continuación, se mostrará en una tabla similar a la Figura 3-5, la calendarización recomendada según el análisis del FMECA y las frecuencias de mantenimiento asignadas para cada componente.

El costo involucrado, se analizará en un periodo de 24 meses (Tabla 3-5), ya que mediante el análisis FMECA de los componentes, se determinó que algunos tendrán esta frecuencia de cambio.

Tabla 3-5: Costos de mantenimiento proyectados a 24 meses

		Meses																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Eje	Rotores Castelados (5)						Mantenimiento						Mantenimiento						Mantenimiento						Mantenimiento
	Rotores Castelados (6)						Inspección						Mantenimiento						Inspección						Mantenimiento
	Rotores no castelados (6)												Inspección												Mantenimiento
	Espaciadores						Mantenimiento						Mantenimiento							Mantenimiento					Mantenimiento
	Tapa de extremo de eje												Mantenimiento												Mantenimiento
	Impulsor												Inspección												Mantenimiento
	Prensa												Inspección												Mantenimiento
Liners	Liners inferior 1ra fila						Mantenimiento						Mantenimiento							Mantenimiento					Mantenimiento
	Liners inferior 2da fila						Mantenimiento						Mantenimiento							Mantenimiento					Mantenimiento
	Liner central 3ra fila						Inspección						Mantenimiento							Inspección					Mantenimiento
	Liner superior 4ta fila						Inspección						Mantenimiento												Mantenimiento
	Liner superior 5ta y 6ta fila												Inspección												Mantenimiento
	Tapa inferior						Inspección						Mantenimiento							Inspección					Mantenimiento
Periféricos	Reductor de velocidad												Inspección												Tarea a condición (de ser necesario)
	Motor trifásico												Inspección												Tarea a condición (de ser necesario)
	Acoplamiento de motor												Inspección												Tarea a condición (de ser necesario)
	Unidad de separación												Inspección												Tarea a condición (de ser necesario)
	Tolva de medios de molienda												Inspección												Tarea a condición (de ser necesario)
	Válvula de alimentación						Inspección						Inspección							Inspección					Tarea a condición (de ser necesario)
	Válvula de drenaje						Inspección						Inspección							Inspección					Tarea a condición (de ser necesario)
	Válvula Pinch						Inspección						Inspección							Inspección					Tarea a condición (de ser necesario)
	Válvula check						Inspección						Inspección							Inspección					Tarea a condición (de ser necesario)
Costos de cada mantención		Repuestos:		\$ 346.022				+		\$ 710.955				+		\$ 346.022				+		\$ 1.121.972		Total 24 meses	
		Recursos:		\$ 91.800						\$ 91.800						\$ 91.800						\$ 91.800		\$ 2.892.171	

Elaboración propia. (2023). [Frecuencia recomendada de reemplazo de componentes según el análisis realizado]. Recuperado 2023

Como se puede apreciar en la Tabla 3-5, todos los costos fueron proyectados para un periodo de 24 meses, ya que así se podía tener la noción del gasto completo que significa la mantención integra del equipo.

Según se indica en la tabla, la recomendación según las frecuencias de mantenimiento provenientes del análisis FMECA, se pasa de 3 a 6 meses de MTBF. Además del aumento de este indicador, se recomienda también realizar el cambio solo de algunos componentes para dejar otros solo con inspecciones dentro de la misma frecuencia.

En la tabla se indica cuáles son los componentes que requieren cambio y cuales solo inspección.

En la sección de periféricos, se encuentran aquellos componentes los cuales quedaran con mantención según condición. Las frecuencias de inspecciones se basarán según las indicaciones del fabricante y la mantención se realizará solo en caso de requerirlo. Debido a esto, no se consideraron dentro de la comparación del análisis económico.

Para el caso del motorreductor, por ejemplo, se dejó una serie de tareas de inspección para realizar a los 12 meses, las cuales incluyen análisis de aceite, análisis de vibración y ruido. Cabe mencionar que este equipo y el motor, cuentan con respectivos sensores los cuales también ayudaran durante el año, a que se mantengan monitoreados.

Si analizamos los números, tenemos que el costo proyectado después de 24 meses de actividades nos da un total de \$2.892.171.

Por otro lado, tenemos el costo que habíamos calculado en base al historial anual de mantenciones que se realizaba, el cual nos dio un valor de \$5.413.960.

Si realizamos la respectiva comparación de ambas cifras, tenemos que, con el plan propuesto de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, estaríamos ahorrando un monto cercano al 73% para el periodo de 24 meses. Sin lugar a duda, una cifra muy positiva para el propósito de este análisis y propuesta.

## CONCLUSION

Luego de este extenso análisis en donde se revisó el equipo, su contexto, sus problemas, sus falencias, las falencias tanto de los operadores como de los mantenedores, se logró plasmar el problema general que estaba representando su mantenibilidad para la planta y para sus usuarios.

Se explicó en la manera que el cliente optó por planes de mantenimiento demasiado conservadores, en los cuales la filosofía era intentar mantener siempre el molino con componentes nuevos para minimizar las tasas de falla y mantener así la disponibilidad de este, dentro de parámetros aceptables sin importar el costo asociado. En minería muchas veces esto es normal ya que los activos representan un valor productivo tan alto, que muchas veces no se escatima en gastos para mantener los equipos corriendo.

Claro que llega el momento en que, para este tipo de equipos nuevos, gerencia comienza a exigir ya una mejor rentabilidad del equipo una vez que pasa su periodo de estabilización. Es por esto por lo que se hizo necesario este análisis.

Como se vio, las frecuencias de mantenimiento se podían extender sin problemas según los análisis de las tasas de desgaste de la mayoría de los componentes. Las proyecciones de desgaste dan la chance de realizarlo.

Tomando en cuenta estos datos, es que se analizan las opciones disponibles para estrategias que la literatura nos entrega. Se barajan varias de estas, descartando algunas que no cumplían con los objetivos deseados. Pensando en que el objetivo de este trabajo es mejorar la confiabilidad del activos, es que se opta por el RCM ya que, por lejos, es una de las estrategias que mejor mejora de confiabilidad nos entrega.

A pesar de que el equipo poseía el indicador de disponibilidad deseado por el área de producción, el cual era cercano al 88%, se logró aumentar algunos puntos debido a que se extendió la frecuencia de detenciones. Con la definición de las tareas de mantenimiento y con el plan propuesto se podría alcanzar un 91% de disponibilidad según lo visto. Si a esto le sumamos el 73% de ahorro en costos de mantenimiento proyectado, estamos hablando de un plan RCM robusto y consistente que está avalado por los números mostrados.