



**UNIVERSIDAD DE TALCA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CRÍTICIDAD DE  
ACTIVOS APLICADO EN PLANTA DE PROCESOS PARA  
OPTIMIZAR LA PRODUCTIVIDAD EN MINERA PAICAVÍ.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL DE MINAS

NICOLÁS IGNACIO VALENZUELA TOLEDO

PROFESOR GUÍA

FRANCISCO ANDRÉS FUENTES SALCEDO

CURICÓ - CHILE

2021

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Curicó, 2022

# Resumen

En la minería el mantenimiento es importante debido a que permite que los equipos puedan operar la mayor cantidad de tiempo posible al reducir los tiempos de detención. Por lo tanto, en este trabajo se llevaron a cabo diferentes metodologías para determinar información importante sobre los equipos, desde un enfoque que consideró las actividades de mantenimiento y las fallas que se asocian a estos, lo anterior fue realizado en Minera Paicaví, la que se encuentra ubicada en la comuna de Penehue, región del Maule.

En primer lugar, se realizó el análisis de criticidad debido a que no existe una priorización en los planes y programas de mantenimiento en los equipos de la planta de procesos de Minera Paicaví, por lo que, cuando ocurrían fallas, la productividad llegaba a pararse completamente.

Por consiguiente y para este propósito de evitar este tipo de situaciones, inicialmente se hizo un levantamiento de información de las averías en un periodo de 13 meses en equipos, tales como: chancadores, molinos, correas transportadoras, bombas, celdas de flotación y harneros.

En efecto, luego de poseer el conocimiento en detalle de los activos se procedió a aplicar una metodología cuantitativa (Matriz de criticidad por riesgo), en la que se utilizó información de la frecuencia de fallas y las consecuencias asociadas. Los resultados que se obtuvieron permitieron conocer el grado de criticidad asociado a cada equipo.

Lo anterior permitió hacer una selección de estos activos y posteriormente a través de la ejecución de la metodología de Jack Knife aplicada a cada equipo de forma individual, se efectuó una clasificación de las fallas, las que fueron divididas en cuatro regiones: “Agudas y crónicas”, “agudas” y “crónicas”, estas categorías aludidas se lograron con información sobre el número de intervenciones de cada equipo y el tiempo medio para reparar (MTTR) a través de gráficos de dispersión.

Luego, lo plasmado en los gráficos posibilitó generar un Análisis de modos de fallas y efectos en aquellos componentes o actividades más críticas para el área de mantenimiento, generando información muy útil a través de recomendaciones para que puedan enfocar recursos humanos, económicos y tecnológicos en las áreas de mayor influencia en los resultados de la empresa, en otras palabras, identificar formas de actuar, planes de acción y poder mejorar la productividad en un corto y mediano plazo.

Finalmente, se logró concluir las diferentes criticidades asociadas a los activos, en ese sentido, las correas transportadoras se determinaron como el activo que presentaba una alta criticidad, seguido por las celdas de flotación, molinos y chancadores caracterizados por una media criticidad y por último los harneros y bombas con una baja criticidad. Para concluir, se generaron recomendaciones a las correas transportadoras por ser el activo con mayor criticidad, estas fueron realizadas sobre elementos como: raspadores, chutes y polines guía, así como también a actividades relacionadas a la alineación de las correas.

**Palabras clave:** Análisis de criticidad, Equipos críticos, Matriz de Criticidad, Jack-Knife, Gráficos de dispersión y AMFE.

# ABSTRACT

Maintenance is important in mining because it allows equipment to operate for as long as possible by reducing downtime. Therefore, in this work, different methodologies were carried out to determine important information about the equipment, from an approach that considered maintenance activities and the failures that are associated with them, the above was carried out in Minera Paicaví, which is located in the commune of Péncahue, Maule region.

In the first place, the criticality analysis was carried out because there is no prioritization in the maintenance plans and programs in the equipment of the Minera Paicaví process plant, so when failures occurred, productivity came to a complete stop.

Consequently, and for this purpose of avoiding this type of situation, initially a survey of information on breakdowns was carried out in a period of 13 months in equipment, such as: crushers, mills, conveyor belts, pumps, flotation cells and screens.

Indeed, after having detailed knowledge of the assets, a quantitative methodology was applied (Criticality Risk Matrix), in which information on the frequency of failures and the associated consequences was used. The results obtained allowed us to know the degree of criticality associated with each equipment.

This allowed making a selection of these assets and later, through the implementation of the Jack Knife methodology applied to each team individually, a classification of the failures was made, which were divided into four regions: "Acute and chronic ", " acute "and" chronic ", these aforementioned categories were achieved with information on the number of interventions of each team and the mean time to repair (MTTR) through scatter charts.

Then, what is reflected in the graphs made it possible to generate an analysis of failure modes and effects. in those components or activities most critical for the maintenance area, generating very useful information through recommendations so that they can focus human, economic and technological resources in the areas of greatest influence in the results of the company, in other words, identify ways to act, action plans and be able to improve productivity in the short and medium term.

Finally, it was possible to conclude the different criticalities associated with the assets, in that sense, the conveyor belts were determined as the asset that presented a high criticality, followed by the flotation cells, mills and crushers characterized by a medium criticality and finally the screens and pumps with low criticality. To conclude, recommendations were generated for the conveyor belts as they are the most critical asset, these were made on elements such as: scrapers, chutes and guide idlers, as well as activities related to the alignment of the belts.

Keywords: Criticality Analysis, Critical Equipment, Criticality Matrix, Jack-Knife, Scatter Plots and FMEA.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes y motivación .....	2
1.2. Descripción del problema .....	2
1.3. Solución Propuesta .....	3
1.4. OBJETIVOS .....	4
1.4.1. Objetivo General.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos .....	4
1.5. ALCANCES .....	5
1.7. RESULTADOS ESPERADOS.....	11
2. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1. Mantenimiento .....	12
2.2. Función del mantenimiento .....	14
2.3. Ingeniería y gestión de mantenimiento.....	15
2.4. Norma ISO-55000/1/2 .....	21
2.5. Análisis de criticidad basado en el riesgo.....	21
2.5.1. Métodos Semicuantitativos y Cuantitativos.....	23
2.5.1.1. Matriz de Criticidad por Riesgo: .....	23
2.5.1.2. Método Jack-Knife .....	27
2.5.1.2.1. ISO-Indisponibilidad .....	28
2.5.1.3. Análisis de modos de Fallas y sus Efectos (AMFE) .....	28
2.5.1.3.1. Descripción de AMFE .....	30
2.6. Reducción de Minerales.....	33
2.6.1. Chancado .....	34
2.6.2. Molienda .....	34

3.	METODOLOGÍA .....	36
3.1.	Métodos de Evaluación.....	37
3.1.1.	Matriz de criticidad basada en el riesgo.....	37
3.1.2.	Diagrama Jack-Knife .....	38
3.1.3.	AMFE .....	38
4.	RESULTADOS .....	40
4.1.	Registros de fallas de los equipos .....	40
4.2.	Consecuencias de las fallas de los Equipos .....	41
4.3.	Aplicación de Matriz de Criticidad basada en el Riesgo .....	42
4.4.	Diagrama de Jack-Knife .....	44
4.4.1.	Construcción Detallada Gráfico de Dispersión.....	45
4.4.2.	Diagrama de Jack-Knife para cada Equipo de Planta de Procesos.....	47
4.4.3.	Aplicación de Análisis de modos de fallas y efectos.....	51
4.4.3.1.	AMFE Correas Transportadoras.....	51
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	53
5.1.	Interpretación ISO-Indisponibilidad .....	55
5.2.	Recomendaciones enfocadas a correas transportadoras. ....	56
6.	CONCLUSIONES .....	62
7.	BIBLIOGRAFÍAS.....	64
8.	ANEXOS .....	67

## Índice de Figuras

Figura 1: Ubicación Proyecto Chépica (rectángulo rojo). Flanco oriental Cordillera de la Costa. Fuente: Reporte Técnico Proyecto Chépica. ....	6
Figura 2: Ubicación y accesos Proyecto Chépica. Fuente: Reporte Técnico Proyecto Chépica .....	7
Figura 3: Ubicación de Infraestructura principal de Proyecto Chépica. Fuente: Reporte Técnico Proyecto Chépica. ....	10
Figura 4: Representación gráfica de dispersión Jack-Knife. Fuente: Viveros Gunckel & Mena Bustos .....	27

## Índice de Fotografías

Fotografía 1: Planta de Chancado. Fuente: Reporte Técnico Proyecto Chépica.....	8
Fotografía 2: Molino de Bolas, Mina Chépica. Fuente: Reporte Técnico Proyecto Chépica	9
Fotografía 3: Embalse de relaves Mina Chépica. Fuente Reporte Técnico Proyecto Chépica .....	9
Fotografía 4: Polín guía de correa transportadora. Fuente: Elaboración propia.....	56

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Parámetros de la confiabilidad operacional. Fuente: (Mendoza, 2000).....	22
Ilustración 3: Matriz de Criticidad por Riesgo. Fuente: (Romero, 2013).....	24
Ilustración 4: Matriz de criticidad basada en riesgo, Fuente: (Romero, 2013) .....	37
Ilustración 5: Frecuencia de falla de los equipos. Fuente: Elaboración propia. ....	40
Ilustración 6: Aplicación de matriz de criticidad. Fuente: (Romero, 2013).....	43
Ilustración 7: Gráfico de Dispersión Jack Knife N° Intervenciones vs MTTR, Equipo: Chancadores. Fuente: Elaboración propia. ....	47
Ilustración 8: Gráfico de Dispersión Jack Knife N° Intervenciones vs MTTR. Equipo: Correas Transportadoras. Fuente: Elaboración propia. ....	48
Ilustración 9: Gráfico de Dispersión Jack Knife N° Intervenciones vs MTTR. Equipo: Celdas de Flotación. Fuente: Elaboración propia. ....	49
Ilustración 10: Gráfico de Dispersión Jack Knife N° Intervenciones vs MTTR. Equipo: Molinos. Fuente: Elaboración Propia. ....	50
Ilustración 11: Elementos principales correas transportadoras. Fuente: Rotrans. ....	57
Ilustración 12: Correa Transportadora, dividida por etapas para comprobar componentes desalineados. Fuente: Spinozzi. ....	58

## Índice de Tablas

Tabla 1: Formato muestra de AMFE. Fuente: (Bestratén Belloví & Orriols Ramos, 2004 ) .....	29
Tabla 2: Clasificación de la gravedad del modo de fallo. Fuente: (Bestratén Belloví & Orriols Ramos, 2004 ) .....	31
Tabla 3: Clasificación de la frecuencia de ocurrencia del modo de fallo. Fuente: (Bestratén Belloví & Orriols Ramos, 2004 ) .....	32
Tabla 4: Clasificación de la facilidad de detección del modo de fallo. Fuente: (Bestratén Belloví & Orriols Ramos, 2004 ) .....	32
Tabla 5: Criticidad asociada a cada activo. Fuente: Elaboración propia.....	44
Tabla 6: Componentes desalineados con sus respectivas medidas. Fuente: Spinozzi.....	58
Tabla 7: Acciones correctivas/preventivas para correas transportadoras. Fuente: Elaboración propia.....	61
Tabla 8: Formato de Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos. Fuente: Minera Paicaví.....	67
Tabla 9: Responsable de Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos. Fuente: Minera Paicaví.....	67
Tabla 10: Probabilidad de que ocurra una actividad peligrosa y/o riesgosa. Fuente: Minera Paicaví. ....	67
Tabla 11: Consecuencia producida por una actividad peligrosa y/o riesgosa. Fuente: Minera Paicaví.....	68
Tabla 12: Mapa de Criticidad asociado a las consecuencias y probabilidades de actividades peligrosas y/o riesgosas. Fuente: Minera Paicaví.....	68
Tabla 13 : Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos, Equipo: Celdas de Flotación. Fuente: Minera Paicaví.....	69
Tabla 14: Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos. Equipo: Molinos de bolas. Fuente: Minera Paicaví.....	70
Tabla 15: Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos. Equipo: Correas Transportadoras. Fuente: Minera Paicaví.....	71
Tabla 16: Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos. Equipo: Chancadores. Fuente: Minera Paicaví.....	72

Tabla 17: Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos. Equipo: Parilla Seleccionadora. Fuente: Minera Paicaví. ....	73
Tabla 18: Un resumen de los principales indicadores de rendimiento para el proceso de mantenimiento. Fuente: (Weber & Thomas, 2006).....	74
Tabla 19: Resumen de indicadores de rendimiento de mantenimiento atrasados. Fuente: (Muchiri, Pintelon, Gelders, & Martin, 2010).....	76
Tabla 20: Cantidad de fallas y Tiempos medios para reparar, Equipo: Chancador. Fuente: Elaboración propia.....	76
Tabla 21: Cantidad de fallas y Tiempos medios para reparar, Equipo: Correas Transportadoras. Fuente: Elaboración propia.....	77
Tabla 22: Cantidad de fallas y Tiempos medios para reparar, Equipo: Celdas de Flotación. Fuente: Elaboración propia.....	78
Tabla 23: Cantidad de fallas y Tiempos medios para Reparar, Equipo: Molinos. Fuente: Elaboración propia.....	79
Tabla 24: Aplicación de Análisis modal de fallos y efectos, Correas transportadoras. Fuente: Elaboración propia.....	80

# 1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de los equipos es una de las actividades más importantes en el funcionamiento de una industria, siendo esta la estructura de los costos y la responsable del 30% a 40% de los gastos operacionales en el caso de la minería (Babarovich, 2019). Por esta razón y debido a que los recursos en una empresa son limitados, se debe interiorizar que no todos los equipos tienen la misma importancia, por lo que, es fundamental destinar la mayor parte del capital a los activos con una alta influencia en los resultados de la organización y reservar una pequeña cantidad de la distribución a los que tengan un menor impacto en el logro de las metas establecidas (Garrido, 2003).

De acuerdo con el funcionamiento de los equipos en Minera Paicaví, se observa que es común que algunos fallen diariamente y de forma reiterativa, lo que evidencia una planificación deficiente con respecto al mantenimiento de los activos, que conlleva a que se produzca paralización de las actividades en la operación de la mina, disminuyendo así la productividad y ocasionando costos para la reparación de estos.

Por lo tanto, el problema que se aborda en la planta de procesos de Minera Paicaví es que no se encuentra establecida una priorización en los programas y planes de mantenimiento, por lo cual el objetivo es determinar la criticidad de los activos y luego ejecutar la herramienta de diagrama de Jack Knife y finalmente analizar los modos de fallas y sus efectos, lo que va a permitir enfocar recursos humanos, económicos y tecnológicos. También, se logra que la toma de decisiones sea más eficiente y con menor incertidumbre.

## **1.1. Antecedentes y motivación**

El problema que se abordará ocurre en las plantas de proceso de Minera Paicaví, donde se ha identificado bajas en la productividad que afectan de manera significativa en los resultados de la empresa que son ocasionadas por las fallas de los equipos, por esta razón será necesario hacer una investigación con respecto a los activos, con el objetivo de proporcionar información relevante y en detalle al área de mantenimiento para contrarrestar las deficiencias que se han observado cuando ocurren este tipo de situaciones desfavorables para la producción. La importancia de desarrollar una solución a esta problemática tiene relación a interiorizar que cada equipo tiene una relevancia diferente en la cadena de valor de la empresa, puesto que la parada, mal funcionamiento o avería de estos afecta de manera particular en la mina. Por otra parte, las consecuencias más relevantes que la solución tiene están enfocadas a mejorar la productividad de la empresa y proporcionar formas de actuar al personal de mantenimiento dependiendo de la criticidad del activo.

Además, cabe mencionar que otros autores han logrado mediante la implementación de análisis de criticidad, por ejemplo: averiguar sobre determinados equipos de apoyo de operación mina qué sistemas y subsistemas dentro de estos son cruciales, lo anterior resulta ser una etapa inicial para posteriormente comprender en funcionamiento las causas de las fallas y la forma en que impactan en el equipo (Canihuante, s.f.). Por otra parte, en un análisis de criticidad aplicado a un circuito de molienda que presentaba fallas en el proceso de producción debido a un aumento en el procesamiento de mineral, permite generar actividades mecánicas con un enfoque en disminuir la criticidad y mejorar la confiabilidad operacional (Castillo, 2016)

## **1.2. Descripción del problema**

Debido a que en todas las empresas los recursos son limitados, es de vital relevancia poder enfocar estos en la dirección correcta, el área de mantenimiento forma parte de la estructura de costos y es la responsable de una porción importante de los gastos operacionales. En concreto, hoy en día rebajar los costes y mejorar la productividad son aspectos claves en cualquier industria, por esta razón, un objetivo que se espera alcanzar por parte de la mina es que puedan optimizar el consumo de materiales y el empleo de mano de obra. Por otra parte, la productividad lleva implícitamente a lograr una buena disponibilidad de los equipos, donde

no es necesario alcanzar el máximo, sino que llegar hasta un punto donde la indisponibilidad no tenga consecuencias negativas en el plan de producción (Garrido, 2003).

### **1.3. Solución Propuesta**

Se plantea realizar un análisis de criticidad de los equipos de la planta procesos en Minera Paicaví, que consiste en utilizar una matriz de criticidad basada en el riesgo, en la que se hace uso de la frecuencia de fallas y sus consecuencias, esto se hace para poder obtener una lista jerarquizada que entrega detalles de la priorización que debe tener el activo evaluado según la influencia en los resultados de la empresa. Además de aplicar gráficos de dispersión para evaluar factores dominantes sobre las fallas. Sin ir más lejos, se consiguen nuevas formas de actuar en cuanto a mantenimientos que se deban realizar en el corto plazo a los equipos más críticos, identificando así claras oportunidades de mejoras. De igual forma, se propone realizar un Análisis de modos de fallas y sus efectos, al equipo más crítico, a determinadas fallas/componentes que mayor relevancia tienen según lo que se obtenga en los gráficos de dispersión. En definitiva, se va a investigar sobre la frecuencia de fallas en un tiempo determinado, las consecuencias de estas, las causas de un mal funcionamiento y el impacto en el equipo, lo que permitirá mejorar la disponibilidad y la productividad de la planta, que serán el resultado de acciones específicas luego de analizar los resultados obtenidos de las diferentes metodologías.

## 1.4. OBJETIVOS

### 1.4.1. Objetivo General:

Realizar un análisis de criticidad de activos en planta de Chancado y Molienda para optimizar la productividad en Minera Paicaví.

### 1.4.2. Objetivos Específicos:

- Realizar un levantamiento de información a los equipos de Chancado y Molienda de Minera Paicaví.
- Realizar análisis de criticidad cuantitativo a partir de la información obtenida.
- Determinar la criticidad de los equipos la planta de procesos a partir de un análisis cuantitativo con el uso de la matriz de criticidad basada en el riesgo.
- Seleccionar los equipos más críticos para optimizar las acciones de mantenimiento.
- Categorizar las fallas de los equipos que tienen una alta criticidad para generar recomendaciones al personal encargado de mantenimiento.

## 1.5. ALCANCES

- Los equipos con los que se trabajarán en el estudio se detallan a continuación:

### **Planta de Procesos**

- Chancador de Mandíbula.
  - Chancador de Cono.
  - Cintas Transportadoras.
  - Harneros vibradores.
  - Molino de Bolas.
  - Celdas de Flotación.
  - Bombas.
- La base de datos será facilitada por personal de Minera Paicaví.
  - La distribución y asignación final de los recursos humanos, económicos y tecnológicos no se enmarca en los objetivos del proyecto, solo se indicará donde deberán ser orientados.
  - El objetivo de este proyecto no es generar un plan de mantenimiento, solo dar recomendaciones asociadas a actividades que puedan ser de ayuda al personal que realiza las reparaciones.

## 1.6. MINERA PAICAVÍ

### 1.6.1 Ubicación y accesos.

El proyecto Mina Chépica, propiedad de Minera Paicaví S.A. está ubicado en la región del Maule a 270 kilómetros (km) al sur de Santiago en el borde oriental de la cordillera de la costa, específicamente a 5 km de la localidad de Pencahue y 25 km de la ciudad de Talca, esto se puede apreciar en la **Figura 1**.

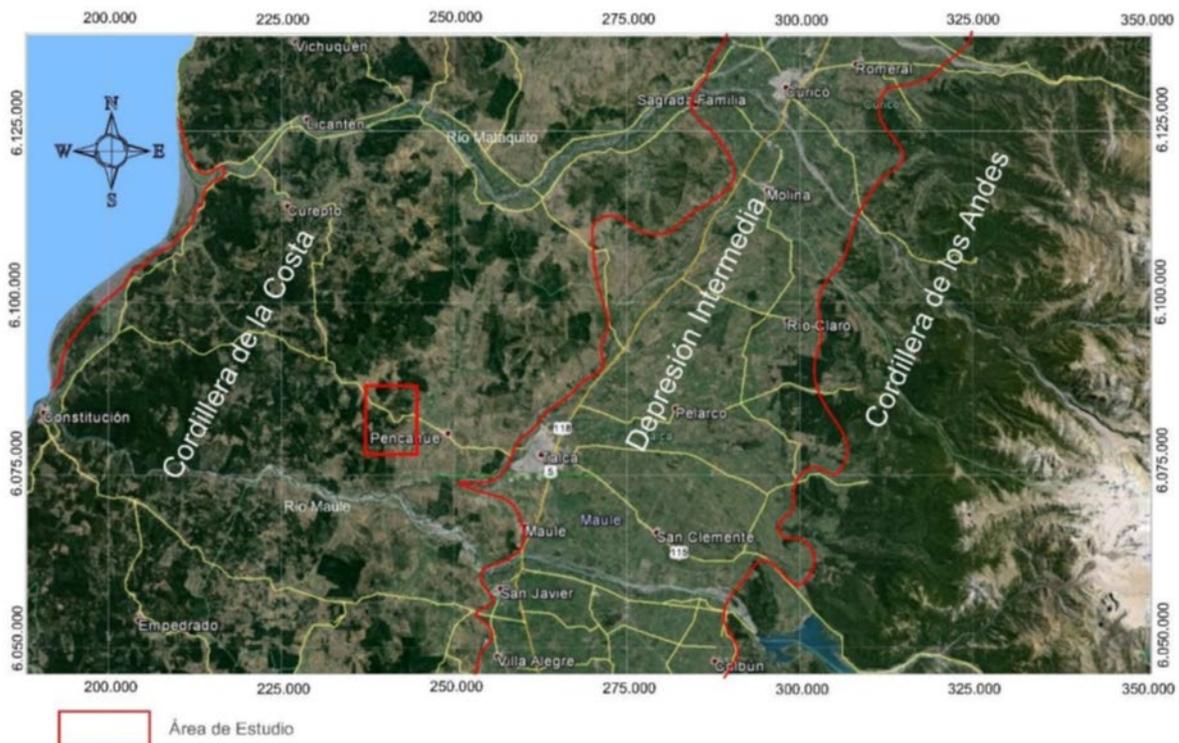


Figura 1: Ubicación Proyecto Chépica (rectángulo rojo). Flanco oriental Cordillera de la Costa. Fuente: Reporte Técnico Proyecto Chépica.

Su posición geográfica se encuentra entre las coordenadas *Universal Transversal de Mercator* (UTM) Norte 6.080.000 – 6.085.500 y Este 238.500 – 243.000, Huso 19. La cota geográfica promedio es de 100 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). El acceso es desde la ciudad de Talca, a través de la ruta K-60 que une dicha localidad con Curepto. En efecto, por esta misma ruta en el km 25, después del puente Los Puercos, se ingresa a la cuesta La Chépica, en donde se ubica el yacimiento (**Figura 2**).

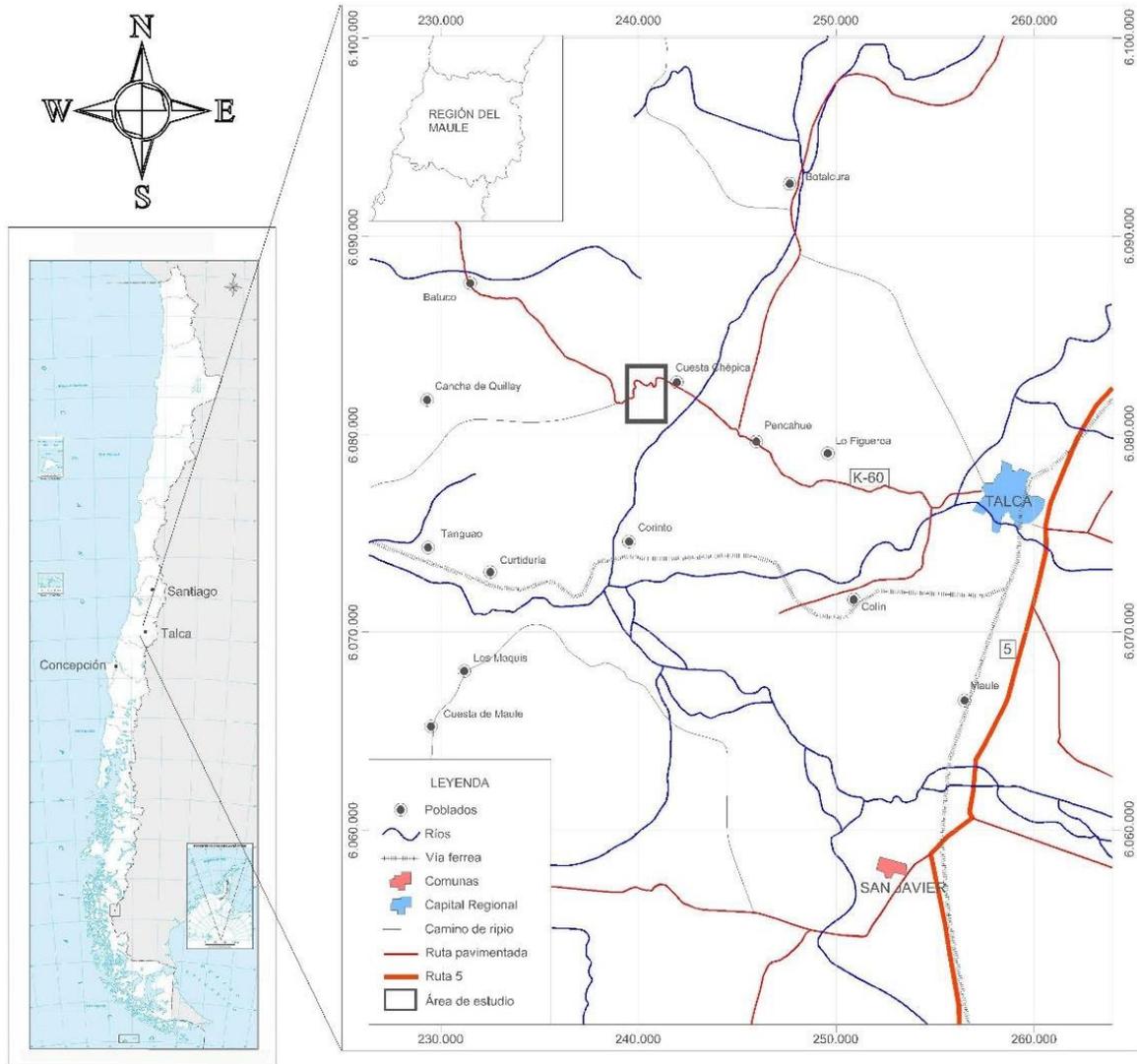


Figura 2: Ubicación y accesos Proyecto Chépica. Fuente: Reporte Técnico Proyecto Chépica

El acceso a la mina está habilitado durante todo el año, los caminos se encuentran en condiciones óptimas y el poblado más cercano que cuenta con servicios básicos está a 5 km. A 25 km se encuentra Talca que es capital de la Región del Maule (Gattas Beher & Rivas Saldaña, 2020).

### 1.6.2 Explotación yacimiento Chépica.

El proyecto Chépica consiste en 5 concesiones de explotación que abarcan 1.390 hectáreas en una franja rica en depósitos epitermales de oro – plata – cobre del Mesozoico que se extiende desde la Región Metropolitana hasta el Maule a lo largo de la Cordillera de la Costa de Chile Central. Este proyecto cuenta con 3 minas subterráneas: Chépicas 1, Chépica 2 y

Colin y cerca de 2.500 metros lineales de diferentes vetas de cuarzo identificadas en campañas de exploración superficial con anomalías positivas en oro, plata y cobre en superficie, además se han realizado 15.431 metros de sondajes diamantina que se encuentran almacenados en una testigoteca dentro del complejo minero (Gattas Beher & Rivas Saldaña, 2020).

### 1.6.3 Planta de procesos.

La planta cuenta con un circuito de chancado (**Fotografía 1**) que consiste en 3 chancadores, 2 de conos y 1 de mandíbula, además cuenta con harneros vibratorios y cintas transportadoras que permiten alimentar la concentradora que tiene una capacidad nominal de procesar 10.000 toneladas por mes (tpm) a su capacidad máxima con 3 molinos de bolas. En efecto la molienda, se realiza en estos (**Fotografía 2**), los cuales tienen capacidad de 90 y 180 toneladas por día (tpd) de mineral. Hoy en día, los permisos existentes solo permiten operar a una capacidad de 5.000 tpm, pero a futuro se espera elaborar un estudio de impacto ambiental (EIA) para llegar a la capacidad máxima (Gattas Beher & Rivas Saldaña, 2020).



*Fotografía 1: Planta de Chancado. Fuente: Reporte Técnico Proyecto Chépica*



*Fotografía 2: Molino de Bolas, Mina Chépica. Fuente: Reporte Técnico Proyecto Chépica*

Por otra parte, la flotación se realiza en 3 bancos de celdas, con 4 cada uno y un filtro de tela vertical para el concentrado. Este proceso, entrega concentrados de oro con leyes que varían entre 30 a 80 gramos/tonelada (g/t) y leyes de cobre de 15 a 25% en promedio. El relave es enviado a un embalse (**Fotografía 3**) el cual cuenta con la aprobación del departamento de tranques de relaves del Sernageomin y esta consiste en 3 etapas, de las cuales 2 ya se han ejecutado (muro en cota 94) y sólo queda la 3° etapa correspondiente al último levantamiento del muro hasta la cota 98,5 según diseño aprobado por el Servicio. Con las 3 etapas culminadas, el embalse tendrá una capacidad para acumular relaves de 328.000 metros cúbicos (m<sup>3</sup>) o 460.000 toneladas, considerando una densidad de 1,4 gramos/centímetros cúbicos (g/cm<sup>3</sup>) (Gattas Beher & Rivas Saldaña, 2020)



*Fotografía 3: Embalse de relaves Mina Chépica. Fuente Reporte Técnico Proyecto Chépica*

Finalmente, en la **Figura 3** se observa la ubicación de las principales instalaciones del proyecto, entre las cuales es importante mencionar (Gattas Beher & Rivas Saldaña, 2020):

- Embalse de relaves.
- Depósito de estéril.
- Reservorio de agua.
- Testigoteca, sala de logeo y corte de sondajes.
- Taller mina.
- Taller planta.
- Oficinas.
- Sala de cambio y comedores.
- Circuito de conminución.
- Concentradora.
- Patio de secado y carga de concentrado.
- Polvorines.
- Cancha de acopio de minerales (stock).
- Laboratorio de análisis químico.

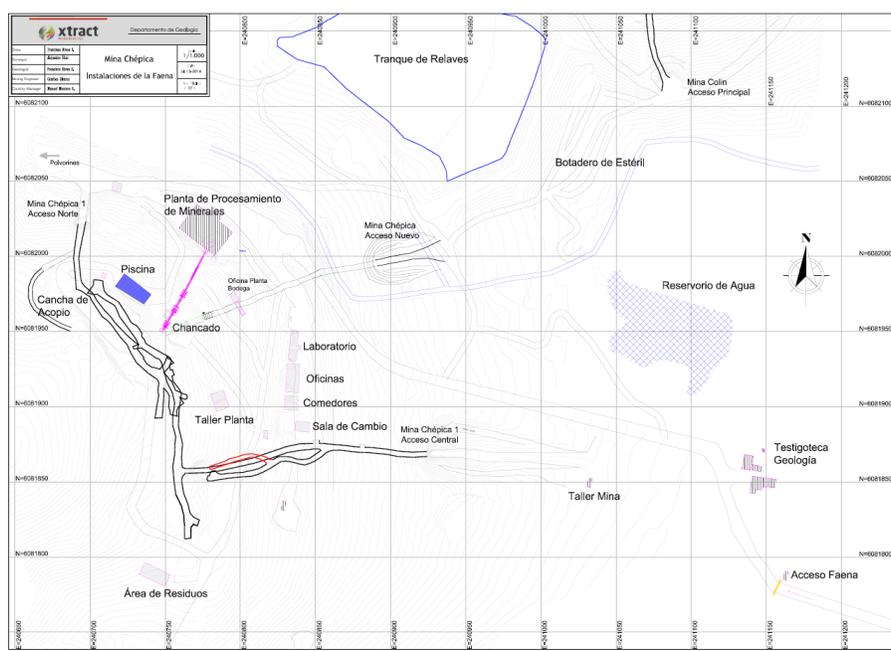


Figura 3: Ubicación de Infraestructura principal de Proyecto Chépica. Fuente: Reporte Técnico Proyecto Chépica.

## **1.7. RESULTADOS ESPERADOS**

Se espera obtener como resultado cuales son los activos más críticos de la planta de chancado y molienda, mediante la aplicación de metodologías semicuantitativas y cuantitativas, a través de la implementación de entrevistas al personal de Minera Paicaví sobre la frecuencia de fallas y los impactos o accidentes que puedan generar estas. En consecuencia, se obtendrá una lista jerarquizada de los equipos, según el grado de importancia en los resultados de la empresa. Adicionalmente, la aplicación del diagrama de Jack-Knife concluirá que componentes son los que más fallas presentan y los que incurren en mayores tiempos de reparación, para posteriormente generar planes de acción provenientes del Análisis de modo de fallas y efectos a los equipos críticos, con el propósito de impactar de forma positiva en el activo en el largo plazo, ya que lo anterior permitirá orientar la mayor parte de los recursos de mantenimiento (económicos, humanos y tecnológicos) a las áreas más significativas e inclusive se conseguirá mejorar la productividad de la planta, puesto que, se tendrá un nivel de información en detalle.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Mantenimiento

La finalidad del mantenimiento es disponer de técnicas que permitan mantener a los equipos e instalaciones operando la mayor cantidad de tiempo posible (alta disponibilidad) y con el máximo rendimiento. Por esta razón, es necesario comprender que hay una relación directa entre mantenimiento y producción, en otras palabras, mantenimiento es el “proveedor” de producción y este por tanto es su “cliente”. De hecho, haciendo alusión a esta dependencia de ambas y llevándolo específicamente al contexto minero, en el proceso de conminución de las rocas, el fallo de un equipo en la etapa de chancado produce interrupción al conjunto de operaciones siguientes, debido a que la fase próxima, es decir, la molienda, necesita de la materia prima del chancado para seguir reduciendo el tamaño de la roca.

Inicialmente las tareas encargadas a los departamentos de mantenimiento hacían referencia a remediar las fallas cuando estas se producían, dando origen a los que se conoce como **mantenimiento correctivo**. Además, lo anterior dio paso a la **fiabilidad**, dejando atrás la idea de que el personal encargado del mantenimiento tenga solo como función reparar los contratiempos de los activos, sino que también estos se deben prevenir, es decir, generar acciones para que estos no se produzcan. En ese sentido, discernir cuales son las tareas idóneas de mantenimiento que han de ser realizadas para evitar las fallas (Garrido, 2003).

En consecuencia, podemos clasificar las estrategias de mantenimiento en cinco categorías:

- Mantenimiento correctivo.
- Mantenimiento preventivo.
- Mantenimiento según condición y predictivo.
- Mantenimiento *hard time* o cero horas.
- Mantenimiento en uso.

**Mantenimiento Correctivo:** Este tipo de mantenimiento, se basa principalmente en reparar los daños a medida que se van presentando, estos son comunicados al personal encargado de mantenimiento por los mismos usuarios de los equipos. Por otra parte, los niveles de planificación del mantenimiento son escasos al igual que la mano de obra necesaria para resguardar la continuidad de los procesos productivos. Es importante destacar que el

mantenimiento correctivo, desde un punto de vista de la seguridad de los operadores es el más incompleto, si se realiza una comparación con las estrategias que utilizan el mantenimiento preventivo y predictivo de fallas (Furlanetto & Arata Andreani, 2005).

**Mantenimiento Preventivo:** Se origina como solución a las deficiencias del mantenimiento correctivo, su finalidad es disminuir la probabilidad de que ocurra una falla de forma tal que se puedan evitar paradas repentinas en la producción. Por lo tanto, es necesario programar las correcciones de los puntos vulnerables en el momento más oportuno. Existen algunas ventajas sobre este tipo de mantenimiento con respecto al correctivo, en las cuales se puede destacar:

- La seguridad de los operadores aumenta al disminuir la probabilidad de que una falla ocurra.
- Al tener un enfoque en evitar la ocurrencia de una falla, los costos de esta pueden ser reducidos.
- Las actividades de mantenimiento tienen un nivel de planificación relevante.
- Existe una optimización en los tiempos de reparación de los equipos, siendo estos menores al ejecutar las tareas de mantenimiento según la planificación existente.

Es importante aclarar que, a pesar de las ventajas existentes, esto no significa que el mantenimiento preventivo deba reemplazar al correctivo, puesto que va a depender el impacto que tenga un equipo tanto en producción como en la seguridad de las personas, por lo tanto, si este impacto es significativo se procederá a considerar el mantenimiento preventivo, en caso contrario, las tareas correctivas de reparación son una buena elección (Furlanetto & Arata Andreani, 2005).

**Mantenimiento según condición y predictivo:** El mantenimiento basado en condición, se refiere a el seguimiento o control de los activos mediante parámetros que representen el rendimiento o estado del equipo. Por lo tanto, es necesario definir un rango que sea aceptable en la operación del activo para cada parámetro que sea identificado y observar el valor que esté va presentando, el cual puede ser instantáneo o a intervalos de tiempo, según sea necesario. Sin ir más lejos, el mantenimiento se deberá realizar cuando haya alguna anomalía o valor atípico en el monitoreo de las variables de control, es decir, que excedan los límites definidos como aceptables en la operación de la maquinaria en particular. En cambio, el

mantenimiento predictivo utiliza la información de la variable en el tiempo, con la finalidad de modelar y pronosticar el comportamiento que tendrá a futuro para finalmente decidir el tiempo que demandará realizar la tarea de mantenimiento (Furlanetto & Arata Andreani, 2005).

**Mantenimiento hard time o cero horas:** Consiste en realizar revisiones a los equipos en determinados periodos de tiempo, esto puede ser, antes de que ocurra una falla o cuando se concluya que el activo ha disminuido la capacidad de funcionar adecuadamente bajo ciertas condiciones de operación. En otras palabras, el propósito es dejar al equipo en cero horas de funcionamiento, lo que se logra cuando en las revisiones se cambian o reparan aquellos elementos que se encuentran sometidos a desgaste, esto permitirá garantizar un tiempo de funcionamiento fijado con anticipación (Garrido, 2003).

**Mantenimiento en uso:** Es aquel realizado por los mismos usuarios de los activos, es del tipo básico, no requiere una gran formación, solo es necesario una capacitación breve, abarca diferentes tareas, tales como: toma de datos, inspecciones visuales, limpieza, lubricación y ajuste de tornillos (Garrido, 2003).

Al respecto, es fundamental comentar que cualquier equipo que requiera mantención va a utilizar una mezcla de estos tipos de mantenimiento, dejando de lado la idea de que necesitará un solo tipo de mantenimiento de los que se presentaron con anterioridad. Ahora, surge la incógnita, ¿cuál estrategia de mantenimiento es la adecuada para un equipo en una determinada planta? para responder esta pregunta, es necesario conocer el grado de criticidad de los equipos en un determinado sistema, por cierto, cuando se habla del término “criticidad” se hace referencia a la frecuencia de fallas que tiene un determinado activo y las consecuencias que estas generan en diferentes ámbitos (Furlanetto & Arata Andreani, 2005).

## 2.2. Función del mantenimiento

El deterioro de los sistemas de producción y por ende la capacidad que estos tienen, comienzan al momento en que se pone en servicio el sistema. Otro factor que puede llevar al desgaste normal es cuando ocurren fallas producto de que los activos deben funcionar más allá de sus límites de diseño o debido a errores operativos. En ese sentido, estas deficiencias quedan representadas por tiempos de inactividad, pérdidas de velocidad, riesgos para la

seguridad, entre otras. En consecuencia la gerencia de mantenimiento debe tomar decisiones sobre objetivos y estrategias de mantenimiento, para poder asegurar que la planta opere en las condiciones requeridas a su vez cumpliendo las metas de producción a un costo óptimo.

En cuanto a un buen mantenimiento, se deben definir los objetivos y estrategias en forma conjunta. Para el caso de los objetivos, es importante destacar 5, asegurar la funcionalidad de la planta, alcanzar su vida útil de diseño, dar garantía sobre la seguridad de la planta y del medio ambiente, procurar la rentabilidad en el mantenimiento y usar eficazmente los recursos. Por otra parte, la formulación de la estrategia permite determinar o decidir qué tipo de mantenimiento es necesario realizar, en qué momento hacerlo y con qué frecuencia. Además, la toma de decisiones se sustenta en términos de acciones de mantenimiento, políticas y conceptos de mantenimiento. Las políticas de mantenimiento son reglas que detallan las herramientas de activación de las acciones de mantenimiento, algunos ejemplos son: mantenimiento basado en fallas, mantenimiento basado en la condición, entre otras. En cambio, el concepto de mantenimiento significa la estructura de decisión tanto para las acciones como políticas de mantenimiento, en las que se destacan mantenimiento centrado en la confiabilidad, mantenimiento productivo total, entre otros. En último término, luego de haber establecido los objetivos y estrategias, el éxito de la función de mantenimiento depende de la gestión de mantenimiento (Muchiri, Pintelon, Gelders, & Martin, 2010).

### 2.3. Ingeniería y gestión de mantenimiento.

El concepto que sustenta la ingeniería de mantenimiento es la mejora continua del proceso de gestión de mantenimiento, a través de la inclusión de tres aspectos: conocimiento, análisis e inteligencia, estos resultan ser un soporte al momento de tomar decisiones en el área de mantenimiento para mejorar la operación global y el resultado económico.

Por otra parte, cuando se realiza un análisis y se modelan los resultados provenientes de las actividades de mantenimiento, esta disciplina permite renovar constantemente y de forma justificada la estrategia y por ende la programación y planificación de tareas que garanticen producción y resultados económicos a un costo mínimo (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013). En cuanto a la gestión del mantenimiento, es posible formalizar un esquema que se conoce como ciclo de trabajo de mantenimiento, en este se expresan diferentes matices que hay que tener en cuenta si es que se elabora e implementa un modelo

de gestión del mantenimiento. En cuanto al diagrama mencionado, que se aprecia en la **Figura 4** existen dos ciclos de trabajos muy característicos y que son fundamentales para un buen modelo de gestión de mantenimiento. El primero, denominado ciclo habitual de mantenimiento, en el que las actividades para estos fines son: planificación, programación, asignación de tareas/trabajo y la ejecución correspondiente. Por otra parte, el segundo es conocido como ciclo de mejoramiento continuo, el cual agrega dos nuevas actividades al ciclo anterior, el proceso de análisis de lo que se ejecutó para la búsqueda de oportunidades de mejora (por ejemplo: modificar un plan de mantenimiento) y el proceso de identificación de actividades necesarias para implementar mejoras que se hayan definido con anterioridad. En consecuencia, se procede a definir las diferentes actividades del ciclo de trabajo del mantenimiento. Respecto a la identificación del trabajo, en esta actividad se debe reconocer el trabajo correcto que debe realizar el personal de mantenimiento así como el momento adecuado para ser llevado a cabo, además de identificar y controlar los modos de falla que puedan afectar la capacidad de los equipos, cabe destacar que las actividades se evalúan en función de las consecuencias de la falla en el rendimiento del equipo. Por otra parte, la planificación incluye el desarrollo de procedimientos y ordenes de trabajo para las actividades de mantenimiento identificadas, así como también los requisitos en cuanto a recursos, precauciones en seguridad e instrucciones para la realización del trabajo. La programación, se asocia a comprobar que los recursos para el trabajo estén disponibles y evalúa el tiempo requerido para ejecutarlo. La ejecución del trabajo asegura que las actividades se realicen en los plazos establecidos y que los recursos se utilicen de manera efectiva.

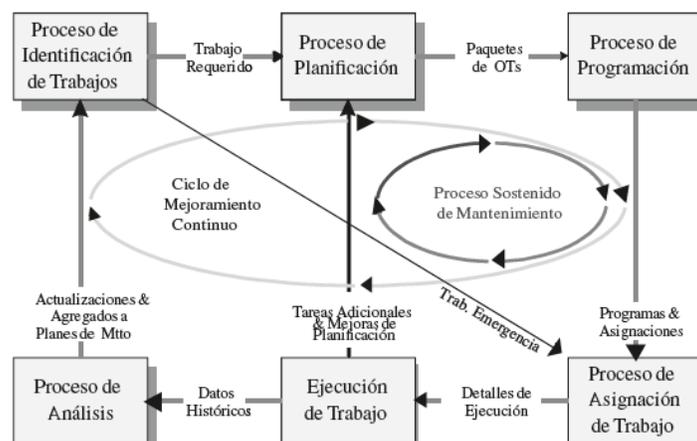


Figura 4: Ciclo de trabajo de mantenimiento. Fuente: (Arata, 2009)

No obstante, en el caso de que exista una urgencia para implementar la mejora, puede haber un salto de forma directa al proceso de asignación de trabajo, esto queda evidenciado en la línea diagonal de la **Figura 4** (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

Además para gestionar el proceso de mantenimiento, es necesario definir indicadores para cada etapa, estos permiten monitorear los resultados del mantenimiento en términos de la condición y el rendimiento de los equipos, el costo del mantenimiento y el uso efectivo de los recursos. Cabe mencionar que existe una clasificación de indicadores, denominados adelantados y atrasados. En el caso de los indicadores adelantados estos tienen relación al proceso de mantenimiento, para controlar si se están realizando las tareas que conducirán a resultados, en cambio los indicadores retrasados monitorean los resultados que se han logrado. A continuación se exponen algunos ejemplos de indicadores adelantados que son relevantes para algunos de los elementos que componen el ciclo de trabajo de mantenimiento. En cuanto a la identificación del trabajo y debido a la importancia que tiene el mantenimiento preventivo al mitigar las consecuencias de las fallas como: alto tiempo de inactividad, seguridad, costos de mantenimiento, entre otras. Un indicador clave de desempeño es el porcentaje de horas- hombre que se dedican a las actividades preventivas en un periodo específico, en ese sentido los autores (Weber & Thomas, 2006) recomiendan que la meta para este indicador sea de un 85% a 90%, quedando así entre un 15% a 10% a trabajos reactivos que son producto de la intensidad de una avería o la capacidad de respuesta del mantenimiento al trabajo no planificado. Asimismo para la planificación, los indicadores claves se encuentran los porcentajes tales como: trabajo planificado, ordenes de trabajo que necesitan repetirse debido a la planificación y el tiempo planificado para el trabajo sobre el tiempo disponible. Con respecto a la programación, los indicadores importantes son el porcentaje de horas- hombre programadas sobre el total de horas hombre disponibles y el porcentaje de ordenes de trabajo demoradas debido a escasez de materiales o mano de obra. Por otra parte, para la ejecución del trabajo, entre los indicadores clave se encuentran el cumplimiento del cronograma (porcentaje de trabajo completado dentro del tiempo programado), porcentaje de tareas completadas sobre las tareas recibidas, el número de tareas atrasadas, la eficiencia de la mano de obra, entre otras. Los indicadores mencionados se resumen en la **Tabla 18** con los objetivos recomendados por los autores (Weber & Thomas, 2006).

Para el caso de los indicadores atrasados o tardíos, se utilizan para medir los resultados de mantenimiento en términos de rendimiento del equipo y puesto que la función principal del mantenimiento es reducir o eliminar fallas y sus consecuencias, los indicadores clave de resultados de mantenimiento se encuentran el número de falla, el tiempo medio entre fallas (MTBF), la frecuencia de avería (Número/ unidad de tiempo), la disponibilidad y la eficacia global de equipos productivos, lo anterior queda resumido en la **Tabla 19** (Muchiri, Pintelon, Gelders, & Martin, 2010).

Ahora bien, se procede a exponer a las etapas que están presente en el modelo de gestión de mantenimiento (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

Etapa 1: Análisis de la situación actual. Definición de objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento: Esta etapa requiere realizar una evaluación que permita determinar la situación actual, para esto se debe considerar la información que se encuentre disponible sobre mantenimiento de equipos, aspectos tales como: histórico de fallas, indicadores de tiempo medio entre fallas (MTTF) y tiempo medio de reparación (MTTR), planificación, programación y ejecución de las tareas de mantenimiento, entre otras. Además, deben quedar definidas las metas (objetivos) que se desean alcanzar, a través de una estrategia destinada a lograr tales objetivos, decidiendo las responsabilidades del personal involucrado a nivel gerencial y operacional. En cuanto a la estrategia de mantenimiento, se requiere establecer según los objetivos corporativos del negocio, los objetivos de mantenimiento, esto se puede lograr mediante el uso de indicadores de gestión, tales como: confiabilidad, riesgo, seguridad, etc.

Asimismo la gestión del mantenimiento debe lograr que la totalidad de las actividades de mantenimiento se encuentran alineadas con la estrategia definida a nivel táctico, estratégico y operativo. Las tareas a nivel estratégico se logran cuando se transforma lo que es prioridad para el negocio en prioridad para el mantenimiento de esta forma se continuará con el diseño de la estrategia según los objetivos, para posteriormente conseguir un plan de mantenimiento común en la empresa que se orientará a los activos críticos, que se identifican en la etapa siguiente. Las actividades a nivel táctico están orientadas a una adecuada asignación de recursos (materiales, habilidades, etc.) para conseguir el plan de mantenimiento. En última instancia se obtendrá un nuevo programa en el que se especificará en detalles las tareas a

desarrollar y los recursos asignados. En cuanto a las acciones a nivel operativo, se debe supervisar que las tareas asociadas a mantenimiento sean desarrolladas por personal capacitado, en los tiempos establecidos, respetando los procedimientos definidos y con el uso de las herramientas más apropiadas (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

Etapa 2: Jerarquización de equipos: Para este propósito, los activos se deben separar de acuerdo con la criticidad que estos tengan, es decir, según el nivel de impacto en el sistema global y/o la seguridad del sistema. El análisis de criticidad permite definir prioridades de un sistema, equipos y/o procesos, en base a una variable que se conoce como “Criticidad” la cual es proporcional al riesgo, esto permite direccionar los recursos técnicos-económicos y esfuerzos en los que mayor impacto representan para el negocio. Existen diferentes técnicas cualitativas, cualitativo-cuantitativa y cuantitativa, en la que se puede clasificar un activo como crítico, semicrítico y no crítico, estas (técnicas) se basan en la evaluación probabilística del riesgo (PRA) y el número/índice probabilístico de riesgo del activo (PRN). Cabe mencionar que aquellos activos que resulten con un índice mayor deben ser analizados en primer lugar.

El método cualitativo, tiene como base la opinión de especialistas, considerando criterios técnicos y financieros que permiten jerarquizar equipos. Sin embargo, son subjetivos pero efectivos si se utilizan para procesos simples. Es común utilizar como criterios la consecuencia (alto-medio-bajo) y complejidad (compleja-mediana-sencilla), en la que se pueden definir como escala numérica 1-5-10 para cada criterio.

En cuanto a modelos cualitativos-cuantitativos, se utiliza información de frecuencia de falla, impactos en producción, tiempos de reparación, costos de reparación, impactos en seguridad personal e impacto ambiental. El factor cualitativo, tiene como objetivo crear una escala para cada ítem medible y definir la jerarquización de criticidad. En este sentido, el riesgo (o criticidad) se define como el producto entre la frecuencia por la consecuencia de la falla. La frecuencia es la cantidad de fallas en un tiempo determinado, mientras que las consecuencias son criterios que se determinan en función de las necesidades de la organización. En definitiva, cuando se logra la jerarquización se obtiene un matriz de criticidad como se observa en la **Ilustración 2**.

Cabe destacar, que existen otros métodos de jerarquización que se basan en dos indicadores muy útiles, la confiabilidad y mantenibilidad. En efecto permiten hacer una priorización en los modos de falla de equipos y subsistemas, esto se expone **más adelante** (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

Etapa 3: Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto: Luego de concluida la jerarquización de los activos físicos de la planta de acuerdo con su criticidad, se debe continuar con una inspección técnica-visual con requerimientos que dependen de la criticidad del activo. En otras palabras, aquellos equipos críticos, necesitarán una inspección detallada, los equipos semicríticos serán inspeccionados a un nivel de detalle menor, en cambio para el caso de los activos no críticos no se hará necesario orientar recursos de inspección, por el impacto que generan en el sistema, si presentan una falla no es significativo. Las inspecciones permiten determinar cuáles son las necesidades puntuales de mantenimiento, en base a conocer el estado actual de operación de los equipos, entorno de operación y deficiencias en su funcionamiento. Respecto a los equipos críticos, antes de determinar las acciones que serán parte de los planes de mantenimiento, es útil el análisis de posibles fallos crónicos y repetitivos (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

Etapa 4: Diseño de planes de mantenimiento y recursos necesarios: Para el diseño de planes de mantenimiento preventivo, se deben considerar 2 etapas, la información y la decisión. En el caso del primer elemento, se basa en reunir datos sobre los equipos a analizar, es decir, las funciones que tiene de acuerdo con el contexto operacional en el que se desempeña, luego se determinan para cada función posibles fallas y se identifican modos de falla, en otras palabras, lo que ocurre después de la falla. En lo relativo a la decisión, se busca establecer actividades preventivas sobre las consecuencias que pueden generar los modos de falla. En este sentido, para cada modo de fallo se determinan acciones de mantenimiento a realizar, la frecuencia con la que se ejecutaran y el responsable (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

Etapa 5. Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos: La programación de las tareas de mantenimiento, procura que exista un uso eficiente de recursos, tales como humanos y materiales. Por otra parte la programación del mantenimiento debe

efectuarse a diferentes plazos, corto (<1 año), medio (1-5 años) y largo plazo (>5 años) (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

Etapa 6: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento: Es necesario realizar una evaluación a la ejecución de las actividades de mantenimiento, además deben ser controladas eventuales desviaciones que afecten la persecución de las metas del negocio y los valores de los indicadores claves de rendimiento (KPIs) de mantenimiento escogidos por la organización (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

## 2.4. Norma ISO-55000/1/2

Esta norma nace de la necesidad de aquellas empresas en las cuales los resultados son influenciados mayoritariamente por el cuidado de los activos físicos que operan en el largo plazo. También, se puede decir que son actividades sistematizadas de una organización para materializar el valor que tienen sus activos que no son limitados solo a los físicos, puesto que además de maquinarias, son consideradas personas, información, etc. (Provedano, 2021).

## 2.5. Análisis de criticidad basado en el riesgo

Esta metodología permite establecer una jerarquización o priorización en los procesos, instalaciones, sistemas y equipos, con la finalidad de poder mejorar la confiabilidad operacional, esto último hace referencia a la capacidad de un sistema o instalación, que se encuentra conformado por personas, tecnología y procesos para lograr su función dentro de los límites de diseño y según las condiciones operacionales específicas. Cabe destacar que, para lograr perfeccionar la confiabilidad operacional, se debe tener en cuenta cuatro aspectos: confiabilidad humana, confiabilidad de los procesos, confiabilidad de los equipos y su mantenibilidad. El cambio individual o en conjunto de estos parámetros que se presentan en la **Ilustración 1** repercutirán en la confiabilidad operacional de un sistema en específico. (Mendoza, 2000).

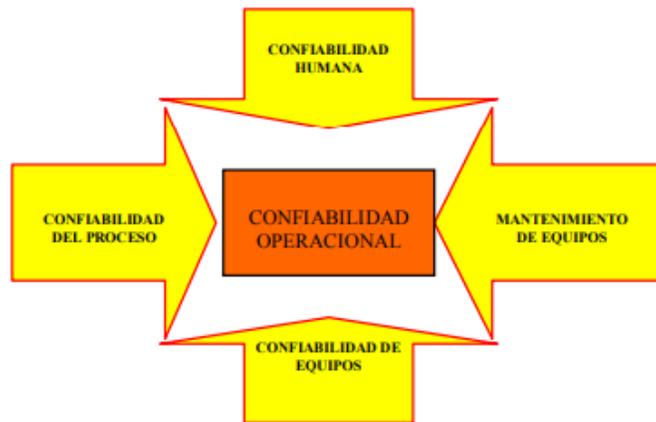
A continuación, se definen los componentes de la confiabilidad operacional.

**Confiabilidad Humana:** Es la probabilidad de desempeño eficiente y eficaz, por parte de las personas, sin errores provenientes del conocimiento y actuar humano, mientras ejerce su competencia laboral, en un ambiente organizacional específico (Palencia, 2006).

**Confiabilidad de Equipos:** Significa que existan estrategias de mantenimiento adecuadas, también que sean efectivas y que puedan ser extendidas logrando llevar al máximo posible el tiempo medio entre fallas (MTBF).

**Confiabilidad de Procesos:** La operación sea llevada entre los parámetros definidos, que se entiendan los procesos y procedimientos.

**Mantenibilidad de Equipos:** Los activos deben contar con fases de diseño, confiabilidad interna, equipos de trabajo y disminuir el tiempo medio de reparación.



*Ilustración 1: Parámetros de la confiabilidad operacional. Fuente: (Mendoza, 2000)*

También, es una ayuda en la toma de decisiones para que estas sean apropiadas y efectivas. Por otra parte, debido a que los recursos en una empresa son restringidos, el análisis de criticidad permite orientarlos en la dirección correcta, es decir, en aquellos activos que mayor incidencia tienen en los resultados de la empresa, para así destinar los recursos humanos, económicos y tecnológicos en aquellos que mayor impacto generan en el negocio y una pequeña porción del reparto hacia los equipos con menor influencia. En efecto, para diferenciar los equipos, unos de otros en la organización, estamos realizando lo que se conoce como análisis de criticidad.

Por otra parte, se deben especificar algunos criterios que son utilizados en los procesos de jerarquización, los que varían según las oportunidades y necesidades de una organización (Parra & Crespo, 2012):

- Capacidad de producción/impacto en la continuidad operacional.
- Frecuencia de fallas/ confiabilidad.

- Costos de paradas y el mantenimiento.
- Efectos en la seguridad, ambiente e higiene.
- Consecuencias en la calidad del producto.

En efecto, ahora se detallarán las metodologías que permiten realizar un análisis de criticidad, basada en la evaluación del riesgo y que permitirá identificar los activos críticos en una determinada planta (Parra & Crespo, 2012).

### 2.5.1. Métodos Semicuantitativos y Cuantitativos.

Para aplicar estas herramientas que se exponen a continuación, es necesario hacer un levantamiento de información, es decir, averiguar sobre costos incurridos en mantenimiento, tiempo medio para reparar, tiempo medio entre fallas, número de fallas, determinar las consecuencias que genera una falla, en ámbitos tales como calidad, producción, seguridad y medio ambiente y finalmente en el aspecto de baja mantenibilidad.

#### 2.5.1.1. Matriz de Criticidad por Riesgo:

- Se utiliza una matriz de criticidad, como se muestra en la **Ilustración 2**. Es decir, en el eje vertical se encuentra la frecuencia de fallas mientras que en el eje horizontal se encontrarán las consecuencias o impactos en los que incurrirá el equipo que se evalúa si ocurre una falla, esto se encuentra plasmado por la expresión del riesgo (**Ecuación 1**). Además, esta matriz posee un código de colores en los que se aprecian criticidades altas, medias y bajas en colores rojo, amarillo y verde respectivamente. Por otra parte, la criticidad se determina cuantitativamente, es decir, será el producto de la frecuencia de ocurrencia de falla por la sumatoria de los impactos de esta asociada a seguridad y medio ambiente, calidad, producción, baja mantenibilidad y mantenimiento (Romero, 2013).



Ilustración 2: Matriz de Criticidad por Riesgo. Fuente: (Romero, 2013)

Donde:

$$Riesgo = FF \times C \text{ (Ecuación 1)}$$

$$FF = \text{Número de fallas en un determinado tiempo (Ecuación 2)}$$

$$C = \text{Consecuencia de los fallos a producción, ambiente, etc. (Ecuación 3)}$$

$$C = (IC \times 0,2) + (IP \times 0,2) + (BM \times 0,2) + (SHA \times 0,2) + (CM \times 0,2)$$

$$IC = \text{Impacto en calidad (Ecuación 4)}$$

$$IP = \text{Impacto Producción (Ecuación 5)}$$

$$BM = \text{Impacto por Baja Mantenibilidad (Ecuación 6)}$$

$$SHA = \text{Impacto en Seguridad y Medio Ambiente (Ecuación 7)}$$

$$CM = \text{Costos de mantenimiento (Ecuación 8)}$$

En efecto, cada componente que se encuentra **más atrás** en la ecuación factor del riesgo tendrá una escala de 1- 5, a modo de ejemplificar lo anterior se presenta para cada elemento de la ecuación los intervalos que entran en cada categoría numérica con sus respectivos detalles para cada uno de ellos (es importante destacar que estos no corresponden a intervalos finales y únicos, puesto que se debe realizar un estudio de acuerdo con el sector en evaluación, por lo que van a diferir de acuerdo a la industria en la que sea aplicada esta herramienta).

- Factor de Frecuencia de Fallos (FF) (Escala 1-5):
  1. Sumamente improbable: menos de 20 eventos en 1 año
  2. Improbable: entre 20 y 40 eventos en 1 año
  3. Posible: entre 40 y 60 eventos en 1 año
  4. Probable: entre 60 y 80 eventos en 1 año
  5. Frecuente: más de 100 eventos en 1 año
- Factores de Consecuencias (Escala 1-5):
  - Impacto en Calidad (IC):
    5. Afectación en calidad (pérdida 75-100 %).
    4. Afectación en calidad (pérdida 50-75 %).
    3. Afectación en calidad (pérdida 25-50 %).
    2. Afectación en calidad (pérdida 0-25 %).
    1. No presenta ningún impacto en calidad.
  - Impacto Producción (IP):
    5. Pérdidas de producción superiores al 75% (no existen unidades de reserva)
    4. Pérdidas de producción entre el 50% y el 74% (existen unidades de reserva parcial).
    3. Pérdidas de producción entre el 25% y el 49%
    2. Pérdidas de producción entre el 10% y el 24%
    1. Pérdidas de producción menor al 10%.
  - Impacto por baja mantenibilidad (BM):
    5. No existen unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logísticas son largos.
    3. Existen unidades de reserva que permiten cubrir la producción de forma parcializada, tiempos de reparación y logística intermedios.
    1. Se cuenta con unidades de reserva, tiempos de reparación y logísticas cortos.
  - Impacto Seguridad y Medio Ambiente (SHA):

5. Alta probabilidad de riesgo en la vida y/o daños graves a la salud del personal, accidente ambiental que excedes los límites permitidos por la normativa ambiental.
  3. Riesgo bajo en la vida y/o daños menores en la salud del personal, accidente ambiental que pueden ser contrarrestados en un corto plazo.
  1. No hay un riesgo asociado en el personal ni en el medio ambiente.
- Impacto en costos de mantenimiento (CM):
5. Daños irreversibles en los equipos, costos de reparación que abarcan repuestos y horas hombres (HH) superan en un 75% el valor del equipo.
  4. Costos de reparación que incorporan materiales y HH se encuentran entre el 50% y 74% del valor del equipo.
  3. Costos de reparación que incluyen materiales y HH se ubican entre un 25% y el 49% del valor del equipo.
  2. Costos de reparación que comprende materiales y HH se encuentran entre 10% y 24% del valor del equipo.
  1. Costos de reparación dado por materiales y HH se ubican en un nivel inferior al 10% del valor del equipo.

La implantación de la matriz de criticidad ha de ser entendida como algo dinámico, es decir, debe ser aplicada cada cierto periodo de tiempo, actualizando así los resultados de forma periódica y generando retroalimentaciones provenientes de los planes de acciones a los equipos que resultan ser de más alta criticidad. Teniendo por fin último que, activos que presentan una alta criticidad, luego de una próxima evaluación y gracias a las recomendaciones generadas puedan disminuir su ubicación en el mapa de criticidad.

Ahora bien, en cuanto a la información requerida cabe destacar que existen variadas alternativas, dentro de las cuales se destaca, bases de datos históricas de industrias similares, o bien evaluar los peores y mejores casos concernientes a los que son generados por órdenes de mantenimiento correctivo y sacar un promedio según la cantidad de tiempo en evaluación. Estas opciones mencionadas, ayudan a generar un intervalo para cada criterio en estudio, de forma tal de contar con un límite superior e inferior en una escala elegida (1-5) para tales

finés, ahora bien, los intervalos restantes deben estar contenidos en el rango dado por el máximo y el mínimo, esto se expone más adelante.

### 2.5.1.2. Método Jack-Knife

Conceptualmente corresponde a un estudio multicriterio que involucra diferentes variables, estas son el número de fallas o intervenciones, tiempo fuera de servicio o tiempo medio para reparar (MTTR), costos asociados, entre otros, cabe destacar que esto puede ser realizado a nivel de modos de falla de sistemas, subsistemas, componentes, en un equipo particular. La forma, en que se realiza el análisis de esta herramienta corresponde al uso de un diagrama con dos o más dimensiones, en la que cada una de estas, está relacionada a la variable de estudio. Por otra parte, cuando el parámetro a trabajar corresponde a la frecuencia de fallas y tiempos medios para reparar, en el gráfico se proyectan líneas indicadoras que entregan indicios sobre la frecuencia media y tiempo promedio para la totalidad de los modos de falla, de esta forma resultan cuatro cuadrantes. En ese sentido, dentro del gráfico hay una región crítica denominada “Agudo y Crónico” en la cual los modos de fallas que se ubican allí estarán caracterizados por una frecuencia sobre el promedio (crónicos) y un tiempo medio para reparar mayor al promedio (agudos), por tanto son candidatos relevantes en la escala de criticidad. Incluso es posible, trazar rectas de iso-indisponibilidad, de forma tal de poder identificar modos de falla que producen una indisponibilidad mayor a la planteada/esperada. (Viveros Gunckel & Mena Bustos).

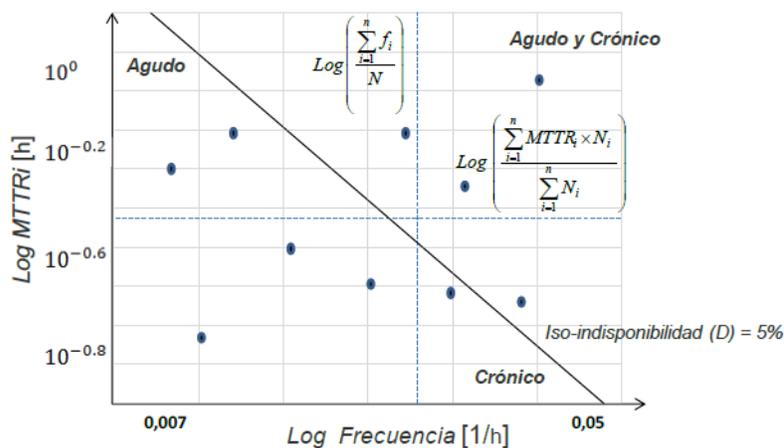


Figura 5: Representación gráfica de dispersión Jack-Knife. Fuente: Viveros Gunckel & Mena Bustos

Donde:

$f_i$ : Frecuencia de intervención del modo de falla  $i$

$MTTR_i$ : Tiempo medio para reparación del modo de falla  $i$

$N_i$ : Número de fallas del modo de falla  $i$

$N$ : Número de modos de falla de equipo o sistema

De igual forma, los planes de mejora dependerán de cómo se distribuyan los modos de falla a nivel de componentes, equipos, sistemas y subsistemas en el gráfico, puesto que esto será una referencia para enfrentar las dificultades desde dos perspectivas que corresponden a la confiabilidad y mantenibilidad, dadas por alta frecuencia en las intervenciones y elevados tiempos de reparación respectivamente (Viveros Gunckel & Mena Bustos).

#### 2.5.1.2.1. ISO-Indisponibilidad

La generación de este tipo de curvas representa una estimación porcentual de un indicador clave de rendimiento (KPI), este es el producto o multiplicación de un indicador en “x” con un indicador en “y”, siendo el resultado una constante, cabe destacar que estos indicadores en el caso de la ISO-Indisponibilidad están dados por la frecuencia (indicador “x”) y las consecuencias (indicador “y”), esto queda expresado en **(Ecuación 9)**. La utilidad de este tipo de curvas es poder evaluar datos que se encuentran en cuadrantes (“Agudo y Crónico”, “Agudo” y “Crónico”) diferentes en el diagrama de dispersión (o Jack-Knife), para determinar si es que poseen el mismo riesgo frente al número de eventos y tiempos medios de reparación, lo anterior ocurre cuando estos (datos), interceptan la misma curva de ISO-Indisponibilidad, es decir, a pesar de tener características diferentes en cuanto a la frecuencia y las consecuencias, en términos del riesgo ambos son similares. Por otra parte, también se debe comprender que aquellos datos que estén más cerca de una curva ISO-Indisponibilidad de valor alto son más críticos que aquellos que se encuentran más distantes.

$$\text{Indisponibilidad} = N^{\circ} \text{ de intervenciones} \times \text{MTTR} \text{ (Ecuación 9)}$$

#### 2.5.1.3. Análisis de modos de Fallas y sus Efectos (AMFE)

La adopción del análisis de modos de fallas y sus efectos es utilizado para evitar averías y analizar los riesgos que conlleva un proceso o un equipo, mediante la identificación de cuáles

son las causas y efectos a fin de determinar las acciones que deben ser llevadas a cabo para impedir las fallas e incluso permite ser una ayuda para la planificación del mantenimiento. Por otra parte, es necesario definir que las tareas que son realizadas por los equipos se asocian a una función, pero por lo general estos realizan de forma individual varias funciones diferentes. Ahora bien, es necesario precisar que se debe distinguir claramente entre un estado de falla, es decir la incapacidad de un activo físico de cumplir una determinada tarea según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario (falla funcional) y los eventos que causan ese estado de falla (modos de falla). Por consiguiente, la definición de falla está relacionada en términos de pérdida de una función en particular, pero se tiende a creer erróneamente que es la falla del activo como un todo. Otro punto importante para destacar es la importancia de analizar los modos de falla, puesto que se evita caer en el mantenimiento reactivo y se logra tener un acercamiento a un tipo de mantenimiento más eficaz al manejar eventualidades antes de que ocurran o por lo menos tener una preparación en cuanto a las decisiones que se tomaran si llegara a ocurrir “X” inconveniente, con lo anterior se hace referencia al mantenimiento proactivo. La aplicación de esta herramienta será llevada a cabo a los equipos más críticos para la operación, obtenidos del análisis de criticidad. Teniendo por finalidad seleccionar políticas de manejo de falla, para así lograr que la criticidad de un equipo pueda disminuir gracias a las acciones que se deriven de este proceso del análisis de modos de falla y sus efectos (Moubray, 2004).

Finalmente, se presenta un formato de muestra que es utilizado para el AMFE en la **Tabla 1**, en el que se detalla la información requerida en la parte superior, en base a lo expuesto anteriormente.

*Tabla 1: Formato muestra de AMFE. Fuente: (Bestratén Belloví & Orriols Ramos, 2004 )*

Ítem /Componente	Función	Modo de falla	Efecto de falla	G	Causas	F	Medios de detección	D	IPR	Acciones correctivas/Preventivas
------------------	---------	---------------	-----------------	---	--------	---	---------------------	---	-----	----------------------------------

*Donde :*

*G: Gravedad*

*F: Frecuencia*

*D: Detección o Detectabilidad*

### 2.5.1.3.1. Descripción de AMFE

Para empezar, se mostrará en detalle y siguiendo un orden lógico, los pasos que se necesitan junto a la información requerida para aplicar el método AMFE de forma general. En concreto, esto es realizado de forma de generar una orientación después de todo, esto puede adaptarse según los interés y características de una organización en particular. Sin, embargo los datos requeridos deben respetar el orden en el cual son recabados, que en este apartado se menciona. El enfoque del AMFE es en el análisis de modos de fallo que se intenta conocer y valorar (Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation, 2008).

**Componente:** Debe identificarse la unidad que se vaya a analizar y el propósito que tiene el ítem/artículo.

**Operación o Función:** Se tiene que detallar que propósito que tiene el ítem/artículo, además de la identificación se deben entender las funciones.

**Fallos o Modos de fallos:** Reconocer que situaciones pueden haber originado un estado de falla o falla funcional (no es capaz de cumplir una función dentro de un parámetro de funcionamiento aceptable por el usuario). La lista de modos de fallas puede estar compuesta por:

- Desgaste por uso normal o deterioro.
- Errores humanos (personal de mantenimiento y operadores).
- Errores de diseño.

**Efectos del fallo:** Corresponde al síntoma que percibe el cliente/usuario del modo de falla, por otra parte también considera el análisis de las consecuencias que tienen las fallas y la severidad de estas (consecuencias). Sin embargo, los efectos deberían ser indicados en términos de como repercute en el rendimiento.

**Causas del modo de fallo:** Indicación de la razón de que la falla puede ocurrir, que se describe de forma tal, que se permita hacer una corrección o controlarse.

Gravedad: Permite conocer la importancia que ocasiona el efecto del modo de fallo para el cliente, estimando el nivel de consecuencias, relacionado con la insatisfacción del cliente que se asocia a un índice, este aumenta en proporción a la disconformidad, disminución del rendimiento esperado y el costo que conlleva una determinada reparación. Sin ir más lejos, la tabla con sus respectivos valores es la representada en la **Tabla 2**.

Tabla 2: Clasificación de la gravedad del modo de fallo. Fuente: (Bestratén Belloví & Orriols Ramos, 2004 )

Gravedad	Criterio	Valor
Muy baja Repercusiones Imperceptibles	No es razonable esperar que este fallo de pequeña importancia origine efecto real alguno sobre el rendimiento del sistema. Probablemente, el cliente ni se daría cuenta del fallo	1
Baja Repercusiones Irrelevantes casi no perceptibles	El tipo de fallo originaría un ligero inconveniente al cliente. Probablemente, éste observará un pequeño deterioro del rendimiento del sistema sin importancia. Es fácilmente subsanable.	2-3
Moderada Defectos de escasa importancia	El fallo produce cierto disgusto e insatisfacción en el cliente. El cliente observará deterioro en el rendimiento del sistema.	4-6
Alta	El fallo puede ser crítico y verse inutilizado el sistema. Produce un grado de insatisfacción elevado.	7-8
Muy Alta	Modalidad de fallo potencial muy crítico que afecta el funcionamiento de seguridad del producto o proceso y/o involucra seriamente el incumplimiento de normas reglamentarias. Si tales incumplimientos son graves corresponde un 10	9-10

Frecuencia: Se asocia a la probabilidad de que ocurra una causa potencial de fallo y en consecuencia se produzca un modo de fallo. Por supuesto, en el caso de que se cuente con información, es importante utilizar estos datos ya sean históricos o estadísticos. Así, una útil clasificación se muestra en la **Tabla 3**, en la que un índice mayor implica una alta ocurrencia.

Tabla 3: Clasificación de la frecuencia de ocurrencia del modo de fallo. Fuente: (Bestratén Belloví & Orriols Ramos, 2004 )

<b>Frecuencia</b>	<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Muy Baja Improbable	Ningún fallo se asocia a procesos casi idénticos, ni se ha dado nunca en el pasado, pero es concebible.	1
Baja	Fallos aislados en procesos similares o casi idénticos. Es razonablemente esperable en la vida real del sistema, aunque es poco probable que suceda.	2-3
Moderada	Defecto aparecido ocasionalmente en procesos similares o previos al actual. Probablemente aparecerá algunas veces en la vida del componente/sistema	4-5
Alta	El fallo se ha presentado con cierta frecuencia en el pasado en procesos similares o previos procesos que han fallado.	6-8
Muy Alta	Fallo casi inevitable. Es seguro que el fallo se producirá frecuentemente	9-10

Controles actuales: Se debe especificar que controles son utilizados actualmente para evitar las causas de un fallo y detectar el efecto que resulta de este.

Detectabilidad: Este concepto quiere decir que en el caso de que se produzca un fallo o cualquier imprevisto, conocer que tan probable es no ser detectado. En términos más simples, si hay una elevada dificultad en detectar un fallo existente y un alto tiempo en que esto se haga, más graves son las consecuencias de este (fallo). Por otra parte, a diferencia de los otros índices, mientras menor sea el valor de la capacidad de detección, será mayor el índice de detectabilidad. Por consiguiente, en la **Tabla 4** se plasma lo definido.

Tabla 4: Clasificación de la facilidad de detección del modo de fallo. Fuente: (Bestratén Belloví & Orriols Ramos, 2004 )

<b>Detectabilidad</b>	<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
Muy alta	El defecto es obvio. Resulta muy improbable que no sea detectado por los controles existentes.	1

Alta	El defecto, aunque es obvio y fácilmente detectable, podría en alguna ocasión escapar a un primer control, aunque sería detectado con toda seguridad a posteriori.	2-3
Mediana	El defecto es detectable y posiblemente no llegue al cliente. Posiblemente se detecte en los últimos estados de producción.	4-6
Pequeña	El defecto es de tal naturaleza que resulta difícil detectarlo con los procedimientos establecidos hasta el momento.	7-8
Improbable	El defecto no puede detectarse. Casi seguro que lo percibirá el cliente final	9-10

Índice de prioridad del riesgo (IPR): Es el producto de los tres factores que se mencionaron con anterioridad (**ver: (Ecuación 10)**), es decir, gravedad, frecuencia y detectabilidad, que fueron expresados en tablas con una escala comprendida entre 1 y 10. Este se calcula para todas las causas de fallo, y según el valor que resulte será la priorización, además un índice de prioridad de riesgo que sea menor a 100 no necesitaría intervención a menos que la acción correctora o mejora sea fácil de implementar y ayudará a mejorar la calidad del trabajo (Bestratén Belloví & Orriols Ramos, 2004 ).

$$\text{índice de Riesgo (IPR)} = \text{Gravedad} \times \text{Frecuencia} \times \text{Detección} \text{ (Ecuación 10)}$$

El valor que se obtiene de la expresión anterior es adimensional y solo permitirá como se dijo con anterioridad generar un orden de prioridad, además de ser una ayuda en la toma de decisión con respecto a acciones correctoras.

Acción correctora: dependiendo el tipo de acción que se escoja se deben seguir determinados criterios:

- Cambios en el diseño del servicio o proceso general.
- Incremento del control o la inspección.

## 2.6. Reducción de Minerales

Las primeras etapas de conminución son realizadas para facilitar el manejo de material que proviene de la mina, para posteriormente en etapas sucesivas de chancado y molienda lograr separar el mineral de la ganga. El chancado es realizado con material seco y el mecanismo

que permite disminuir el tamaño es el impacto o la comprensión. Por otra parte, la molienda se realiza mayoritariamente en húmedo, lo que permite la reducción de tamaño es la abrasión e impacto del mineral por el movimiento de los medios de molienda, tales como: barras, bolas e inclusive por el mismo material grueso. El objetivo que se desea alcanzar en la industria minera es alcanzar un tamaño del producto que permita la liberación de las especies mineralógicas valiosas para posteriormente ser separada de la ganga en procesos posteriores (Cárcamo, 2003).

### 2.6.1.Chancado

Cuando hablamos de la etapa de chancado se hace referencia a un equipo eléctrico, en el cual existen elementos que trituran la roca a través de vibraciones, rompiendo y reduciendo el volumen del objeto en partículas pequeñas, con el objetivo de conseguir un material más fino. Además, los chancadores son alimentados por la parte superior y la descarga del mineral chancado ocurre por la parte inferior a través de una abertura graduada según el diámetro requerido. El desplazamiento del mineral en la planta es gracias a las cintas transportadoras, iniciando desde la alimentación de la mina hasta la entrega del mineral chancado a la siguiente etapa. En cuanto al tamaño proveniente de la mina, este presenta diversas dimensiones desde partículas menores a 1 milímetro hasta tamaños mayores a 1 metro de diámetro. Así, la finalidad del chancado es reducir los fragmentos mayores hasta obtener un tamaño análogo máximo de ½ pulgada (1.27 centímetros). Para lograr lo anterior, se utilizan tres equipos en línea que reducen las rocas en secuencia: etapa primaria, etapa secundaria y etapa terciaria. En estas, se reducen los fragmentos al tamaño máximo de 8 pulgadas de diámetro, tres pulgadas y finalmente ½ pulgada, respectivamente (Anón., 2019).

### 2.6.2.Molienda

Es la última etapa en el proceso de conminución, lo que significa una reducción mayor de las partículas. Se realiza en circuito rotatorios conocidos como molinos, existen diversos tipos, los cuales se clasifican según: su forma y medio de molienda. Así, según su forma se encuentran: Cilíndricos rotatorios, cilindro - cónicos rotatorios, tubular rotatorio. Por otro lado, para lograr el proceso de la molienda, estos equipos están provistos de elementos molidores, estos por lo general son bolas de acero, guijarros o autógenos, además de otros tales como: cabillas, bolas de porcelana e inclusive mineral grueso. A pesar de la diversidad

de tipos el objetivo común, es lograr una fragmentación tal de las partículas de minerales que queden separadas las partículas de las especies útiles de la ganga (Anón., 2019).

### 3. METODOLOGÍA

- La información se obtuvo del personal de la minera Paicaví, en áreas tales como: mantenimiento, operaciones, seguridad y ambiente.
- Se registró el número de fallas en un determinado tiempo, el impacto en la producción y en la seguridad de los procesos, esto se hizo para cada equipo considerado en el análisis de criticidad.
- Se aplicaron diferentes métodos de evaluación, tales como: Matriz de criticidad basada en el riesgo para obtener la criticidad de los activos, Análisis de modos de falla y sus efectos y método Jack-nife.
- Se elaboró un seguimiento al tiempo de operación de cada equipo, tiempo medio para reparar, el tiempo medio entre fallas y a la tasa frecuencia de fallas.
- Se hizo un diagrama de Jack-Knife para obtener una clasificación de las fallas en cuatro categorías: agudo, crónico, agudo/crónico y bajo control, lo anterior dado por el número de intervenciones y tiempos medios para reparar.

El desarrollo de la solución comenzó con el análisis cuantitativo, para esto se utilizó una matriz de criticidad basada en el riesgo, esta fue interpretada en dos ejes, según su definición, es decir, vertical y horizontalmente, para poder plasmar en ella las frecuencias de las fallas (permitió medir la confiabilidad) y las consecuencias (relacionado con el impacto que arrastró a la producción) respectivamente. En este sentido, fue necesario definir con la alta gerencia, los objetivos de la organización, puesto que, esto dio un indicio de cuáles son los criterios que se debían considerar en lo que respecta a los efectos que generan las averías. En otras palabras, dependiendo del entorno en el que se trabaje, habrá ciertos criterios de más utilidad que otros, así como también se encontrará que habrá algunos que son comunes en la mayoría de las industrias. Por último y luego de haber contado con dicha información que está asociada a la matriz, se inició a la aplicación de esta, para cada activo en estudio y así se obtuvo lo que se denominó anteriormente un “mapa de criticidad”, dado por la posición que ocupa el equipo en el eje de coordenadas x, y.

Por otra parte, luego de obtener los resultados que entrega la matriz se tuvo que poner énfasis en aquellos que obtuvieron los valores más altos (frecuencias de fallas y consecuencias),

debido a que, en estos, es donde se deben generar mejoras a través de planes de acción en el corto plazo, a través de la ayuda de la herramienta Jack-Knife.

La razón por la que se utilizó un método basado en el riesgo tiene una conexión directa con la organización internacional de normalización, exactamente el estándar “ISO-55000” que es un modelo de gestión de los activos, en su contenido, específicamente en la sección 2.1 se expresa que las decisiones, planes y actividades que se deban realizar tienen que ser utilizando un enfoque basado en el riesgo, entendiéndose este término como un “efecto de incertidumbre sobre los objetivos” según la norma “ISO-31000” (ISO 55000:2014 Gestión de Activos - Aspectos generales, principios y terminología).

A continuación, se muestra el detalle, desglose y explicación para cada metodología por aplicar.

### 3.1. Métodos de Evaluación

#### 3.1.1. Matriz de criticidad basada en el riesgo

Para determinar la criticidad de los activos, la información jugó un rol clave, siendo la base de este análisis la frecuencia de fallas y sus impactos. Inicialmente, el primer término fue abordado realizando un análisis detallado de los registros que lleva el personal de Minera Paicaví sobre las actividades de mantenimiento a los equipos de planta tales como: chancadores, molinos, celdas de flotación, bombas, harneros, cintas transportadoras.

Finalmente, lo anterior permitió que el área de mantenimiento tenga conocimiento de cuál debe ser la priorización en sus planes y programas según sea la criticidad que tenga el activo (la **Ilustración 3** permite lo mencionado) para optimizar la productividad.



Ilustración 3: Matriz de criticidad basada en riesgo, Fuente: (Romero, 2013)

### 3.1.2. Diagrama Jack-Knife

Se debió hacer un seguimiento, sobre tres aspectos que son cruciales, entre ellos se necesitó el tiempo medio para reparar (**Ecuación 11**), el que hace alusión a el tiempo promedio que se demoran los encargados de mantenimiento en reparar después de que ocurre una falla, el tiempo medio entre fallas (**Ecuación 12**), la tasa de fallas y finalmente la indisponibilidad que es el resultado del producto entre la tasa de fallos y los tiempos medios para reparar (MTTR) (**Ecuación 13**). Por otra parte, es importante mencionar que la tasa de fallas es el equivalente a la inversa del tiempo medio entre fallas (MTBF) (**Ecuación 14**). Estos indicadores permitieron tomar decisiones o priorizaciones sobre que subsistemas, fallas y/o componentes están los más críticos, esto en base a tres parámetros: mantenibilidad, confiabilidad e indisponibilidad. Los datos que se obtuvieron fueron graficados en un diagrama con una escala lineal, en el cual se utilizó en el eje de las abscisas la tasa de fallas y en el eje de las ordenas el tiempo medio para reparar. Luego de esto se procedió a calcular la media tanto para la tasa de fallos como el tiempo medio para reparar, posteriormente ambas fueron graficadas como rectas, es decir, resultando una línea vertical y horizontal respectivamente (esto se hará con la intención de delimitar las zonas dentro del diagrama). Resumiendo, se logró tener un diagrama que fue dividido por diferentes sectores, donde se destaca una región crítica, la que significa que tendrán elevados los siguientes indicadores: tiempo medio para reparar, tasa de fallos e indisponibilidad.

En concreto, los indicadores mencionados fueron calculados con el uso en las siguientes fórmulas matemáticas:

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de reparaciones (TTR)}}{\text{Total de fallas}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$MTBF = \frac{\text{Horas de operación en un determinado tiempo}}{\text{Total de fallas}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$\text{Indisponibilidad} = \text{Tasa de fallas} \times MTTR \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$\text{Tasa de fallas} = \frac{1}{MTBF} \quad (\text{Ecuación 14})$$

### 3.1.3. AMFE

Para la correcta realización del análisis de modos de fallas y efectos, se utilizó el formato que se encuentra en la **Tabla 1** y en base a los resultados obtenidos inicialmente de la matriz de criticidad basada en el riesgo y posteriormente en los gráficos de dispersión sobre las fallas

y componentes que requieren focalizar la atención, se procedió a seleccionar al equipo más crítico de la planta de procesos, para el cual fue necesario en primera instancia definir el ítem/componente, luego su función, modo de falla, efectos de falla, evaluar la gravedad, frecuencia y detección, para obtener finalmente mediante la multiplicación de los tres factores mencionados, el índice de prioridad del riesgo asociado al componente o ítem, luego se creó una lista jerarquizada en función del mayor valor calculado del índice y se hicieron recomendaciones enfocadas al mantenimiento que puedan contrarrestar los efectos de los cambios de elementos o correcciones que se realizaban provenientes de las intervenciones registradas en el periodo de estudio.

## 4. RESULTADOS

Para lograr determinar qué equipo es el más crítico dentro de la planta de chancado y molienda, fue necesario recurrir a registros diarios sobre todo tipo de actividad relacionada a mantenimiento en Minera Paicaví, en el cual personal que se encontraba en turno debía dejar nota de cada eventualidad que ocurriera en el complejo minero, lo cual es denominado por los trabajadores “libro de novedades”. Por otra parte, también se hizo necesario hacer un levantamiento de información sobre seguridad, medio ambiente, producción y costos en mantenimiento, de forma tal de poder confeccionar la matriz de criticidad, recordando que, necesita de dos componentes la frecuencia de fallas y las consecuencias que estas generan, ubicándose de forma vertical y horizontal, respectivamente.

### 4.1. Registros de fallas de los equipos

En lo concerniente al número de ocurrencia de fallas se analizó información de las actividades diarias de mantenimiento en un periodo de 13 meses, comprendido entre febrero del año 2020 hasta marzo del 2021. Observando lo que ocurría según lo registrado por los trabajadores, se pudo concluir que el equipo que más fallas presentó durante ese lapso de estudio correspondió a las correas transportadoras, en los que se detectó un total de 71 actividades asociadas a mantenimiento, por otra parte el activo con menos intervenciones correspondió al chancador, contabilizando 28 fallas. A continuación, se muestra un gráfico resumen en Ilustración 4 que muestra en detalle la ocurrencia de estos eventos.

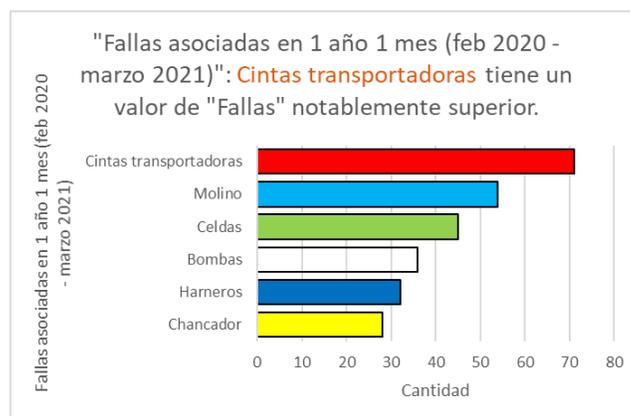


Ilustración 4: Frecuencia de falla de los equipos. Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. Consecuencias de las fallas de los Equipos

Para conocer cuáles de los criterios son considerados para el análisis de criticidad, recordando que estos hacen referencia a las consecuencias que las fallas generan en términos de seguridad, medio ambiente, producción, calidad, costos de mantenimiento, baja mantenibilidad, entre otros. Se hizo necesario conocer que era lo realmente primordial para que la empresa pueda llevar con éxito sus operaciones. En el contexto de Minera Paicaví, son dos los factores que tuvieron más relevancia sobre otros, estos correspondieron a: seguridad y continuidad operacional. Por esta razón, estos elementos fueron analizados a continuación, para poder dar forma a la matriz de criticidad.

**Seguridad:** Para este componente se evaluaron los riesgos asociados que puedan existir dentro de la operación, haciendo referencia a la planta de procesos. En este sentido, se tuvo que recurrir a diferentes matrices de identificación de peligros y evaluación de riesgos hechas por el complejo Minero Paicaví (ver: **Tabla 13, Tabla 14, Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17**), de esta forma al realizar un estudio detallado de las diferentes matrices se observó que los molinos, presentan un mayor riesgo para la seguridad de las personas, puesto que, estos equipos pueden generar una alta probabilidad de riesgo en la vida y/o daños graves a la salud del personal al tener que realizar actividades asociadas al mantenimiento al interior del activo, en cambio en el caso de las celdas no existe un riesgo asociado al personal. En consecuencia, para la evaluación de este factor, se definió el peor evento asociado a la actividad del molino y el con menor peligro representado por las celdas.

**Continuidad Operacional:** Lo que más afecta para que la producción pueda seguir de forma continua son las cintas, la razón de esto es que de ellas depende la mayoría del proceso, ya que son las encargadas de mover el mineral a las diferentes etapas del chancado y molienda, además una falla en cualquiera de ellas genera una interrupción en el proceso. En contraste, los harneros no representan una mayor detención en las actividades, por la razón de que estos equipos tienen la función de seleccionar según el tamaño de la roca, además estos al contar con una malla para estos fines, si existe algún problema, éstas solo son cambiadas, lo que no significa una actividad de alta complejidad ni que conlleve elevados tiempos en el reemplazo.

### 4.3. Aplicación de Matriz de Criticidad basada en el Riesgo

Ahora bien, según la información que se presentó en los puntos anteriores, fue posible definir los componentes a utilizar en la matriz de criticidad basada en el riesgo, inicialmente se consideró la frecuencia de las fallas y luego sus consecuencias, las que correspondieron a seguridad y continuidad operacional. En efecto, se concluyó que para el primer elemento de la matriz, los molinos son los que más actividades de mantenimiento tienen en el periodo considerado y los que tienen un menor volumen son los chancadores. Por otra parte en las consecuencias, se observó que para el apartado de seguridad y continuidad operacional los molinos y las cintas transportadoras son los que más efectos negativos tienen sobre los resultados de la empresa respectivamente, en cambio las celdas y los harneros en el mismo orden de las categorías anteriores tienen una menor influencia o impacto. Lo anterior fue determinado junto al personal encargado de realizar las mantenciones y reparaciones en los equipos. Por consiguiente, a continuación se presentan los factores de frecuencia de fallas y sus consecuencias, ambos incluyen dentro de sí categorías desde el 1 hasta el 5, en los que el número menor representa lo más favorable y el mayor la peor situación que puede afectar a la empresa.

Frecuencia de fallas:

1. Sumamente improbable: menos de 20 eventos en 1 año.
2. Improbable: entre 20 y 40 eventos en 1 año.
3. Posible: entre 40 y 60 eventos en 1 año.
4. Probable: entre 60 y 80 eventos en 1 año.
5. Frecuente: más de 100 eventos en 1 año.

Factores de consecuencias:

- Impacto en seguridad:
  1. No existe riesgo para el personal, no se accede al interior del equipo.
  3. Riesgo medio en la vida y/o daños menores en la salud del personal, lesión leve o media, producido por una falla operacional.

5. Alta probabilidad de riesgo en la vida y/o daños graves a la salud del personal, lesión grave o muerte, puede existir un atrapamiento al interior del equipo.

- Continuidad Operacional:
  1. No afecta de forma significativa.
  3. Tiene un impacto medio, la falla puede ser solucionada en un tiempo corto de reparación lo que permite seguir el proceso productivo.
  5. Afecta de forma significativa, llegando a detener el proceso productivo.

En consecuencia, con la información que se definió para cada uno de los componentes de la matriz de criticidad, fue posible aplicar la matriz considerando cada equipo que es parte de este análisis. El primer paso para conocer la criticidad asociada a cada activo correspondió a verificar en la escala de 1-5 para la frecuencia de fallas, la cantidad de eventualidades que ha sufrido en el pasado el equipo en cuestión. Luego se tuvo que revisar lo que sucede con las consecuencias de las fallas, en las que existen dos componentes, entre ellos se encuentran seguridad y continuidad operacional, aquí nuevamente se debió verificar dentro de la escala que se mencionó en líneas anteriores, lo que pasaba con dicho activo. Finalmente, se trazó una línea desde el primer componente en estudio (frecuencia de fallas), que corresponde al eje vertical en la matriz, para posteriormente hacer la intersección del peor evaluado (entre seguridad y continuidad operacional) de las consecuencias de las fallas, el cual se representa por el número mayor dentro del rango existente. A continuación se muestra gráficamente en la **Ilustración 5** el uso de la matriz con los resultados obtenidos, en donde se observó que existen dos equipos con una alta criticidad.



Ilustración 5: Aplicación de matriz de criticidad. Fuente: (Romero, 2013)

De la **Ilustración 5** se concluyó que los equipos tienen la siguiente criticidad asociada, lo cual se observa en la **Tabla 5**, en la que cada activo tiene un color que lo representa en la matriz de criticidad basada en el riesgo (**más atrás**).

*Tabla 5: Criticidad asociada a cada activo. Fuente: Elaboración propia.*

Nombre de Equipo	Frecuencia de fallas	Factor de consecuencias de las fallas		Valor	Jerarquización
		Seguridad	Continuidad Operacional		
Chancadores	2	3	3	6	Criticidad Media
Celdas	3	3	3	9	Criticidad Media
Correas Transportadoras	4	3	5	15	Alta Criticidad
Harneros	2	1	1	2	Baja Criticidad
Bombas	2	1	1	2	Baja Criticidad
Molinos	3	3	3	9	Criticidad Media

#### 4.4. Diagrama de Jack-Knife

Con respecto al uso de esta herramienta, se obtuvo información muy útil para el área de mantenimiento, debido a que se pudo concluir en cuales fallas se debe centrar la atención, además de recomendaciones relacionadas a realizar acciones específicas de mantenimiento. En cuanto a los tiempos medios para reparar luego de ocurridas determinadas fallas, se tiene un registro para los equipos que más efectos tienen en los resultados de la empresa, obtenidos del análisis de criticidad, es decir, aquellos que presentan una media y alta criticidad, estos son: Chancadores, Celdas, Cintas o Correas transportadoras y Molinos.

Además, para la utilización de este diagrama debieron ser considerados los tiempos de operación, en el caso de la planta, allí se trabaja en dos turnos de 12 horas al día, 5 veces por

semana. Por lo que, recordando que el periodo en análisis correspondió de febrero de 2020 hasta marzo de 2021, se contabilizan un total de 292 días, por lo tanto, el tiempo de operación resulta ser un total de 7008 horas.

A continuación se presentan en la **Tabla 20, Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23** las fallas más recurrentes en los equipos mencionados anteriormente con los respectivos tiempos medios que permiten finalizar la reparación y el total de intervenciones asociadas a cada activo.

En consecuencia, con la información presentada en las tablas, fue posible realizar un gráfico de dispersión para cada activo, para el cual el eje “x” representa la cantidad de fallas y el eje “y” los tiempos medios para reparar (MTTR). En estos gráficos se evidenciaron 3 zonas que son importantes de destacar, estas son: Agudo y Crónico, Agudo y Crónico. Es importante destacar que estas son producto de haber trazado dos rectas, el promedio del total de fallas y el MTTR. A continuación se define cada una de estas y posteriormente se presentan los diagramas de Jack Knife:

- Agudo y Crónico: Poseen una alta frecuencia de fallas y tiempo medio para reparar sobre el promedio.
- Crónico: Tienen una alta tasa de fallas pero los tiempos medios para reparar están bajo el promedio
- Agudo: Se caracterizan por tener un elevado tiempo medio para reparar que está sobre el promedio.

#### 4.4.1. Construcción Detallada Gráfico de Dispersión

Se debió establecer dos ejes con la utilización de la información que se encontraba disponible, para las abscisas se utilizó la frecuencia y en contraste para las ordenadas las consecuencias. Posterior a esto, se calcularon límites para ambas variables, en las que se utilizó el promedio de los datos (número de intervenciones y MTTR), indicados con color rojo y verde respectivamente. También, cabe recalcar estos diagramas son regidos por reglas asociadas a indicadores de rendimiento, que se construyó en función de los indicadores tanto en el eje “x” como en el eje “y”, para el caso en concreto de este estudio, se utilizó la indisponibilidad (**más adelante**) que resultó de la siguiente expresión:

$$\text{Indisponibilidad} = N^{\circ} \text{ de Intervenciones} \times \text{Tiempos Medios en Reparación (Ecuación 15)}$$

Ahora bien, también es posible construir otro tipo de indicador, por ejemplo los costos asociados al mantenimiento, que resulta del producto del número de intervenciones y los costos de las intervenciones. Sin embargo, estos se seleccionan de acuerdo con la información que se posea, debido a esto, solo se utilizó la indisponibilidad. Luego, para la interpretación de los datos que fueron graficados en estos diagramas de dispersión, se debe comprender que a medida que los datos se encuentran más a la derecha en el eje de las abscisas significa que este (dato) es peor y para el caso de los ejes de las ordenadas ocurre algo similar, es decir, en cuanto el movimiento es más hacia arriba en la lectura de los datos tiene un significado más grave o crítico. Por otra parte, como ultima regla se generan las curvas ISO- indicadores claves de rendimiento (KPI), representadas por el indicador de indisponibilidad, en la que se obtuvo constantes que vienen dadas como se mencionó por la multiplicación de un indicador del eje “x” y otro del eje “y”, la referencia para la generación de las curvas viene dada por el valor mayor obtenido de los datos de cada equipo, por lo que estas variaron en función del equipo.

#### 4.4.2. Diagrama de Jack-Knife para cada Equipo de Planta de Procesos.

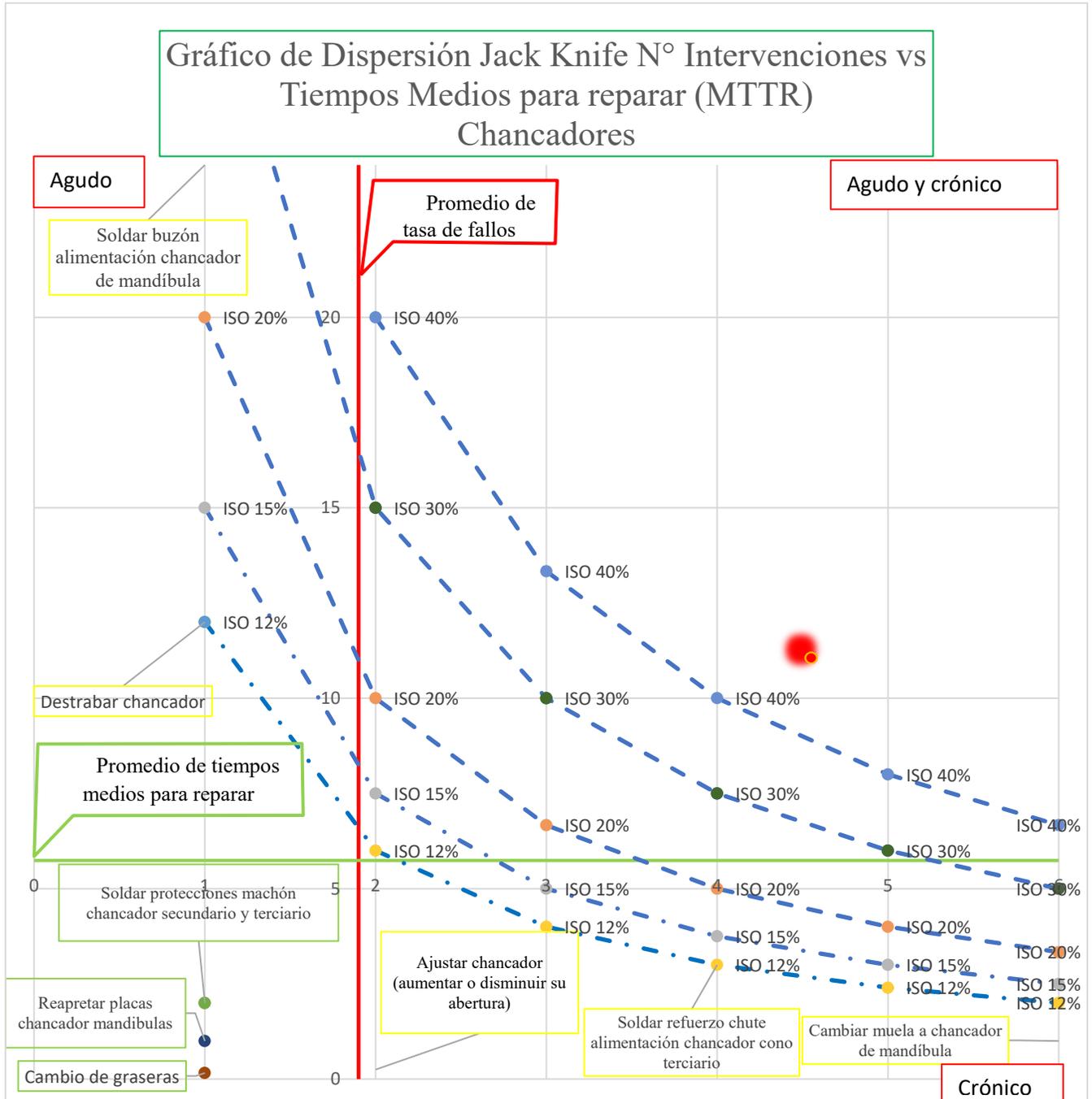


Ilustración 6: Gráfico de Dispersión Jack Knife N° Intervenciones vs MTTR, Equipo: Chancadores.

Fuente: Elaboración propia.

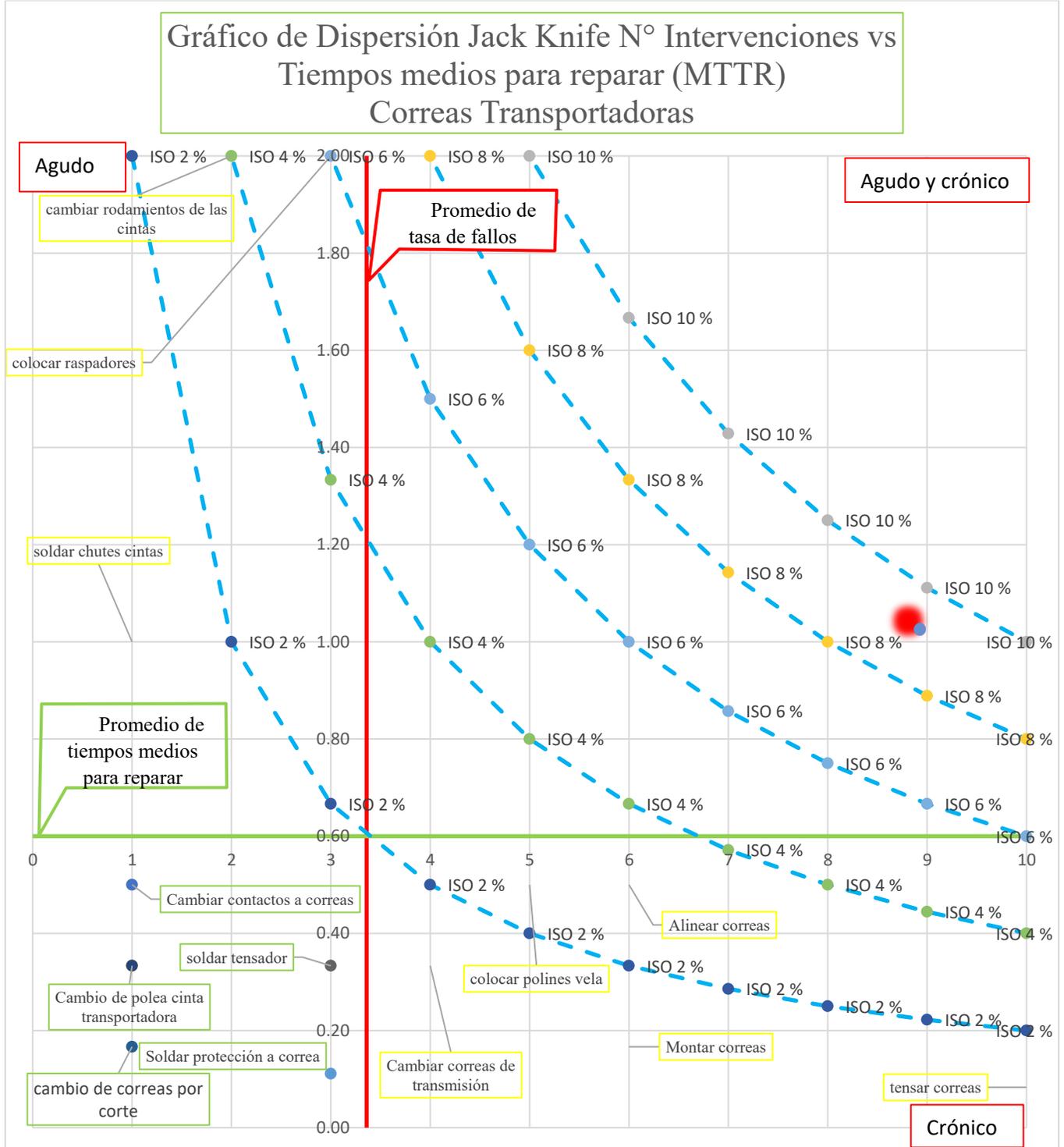


Ilustración 7: Gráfico de Dispersión Jack Knife N° Intervenciones vs MTTR. Equipo: Correas Transportadoras. Fuente: Elaboración propia.

## Gráfico de Dispersión Jack Knife N° Intervenciones vs Tiempos medios para reparar MTTR Celdas de Flotación

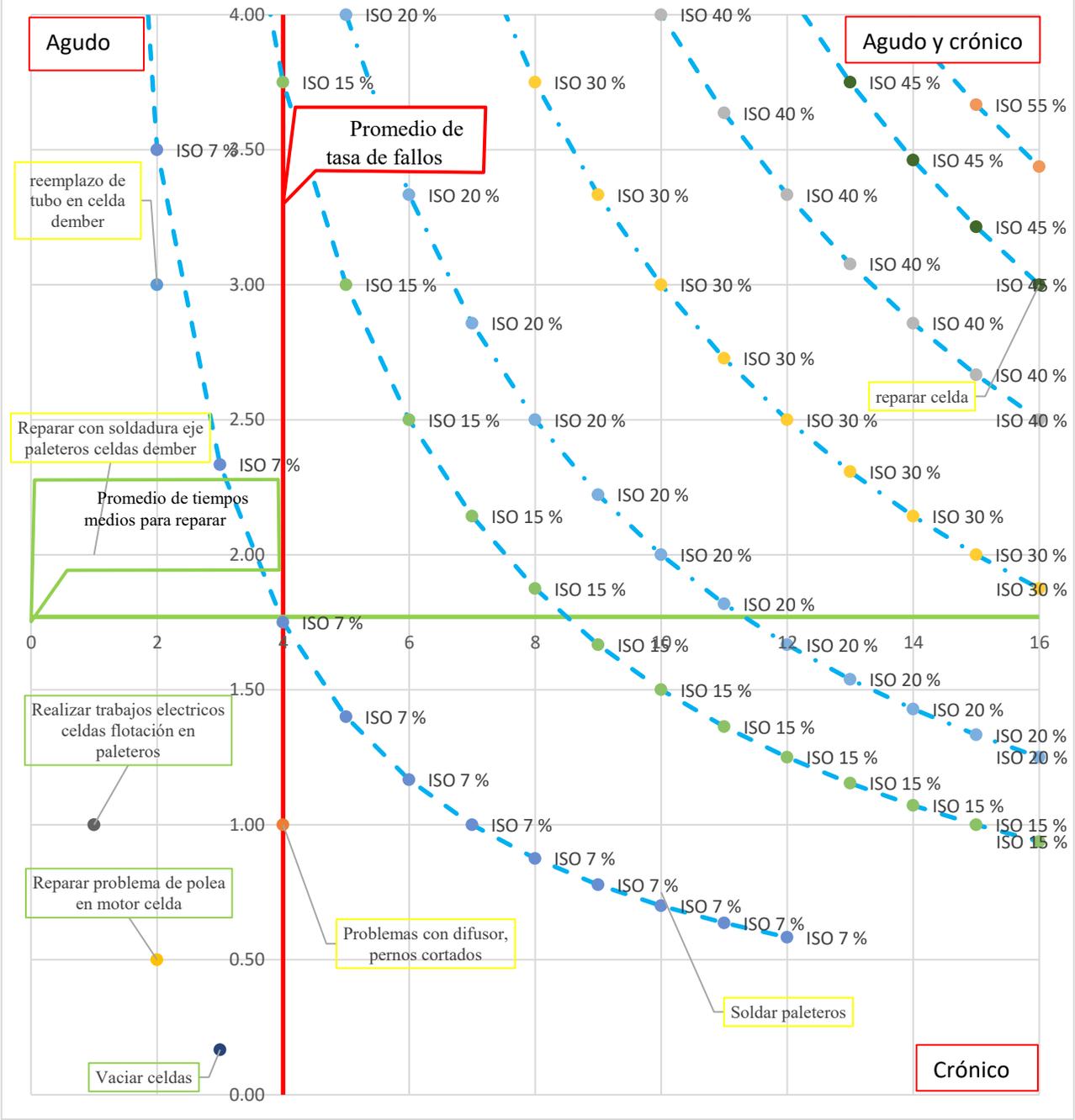


Ilustración 8: Gráfico de Dispersión Jack Knife N° Intervenciones vs MTTR. Equipo: Celdas de Flotación. Fuente: Elaboración propia.

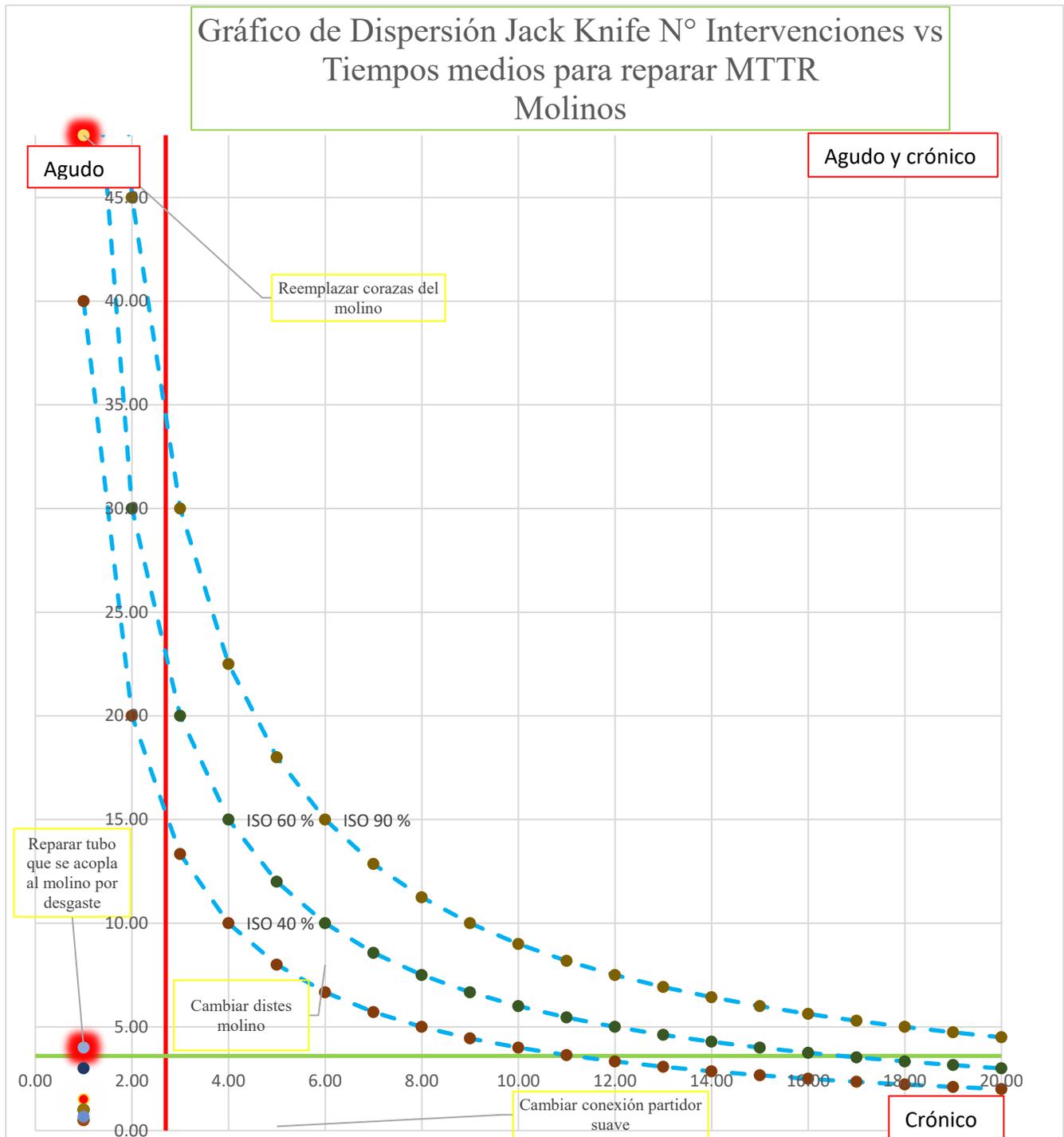


Ilustración 9: Gráfico de Dispersión Jack Knife N° Intervenciones vs MTTR. Equipo: Molinos. Fuente: Elaboración Propia.

### 4.4.3. Aplicación de Análisis de modos de fallas y efectos.

Luego de haber realizado el análisis de criticidad y determinado que las correas transportadoras son los equipos más críticos, debido a su clasificación de alta criticidad. Se aplicó el AMFE para los componentes y/o modos de fallas más críticos, según los resultados más relevantes obtenidos de los gráficos de dispersión para este equipo, en otras palabras, se realizó para aquellas fallas de componentes que presentan tiempos medios para reparar mayores al promedio y/o número de intervenciones sobre la media de los datos, enfocando de esta forma el estudio solo en los cuadrantes agudo, crónico y agudo-crónico. Por otra parte, para completar los requerimientos del AMFE se pidió ayuda e información a la persona encargada de mantenimiento en Minera Paicaví, la cual identificó modos de fallas y los efectos asociados.

#### 4.4.3.1. AMFE Correas Transportadoras.

Para el caso de las correas transportadoras se analizó los siguientes ítems/componentes:

- Raspadores.
- Chutes.
- Tensado.
- Alineación.
- Polines.

En base a la lista que se detalló, se procedió a la realización de la tabla requerida para la aplicación del AMFE.

Inicialmente se definieron las funciones de los ítems/componentes:

**Raspadores:** Sistema de limpieza de la cinta.

**Chutes:** Sistema de traspaso que permite guiar el material a la correa transportadora.

**Tensado:** Evitar el resbalamiento entre la cinta y el tambor de accionamiento.

**Alineación:** Permitir marcha correcta de la cinta, sin que esta salga de su curso.

**Polines:** Lograr que la carga se deslice, mediante un impulso ajeno al componente.

Análogamente, luego se identificaron los modos de fallas o situaciones que originaron la falla.

**Modo de falla Raspadores:** La cinta se encuentra muy abierta.

**Modo de falla Chutes:** Se traba porque existe material húmedo.

**Modo de falla Tensado:** Cinta se despega, tambor no se encuentra alineado.

**Modo de falla Alineación:** Cinta desalineada.

Así mismo, se continuo con los efectos de falla.

**Raspadores:** Funcionamiento incorrecto de la cinta.

**Chutes:** Acumulación de material.

**Tensado:** Pérdidas de mineral.

**Alineación:** Traslado brusco de material y perdidas de mineral.

**Polines:** Detención de cinta.

En consecuencia, en base a la información que se expuso, se procedió a generar el AMFE para las correas transportadoras. Adicionalmente, se evaluaron la gravedad, frecuencia y detección, para finalmente obtener el índice de prioridad del riesgo calculado con la **(Ecuación 10)** . Lo anterior queda resumido en la **Tabla 24**.

En ese sentido, se pudo concluir el orden de jerarquización que deben tener los ítems o componentes, estos se detallan en la siguiente lista ordenados de mayor a menor prioridad, de acuerdo con su valor calculado de IPR en la tabla de AMFE de las correas transportadoras.

- Polines.
- Raspadores.
- Tensado.
- Chutes.
- Alineación.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Respecto a los equipos que presentan la mayor criticidad dentro de la planta de procesos, se concluyó que estos corresponden a las correas transportadoras, la razón de esto se debió a que para el primer equipo mencionado se evidenció una gran cantidad de fallas asociadas con un total de 71 intervenciones en el periodo de estudio, en el cual el rasgo más significativo fue producido por la continuidad operacional, en donde es primordial que las correas transportadoras deban seguir realizando su función de mover las rocas con contenido mineral a los chancadores y molinos, puestos que sin el adecuado funcionamiento de estas cintas, los equipos encargados de disminuir el tamaño de las rocas, no podrían cumplir su función sin el producto necesario para estos fines. Sin embargo, en cuanto a la seguridad, las fallas operacionales asociadas a este activo llevan a concluir que solo se pueden producir lesiones leves o menores en el personal encargado de restituir o reponer un componente sometido a desgaste.

Por otra parte, al haber analizado las fallas a través de los diagramas de dispersión generados por el método Jack Knife, que se aplicaron a los equipos que presentaban una media y alta criticidad, la focalización de la atención por parte del área encargada de mantenimiento debe ser a las fallas que se encuentran en las zonas de Agudo y Crónico, Agudo y Crónico. En concreto, luego de realizada la observación en los gráficos se evidencia que en el caso de los chancadores, existen 5 fallas que requieren generar acciones de mantenimiento enfocadas a disminuir tiempos medios para reparar y/o evitar su repetitividad en el tiempo. En consecuencia, fallas tales como “soldar buzón de alimentación chancador de mandíbula” y “destrabar chancador” se ubicaron en el cuadrante denominado “agudo”, lo que significó que estas averías tardan tiempos medios para reparar que se encuentran sobre el promedio, siendo un indicador de confiabilidad por mejorar. Por otra parte, intervenciones como: “cambiar muela a chancador de mandíbula” y “soldar refuerzo chute alimentación con terciario”, presentaron una tasa de fallos mayor al promedio lo que se traduce en optimizar el indicador de mantenibilidad.

Además, viendo lo plasmado en el gráfico de dispersión de las correas transportadoras, no existieron fallas que se encontraran en la región más crítica denominada “Agudo y Crónico”, pero a diferencia de los chancadores, se hallaron una mayor cantidad de fallas que están sobre

el promedio de los tiempos medios para reparar y la cantidad de intervenciones, con un total de 8 modos de fallas diferentes. En efecto, lo más destacado que se pudo concluir es que existieron 5 reparaciones en la zona de “Crónico” que se están repitiendo con una frecuencia elevada en el periodo considerado dentro del análisis, estas correspondieron a: “Montar correas”, “cambiar correas de transmisión”, “colocar polines vela”, “alinear correas” y por ultimo y con la mayor frecuencia en el tiempo “tensar correas”. Por otra parte, en el caso del cuadrante de “Agudo”, hubo un total de 3 mantenciones por sobre el promedio de los tiempos medios para reparar, estas fueron: “Soldar chutes de las cintas”, “colocar raspadores” y cambiar rodamientos de cintas”, estas dos últimas con los mayores e idénticos tiempos medios en reparar.

Asimismo, para las celdas de flotación también se observó que ocurría con respecto a las fallas, aquí se observó que hay una que se encuentra en una región extremadamente crítica, la que se caracteriza por presentar tiempos medios para reparar y frecuencia de fallos, ambos sobre los promedios calculados para cada indicador, con lo anterior se hace referencia al cuadrante “Agudo y Crónico”, específicamente la tarea de “reparar celda”, esta actividad de mantenimiento está asociada con la acción de soldar la celda por rotura o daños a través de la colocación de una platina para tapar la superficie que presenta un agujero. Por otro lado, en el cuadrante “Agudo” se hallaron 2 fallas que también necesitan de atención, debido a que presentaron tiempos medios para reparar sobre el promedio, estas correspondieron a: “Reparar con soldadura eje paleteros Celdas Dember” y “Reemplazar tubo en celda Dember”, este último con un mayor tiempo medio para reparar con una duración total de 3 horas. En contraste en la zona “Crónico”, la intervención que se visibilizó fue “soldar paleteros” que mostró ocurrir con una frecuencia mayor al promedio de los datos en este apartado.

Finalmente, en lo relativo a los molinos, la reparación más crítica correspondió a “cambiar distes del molino”, en lo que se encontró con tiempos medios para reparar y tasa de fallas, ambos elementos sobre el promedio, quedando esta actividad en la zona de “Agudo y Crónico”, para el cuadrante “Agudo” se concluyó que existían dos actividades que presentaban tiempos mayores al promedio del MTTR, las que corresponden a: “Reparar tubo que se acopla al molino” y con una mayor duración el “Reemplazar corazas del molino” actividad que lleva en ser desarrollada un total de 48 horas. En cambio, para las reparaciones

que presentan una tasa de fallas sobre el promedio de los datos, se verificó que “cambiar conexión partididor suave” es una tarea catalogada en el cuadrante “Crónico”.

## 5.1. Interpretación ISO-Indisponibilidad

Las curvas de ISO-Indisponibilidad fueron representadas en porcentajes que se encontraban en función de cada KPI, esto se hizo de forma individual para los equipos de alta y media criticidad. Por consiguiente, en los chancadores se pudo concluir que la falla más crítica dada por la curva ISO de 40 % en función del indicador indisponibilidad correspondió a “soldar buzón alimentación chancador de mandíbula”, de igual forma se observó inicialmente que actividades como “destrabar chancador” y “soldar refuerzo chute alimentación chancador cono terciario” eran disimiles (la primera caracterizada por tiempos medios para reparar por sobre el promedio y la restante distinguida por una frecuencia de fallas mayor al promedio), pero cuando se hizo el trazado de la curva ISO-Indisponibilidad de 12%, se percató que en términos de riesgo ambas acciones de mantenimiento eran igual de críticas o representaban el mismo impacto, por lo que ambas requieren una evaluación y posterior análisis que pueda contrarrestar el efecto negativo que las caracteriza.

Además, para las celdas con una curva ISO de 45 %, se llegó a la conclusión que “reparar la celda por rotura” es la acción de mantenimiento más crítica, en contraste la menos significativa o que menor impacto representa en términos de criticidad, es “reparar con soldadura los ejes de paleteros en celda Dember” que se encuentra cercana a la ISO-Indisponibilidad de 7 % del indicador KPI. Análogamente, en los molinos las actividades de mayor gravedad correspondieron a “Reemplazar las corazas” que se encontraron cercana a la ISO-Indisponibilidad del 60. En último término, con respecto a las correas transportadoras, la curva ISO a un 6 % del indicador KPI determinó que “Colocar raspadores” es la actividad de mayor importancia, la siguiente en orden jerárquico correspondió a “cambiar rodamientos de las cintas”.

## 5.2. Recomendaciones enfocadas a correas transportadoras.

Las actividades que se recomiendan para los polines que se pueden observar en la **Fotografía 4** corresponden a revisar frecuentemente el estado en el que se encuentran, es decir, verificar si están caídos o sueltos, lo anterior se debe ir chequeando a través de inspección visuales, además verificar si están realizando a cabalidad su función. Para este último propósito, es de suma importancia, observar el movimiento de la cinta, debido a que, un indicador de que existe un problema con los polines queda evidenciado en la capacidad de lograr que la cinta se encuentre alineada, por esta razón, se recomienda hacer pautas de inspección, para asegurar que los polines se encuentran en buenas condiciones.



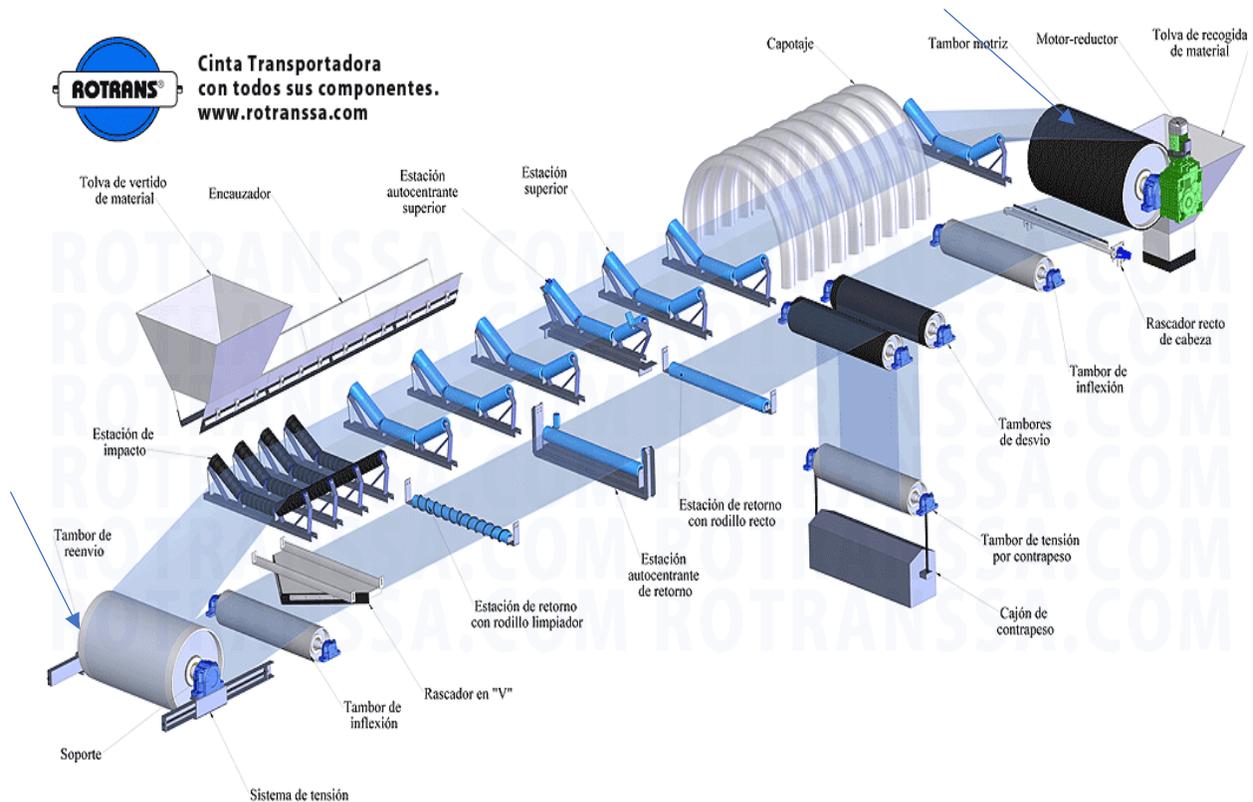
*Fotografía 4: Polín guía de correa transportadora. Fuente: Elaboración propia.*

En lo relativo a las actividades de alineación, tensado y el posterior cambio de correas de transmisión, estas deben ser realizadas por personal calificado y previamente capacitado para tales fines. En ese sentido, debido a que se ha concluido que estas actividades presentan un frecuencia o repetitividad sobre el promedio, es recomendable contar con un procedimiento por escrito en el que se detallen los pasos que se deben seguir, de forma tal de asegurar la correcta aplicación de estas actividades. No obstante, antes de indicar como deben ser realizadas estas actividades, es fundamental conocer el comportamiento básico que tiene una banda con respecto a la alineación.

- El movimiento de la banda o correa transportadora es hacia el sentido que posee mayor fricción.

- La trayectoria de la correa transportadora es afectada por los componentes previos.
- A mayor tensión a la que se encuentra sometida la cinta menor efecto tiene el alineado.

Por consiguiente, la alineación, se logra aflojando dos tambores, es decir, el de retorno y el motriz, los que se indican con flechas azules en **Ilustración 10** que se muestra a continuación.

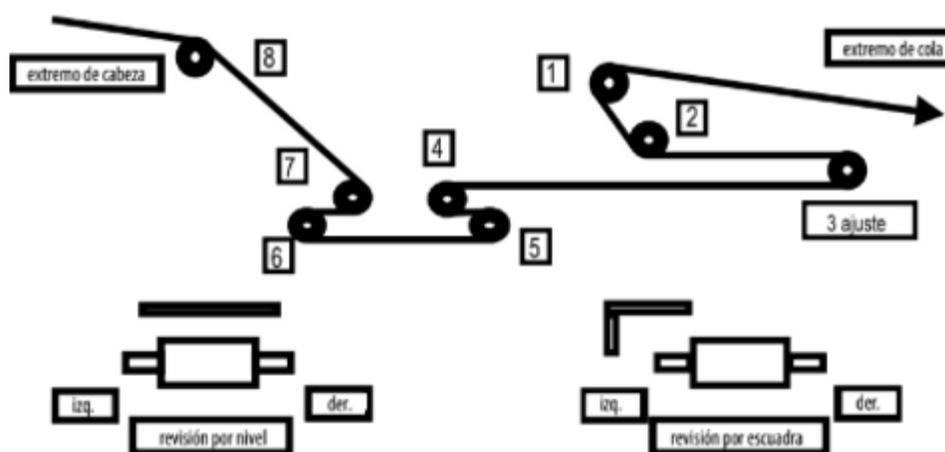


*Ilustración 10: Elementos principales correas transportadoras. Fuente: Rotrans.*

En efecto, antes de alinear la banda se debe seguir una secuencia de pasos:

- Verificar que el transportador se encuentre nivelado tanto de forma longitudinal como en su respectiva anchura.
- Hay que asegurar que la correa este colocada de forma adecuada en el transportador.
- Chequear que la banda transportadora reciba la carga correctamente. La forma en que se alimenta debe ser en la parte central de la banda y en la dirección al flujo que tenga (Meza).

Sin embargo, se recomienda utilizar métodos de alineación por láser, puesto que son más precisos y rápidos que los métodos tradicionales, estos sistemas son fijados en la estructura y con ellos se pueden producir ángulos de 90 grados. Idealmente, conviene hacer este procedimiento en varias etapas, es decir, hacerlo de forma separadas según las estaciones de rodillos. En concreto, el sistema de inspección láser permite hacer reportes en los cuales se indicará cuales componentes presentan una desalineación y en qué grado, recordando que esto es parte del comportamiento básico de las bandas transportadoras (su trayectoria es afectada por componentes previos), de esta forma los encargados de mantenimiento en base a la información obtenida del reporte pueden ajustar dichos componentes y en consecuencia mejorar la alineación de la banda. A continuación, se muestra en **Ilustración 11** y **Tabla 6** a modo de ejemplificar un reporte, los datos obtenidos de esta herramienta.



*Ilustración 11: Correa Transportadora, dividida por etapas para comprobar componentes desalineados.*

*Fuente: Spinozzi.*

*Tabla 6: Componentes desalineados con sus respectivas medidas. Fuente: Spinozzi*

Número de polea	Nivel		Escuadra	
	Lado Izquierdo (cm)	Lado Derecho (cm)	Lado Izquierdo (cm)	Lado Derecho (cm)
1	0.0000	0.0000	0.125	0.000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
3	0.0000	0.0000	0.0000	1.125

4	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.500
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.000

Nota:

Para “Nivel” un número positivo significa cuál lado es más alto.

Para: “Escuadra” un número positivo indica cuál lado está más hacia adelante.

Finalmente, lograr que la correa transportadora pueda alinearse con el centro de la estructura y sus elementos, consiste en realizar ajustes a los rodillos y las condiciones de carga para así poder enmendar cualquier indicio de la banda a salirse de la trayectoria deseada. Cabe destacar, que la correa transportadora debe volver a ponerse en funcionamiento para evaluar el efecto que produjo la corrección, no obstante, se debe aguardar a que ocurran entre dos y tres revoluciones completas, para comprobar si se deben realizar nuevas correcciones (Spinozzi, 2020).

- Luego de que se encuentre alineada la banda, se continúa con el tensado de esta, lo que se logra ajustando los tornillos de tensado, por otra parte se debe comprobar que el avance en cada uno sea igual. Además la correa motriz y poleas necesitan ser inspeccionadas para comprobar que estén adecuadamente tensas y alineadas (Meza).

Por otra parte, haciendo referencia a las correas de transmisión, generar buenas prácticas a la alineación de estos sistemas de transporte continuo evita y tiene como efecto directo:

- Aumentar la vida de los rodamientos.
- Incremento en el tiempo operativo, eficacia y productividad.
- Disminuir desgaste de poleas y correas.
- Ahorros de dinero en cambio de componentes y paradas no planificadas.

Sin ir más lejos, la importancia de la alineación de correas lleva de manera consecuente a evitar o disminuir la criticidad de la segunda actividad con mayor índice en la prioridad de riesgo de las correas transportadoras.

En lo concerniente a los raspadores, se debe chequear periódicamente el nivel de desgaste que presentan a través de inspecciones visuales, con el fin de comprobar que se encuentran funcionando adecuadamente, la importancia de este componente radica en que permite el correcto funcionamiento de la cinta y de todo el transportador en general, ya que, por el contrario (mal funcionamiento), la acumulación de material produciría daños en el tambor de reenvío ocasionando por una parte daños en la carcasa de la banda y por otra la acumulación conlleva a producir desigualdades en el diámetro de dicho tambor que perjudica una actividad tan importante como es la correcta alineación de la cinta. Por estas razones, hacer un seguimiento a este componente para asegurarse de que la celda hace contacto con la cinta en la parte inferior así como también que sea capaz de cubrir el área total de la banda, se recomienda hacer pautas de inspección de forma semanal para comprobar que los raspadores se encuentran en buenas condiciones.

Para terminar, por lo que atañe a los chutes, y debido a que en este se genera atollo de mineral producido por la acumulación que crea una especie de tapón, se recomienda realizar una modificación al recubrimiento del chute para evitar que se produzca abrasión por el material depositado en este, lo que evitaría considerablemente soldar este tipo de embudo, también se recomienda evaluar si la capacidad para la que se diseñó tiene relación al uso que se le da. Por otra parte, es de utilidad crear un sistema que permita en aquellos casos en los que se podría generar un derrame por acumulación de mineral y posterior golpe a correas transportadoras afectando su composición o desalineando su estructura, una recirculación o almacenaje adicional que permita una liberación realizada por los costados del chute con el objetivo de evitar estas situaciones desfavorables o contar con un sistema de sensor que avise cuando el chute superó su capacidad máxima para evitar liberación de rocas al exterior.

En la **Tabla 7**, se expresa un resumen de lo mencionado, con actividades del tipo correctivas o preventivas, la frecuencia con la que se recomienda ser realizadas y el encargado de ejecutar estas tareas.

Tabla 7: Acciones correctivas/preventivas para correas transportadoras. Fuente: Elaboración propia.

Número	Acciones Correctivas/preventivas	Frecuencia	Encargado
1	Revisar estado polín guía	Diaria	Personal de mantenimiento
2	Verificar el movimiento de la cinta	Diaria	Personal de mantenimiento
3	Revisar el alineado de la cinta	Diaria	Personal de mantenimiento
4	Comprobar que el transportador esté nivelado a lo largo y ancho	Diaria	Personal de mantenimiento
5	Asegurarse que la correa se encuentre colocada de forma adecuada en el transportador	Diaria	Personal de mantenimiento
6	Chequear el estado tensado de la cinta	Diaria	Personal de mantenimiento
7	Verificar tornillos de tensado, comprobar que el avance en cada uno sea igual	Semanal	Personal de mantenimiento
8	Verificar que polea y correa motriz estén alineadas y tensadas	Semanal	Personal de mantenimiento
9	Revisar si existen daños en tambor de reenvío	Semanal	Personal de mantenimiento
10	Comprobar si hay desgaste en la carcasa de la banda	Semanal	Personal de mantenimiento
11	Hacer mediciones en tambor de reenvío para descartar desigualdades en diámetros	Semanal	Personal de mantenimiento
12	Inspección visual de raspadores	Diaria	Personal de mantenimiento
13	Comprobar que celda de raspador toca a la cinta en la cara inferior	Diaria	Personal de mantenimiento
14	Revisar estado de recubrimiento interno chute de traspaso	Diaria	Personal de mantenimiento
15	Verificar que material húmedo no produzca atasco en el chute	Diaria	Personal de mantenimiento

## 6. CONCLUSIONES

Según lo desarrollado en este trabajo, se logró cumplir con éxito el objetivo general que hacía referencia a la realización de un análisis de criticidad a la planta de procesos, lo que permite a Minera Paicaví comprender cuales son los equipos más críticos en el complejo minero.

Además, con respecto al levantamiento de información de los diferentes equipos que se consideraron en este estudio, fue llevado a cabo correctamente, al haber analizado el registro de fallas y acciones de mantenimiento ejecutadas diariamente en Minera Paicaví en un periodo de 13 meses comprendido entre febrero de 2020 hasta marzo de 2021. En ese sentido, se clasificaron y contabilizaron las fallas según el equipo que se veía afectado, para posteriormente generar una escala con las mayores y menores frecuencia de intervenciones, luego con el uso de las matrices de identificación del peligro y evaluación del riesgo, se concluyó cuáles eran los impactos en seguridad, por otra parte a través de entrevistas con el personal de planta y encargados de mantenimiento, se pudo determinar lo relevante que era evaluar la continuidad operacional.

Por consiguiente, en base a la información que se reunió, es decir, frecuencia de fallas o intervenciones y sus consecuencias (impacto en seguridad y continuidad operacional), se determinó que los equipos más críticos correspondieron a las correas transportadoras. Esto se debió a que una parada no planificada de este sistema de transporte continuo, perjudica de forma significativa llegando a detener el proceso productivo y retrasando la tarea que deben realizar los chancadores y molinos, ya que estos últimos dependen de la alimentación constante de las cintas, es decir, la criticidad de este activo fue debido al factor de continuidad operacional.

En efecto, ya conocido el equipo con mayor criticidad y con la utilización de los gráficos de dispersión, se pudo obtener información más en detalle de los componentes y actividades que poseían elevados tiempos medios de reparaciones y altos números de intervenciones. En base a lo anterior se pudo realizar para el equipo más crítico, recomendaciones sobre inspecciones visuales a realizar, cambios en los procedimientos con respecto al alineado y tensado e inclusive recomendaciones sobre modificaciones en los diseños de los chutes de traspaso. De esta forma, si se llevan a cabo estas recomendaciones la productividad se verá menos afectada por paradas no planificadas y las consecuencias producidas por las fallas disminuirán el

impacto sobre los componentes. Cabe mencionar que luego de implantar las nuevas tareas que se mencionaron, se hará necesario reevaluar a futuro la matriz de criticidad, dejando en claro que no debe ser un proceso estático, esto se hará para verificar si las recomendaciones generaron el efecto positivo que se espera, lo cual quedará evidenciado, si el equipo que inicialmente se encontraba un estado de alta criticidad cambia a uno de media o baja criticidad.

Por otra parte, como sugerencia se podría replicar y sería de mucha utilidad realizar este estudio para los equipos mina, específicamente aquellos que son utilizados en la extracción, el transporte y el carguío. Lo anterior permitiría comprender la criticidad asociada a cada activo de acuerdo con la cantidad de fallos de los equipos y sus consecuencias, así como también poder concluir cuales componentes son los que presentan una elevada tasa de falla y mayores tiempos de reparación, con la finalidad de poder identificar acciones de mejora y generar nuevas acciones de mantenimiento. También, una práctica favorable para ser analizada sería implementar el uso de monitoreo remoto de activos, el cual permitiría tener un enfoque mas proactivo al identificar problemas potenciales con el propósito de minimizar daños y prevenir fallas catastróficas. Sin ir más lejos, la utilización de sensores que entreguen información en tiempo real sobre la condición de los componentes permite que los encargados de mantenimiento puedan resolver de forma más rápida los imprevistos que se presenten en los equipos, así como también realizar revisiones con mayor exactitud gracias a la información que proporcionan los sensores.

Finalmente, la gente encargada de mantenimiento en base a los datos que se concluyeron tendrá el conocimiento para saber dónde deberán ser orientados y asignados en mayor cantidad los recursos humanos, económicos y tecnológicos, teniendo como referencia la criticidad, el número de fallas de los equipos, componentes y los tiempos medios para las reparaciones.

## 7. BIBLIOGRAFÍAS.

- Anón. (2019). Chancado y Molienda en minería: Paso previo hacia el material fino. *Rumbo Minero*, 136-139.
- Arata, A. (2009). *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales*. Santiago, Chile.
- Babarovich, V. (09 de Octubre de 2019). Diario Financiero. (A. Fernández, Entrevistador) Obtenido de Diario Financiero:  
<https://www.df.cl/noticias/site/artic/20191008/asocfile/20191008163141/20191009suple.pdf>
- Bestratén Belloví, M., & Orriols Ramos, R. M. (2004 ). NTP 679: Análisis modal de fallos y efectos. AMFE. *Notas Técnicas de Prevención*, 4-10.
- Canihuante, P. T. (s.f.). Análisis de Criticidad a equipos de Apoyo de Operación Mina en Compañía Minera Candelaria Lunding Mining. *Tesis para Título Profesional de Ingeniero en Ejecución en Mecánica de Procesos y Mantenimiento Industrial*. Universidad Técnica Federico Santa María, Concepción.
- Cárcamo, H. (2003). *Operaciones Mecánicas*. Antofagasta.
- Castillo, H. S. (2016). Identificar la criticidad de equipos para mejorar el circuito molienda en la planta concentradora vía Minera Antamina. *Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Mecánico*. Universidad Nacional del Centro de Perú, Huancayo, Perú.
- Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation. (2008). *Análisis de Modos y Efectos de Fallas Potenciales*.
- Furlanetto, L., & Arata Andreani, A. (2005). *Manual de Gestión de Activos y Mantenimiento*. Santiago: RIL Editores.
- Garrido, S. G. (2003). *Organización y gestión integral del mantenimiento* . Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S. A.

- Gattas Beher, F., & Rivas Saldaña, F. (2020). *Reporte Técnico Proyecto Chépica Minera Paicavi S.A.*
- ISO 55000:2014 *Gestión de Activos - Aspectos generales, principios y terminología.* (2014). Obtenido de ISO: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:55000:ed-1:v2:es>
- Knights, P. F. (2004). Downtime Priorities, Jack-Knife Diagrams and the Business Cycle. *Maintenance Journal*, 17(2), 14-21.
- Mendoza, R. H. (2000). El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional. *Ingeniería Mecánica*, 4, 13-19.
- Meza, C. F. (s.f.). Proposición de un plan de mantenimiento de sistemas de correas transportadoras. *Proposición de un plan de mantenimiento de sistemas de correas transportadoras*. Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. Madrid.
- Muchiri, P., Pintelon, L., Gelders, L., & Martin, H. (2010). Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. *International Journal of Production Economics*.
- Palencia, O. G. (2006). La Confiabilidad Humana en la Gestión del Mantenimiento. *Noria*.
- Parra, C., & Crespo, A. (2012). *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos*. Sevilla: INGEMAN.
- Provedano, G. D. (11 de Enero de 2021). *Terotecnic*. Obtenido de Terotecnic Ingeniería : <https://terotecnic.com/ingenieria/iso-55000-todo-lo-que-tiene-que-saber-al-respecto/>
- Romero, J. (2013). Análisis de criticidad y estudio RCM del equipo de máxima criticidad de una planta desmotadora de algodón. (*Tesis de licenciatura*). Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla. Recuperado el 30 de Octubre de 2020, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5311>
- Spinozzi, D. (17 de Julio de 2020). *Spinozzi*. Obtenido de Spinozzi Argentina: <https://www.spinozziargentina.com/post/como-controlar-la-alineaci%C3%B3n-de-una-banda-transportadora>

Universidad de Chile. (s.f.). *UChile*. Obtenido de [https://www.uchile.cl/documentos/carta-gantt-concurso-de-tesis-2011-2012\\_67264\\_1.doc](https://www.uchile.cl/documentos/carta-gantt-concurso-de-tesis-2011-2012_67264_1.doc)

Viveros Gunckel, P., & Mena Bustos, R. (s.f.). Análisis RAM-RBD.

Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barbera, L., & Crespo, A. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Revista Chilena de Ingeniería*, 125-138.

Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barbera, L., & Crespo, A. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 125-138.

Weber, A., & Thomas, R. (2006). Key Performance Indicators: Measuring & Managing the Maintenance Function. Ivra Corporation.

## 8. ANEXOS

Tabla 8: Formato de Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos. Fuente: Minera Paicaví.

UNIDAD DE NEGOCIO:		Elaborado por:		Aprobado por:		Fecha de Elaboración:		Fecha de Revisión:							
Minera Paicaví S.A.		Gustavo Olivares C.		Gustavo Olivares C.		10-10-2019		10-10-2019							
Área: Mina, Planta y Laboratorio químico		Proceso: Extracción y procesamiento de minerales													
Identificación de Peligros				Evaluación de Riesgo				Controles							
N°	Tarea	Tipo Tarea Rutinario (R) No Rutinario (NR)	Riesgos	Lesión o Enfermedad (L) o (E)	Daño o Consecuencia	Evaluación de Riesgo Inicial				Medidas de Control Actual	Evaluación de Riesgo Residual				Cuerpo Legal Aplicable
						Probabilidad (P)	Gravedad (G)	Magnitud del riesgo Inicial (MR=P x G)	Tolerancia (NA / A)		Probabilidad (P)	Gravedad (G)	Magnitud del Riesgo Inicial MR=P x G	Tolerancia (NA / A)	
ACEN° 1: N°.1.		Personal (Directo o Indirecto):													

Tabla 9: Responsable de Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos. Fuente: Minera Paicaví.

<b>Realizador Por</b>	Gustavo Olivares Cuadrado	<b>Revisado por</b>		<b>Aprobado</b>	
<b>Firma</b>		<b>Firma</b>		<b>Firma</b>	
<b>Fecha</b>	10-10-2019	<b>Fecha</b>	10-10-2019	<b>Fecha</b>	10-10-2019
<b>Cargo</b>	Prevención de Riesgos	<b>Cargo</b>	Gerente de Operaciones	<b>Cargo</b>	Gerente General

Tabla 10: Probabilidad de que ocurra una actividad peligrosa y/o riesgosa. Fuente: Minera Paicaví.

Muy difícil que ocurra. De presentarse podría ser una vez cada 10 años o más	<b>No Critico 1</b>
Ha ocurrido una vez cada 1 en 5 años / Puede ocurrir alguna vez	<b>Levemente Critico 2</b>
Ha ocurrido más de una vez cada 2 a 4 años / Puede esperarse que ocurra regularmente.	<b>Critico 3</b>
Alta posibilidad de ocurrencia; podría presentarse al menos una o varias veces en un año / Ocurrirá la mayor parte de las veces	<b>Altamente Critico 4</b>

Tabla 11: Consecuencia producida por una actividad peligrosa y/o riesgosa. Fuente: Minera Paicavi.

Incidentes o Cuasi Pérdida. Persona aparentemente sana	<b>No Crítico 1</b>
<b>Seguridad:</b> Lesión(es) Leves(s) (Acc. STP), daños materiales mínimos que no alterarían el normal funcionamiento.	<b>Levemente Crítico 2</b>
<b>Seguridad:</b> Lesión(es) incapacitante(s) temporal(es) (Acc. CTP), fallas operacionales, daños materiales parciales que se pueden reparar.	<b>Crítico 3</b>
<b>Seguridad:</b> Pérdida de vida de un trabajador o incapacidad permanente, falla operacional alta, daños materiales de alto costo o de mucho tiempo de reparación.	<b>Altamente Crítico 4</b>

Tabla 12: Mapa de Criticidad asociado a las consecuencias y probabilidades de actividades peligrosas y/o riesgosas. Fuente: Minera Paicavi.

<b>CONSECUENCIA</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>
	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>12</b>
	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>
	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>PROBABILIDAD</b>					

Donde:

Color Verde: Representa una baja criticidad.

Color Amarillo: Indica una media criticidad.

Color Rojo: Significa una alta criticidad.

Tabla 13 : Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos, Equipo: Celdas de Flotación.  
Fuente: Minera Paicavi.

 <b>Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos.</b>															
UNIDAD DE NEGOCIO:		Elaborado por:		Aprobado por:		Fecha de Emisión:		Fecha de Revisión:		Proceso:					
						13-12-2018		13-12-2018							
N°	Tarea	Riesgos	Lesión o Enfermedad (L) o Efecto Operación al FO	Daño o Consecuencia	Evaluación de Riesgo Inicial			Medidas de Control Actual	Evaluación de Riesgo Residual			Medidas de Control a Implementar	Medidas de Control a Implementar	Corporación Legal Aplicable	
					Probabilidad (P)	Gravedad (G)	Magnitud Inicial (ME-P x G)		Tolerancia (NA/A)	Probabilidad (P)	Gravedad (G)				Magnitud Residual (MR-P x G)
Act N° 1		Personal (Directo o Indirecto): Caída Distinto nivel Atrapamiento Caída de material al interior de equipo electrocución	L L L FO	LESIONES GRAVES O LEVES SELIN ALTILO de esmeraldas controladas o graves. daño al equipo Supresiones lesiones leves o graves.	3 3 3 3	3 3 3 3	9 9 9 9	NA NA NA NA							
	Celdas de flotación						0 0 0 0	NA NA NA NA							







Tabla 17: Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos. Equipo: Parilla Seleccionadora.  
Fuente: Minera Paicavi.

 <b>Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos.</b>																			
UNIDAD DE NEGOCIO:		Elaborado por:		Aprobado por:		Fecha de Elaboración:		Fecha de Revisión:											
Año:		Proceso:																	
N°	Tarea	Identificación de Peligros		Lesión o Enfermedad (U) o E (Falla Operación al TO)	Dato o Consecuencia	Evaluación de Riesgo Inicial			Evaluación de Riesgo			Evaluación de Riesgo Residual			Medidas de Control a Implementar	Jerarquización de Peligros y Medidas de Control	Cuerpo Legal Aplicable		
		Tipo Tarea	Riesgos			Probabilidad (P)	Gravedad (G)	Magnitud del riesgo Inicial (P x G)	Medidas de Control	Probabilidad (P)	Gravedad (G)	Magnitud del Riesgo Residual (P x G)	Tolerancia (NA/A)						
ACT.N°1: N°1.	Parilla seleccionadora de Rocas mineralizadas		Personal (Directo o Indirecto):																
			Caida de equipo dentro de capacho	L	LESIONES GRAVES AL OPERADOR, PARALIZACION	3	3	9	NA										
			Atrapamiento de rocas en parrilla	L	Muerte de personas al realizar trabajo de retiro material	3	4	12	NA										
			Rocas que caen fuera del capacho o parrilla	L	Proyección de rocas a trabajadores, equipo o lugares de trabajo	3	3	9	NA										
			Exposición al Polvo	E	Silicosis	2	3	6	NA										
			Exposición a Ruido	E	Stress Auditivo o pérdida de audición	2	3	6	NA										
			Golpeado por	L	Lesión que puede sufrir algún trabajador	2	3	6	NA										
			Atrapamiento	L	Atrapamiento o lesión grave al algún trabajador	2	3	6	NA										
			Atropellamiento	L	Lesión grave al trabajador al posicionado el camión para botar carga	3	3	9	NA										
									0	NA									
								0	NA										
								0	NA										
								0	NA										

Tabla 18: Un resumen de los principales indicadores de rendimiento para el proceso de mantenimiento. Fuente: (Weber & Thomas, 2006).

Categoría	Medida/Indicador	Unidades	Descripción	Metas recomendadas
Identificación del trabajo	Porcentaje de trabajo proactivo	%	Horas hombre previstas para trabajo proactivo / Horas hombre totales disponibles	75%-80%
	Porcentaje de trabajo reactivo	%	Horas hombre usadas para trabajo reactivo / Horas hombre total disponibles	10%-15%
	Porcentaje de trabajo improvisado	%	Horas hombre utilizadas para mejoras y modificaciones / Horas hombre totales disponibles	5%-10%
	Tasa de respuestas a solicitudes de trabajo	%	Solicitudes de trabajo que permanecen en estado "solicitud" durante <5 días / Total de solicitudes de trabajo	80% de solicitud
Planificación del trabajo	Intensidad de planificación/tasa	%	Trabajo planificado / total de trabajos hechos	95% de todas las ordenes de trabajo
	Calidad de planificación	%	Porcentaje de órdenes de trabajo que requieren reelaboración debido a la planificación / Todos las ordenes de trabajo	<3% de todas las ordenes de trabajo
	Capacidad de respuesta planificada	%	Porcentaje de ordenes de trabajo en estado de planificación durante <5 días / Todas las ordenes de trabajo	>80% de todas las ordenes de trabajo

Programación del trabajo	Intensidad de programación	%	Horas hombre programadas / Horas hombre totales disponibles	>80% de horas hombre disponibles
	Calidad de programación	%	Porcentaje de ordenes de trabajo con ejecución retrasada debido a materiales o a mano de obra	<2%
	Tasa de realización programada	%	Ordenes de trabajo con fecha programada anterior o igual a la fecha de finalización / Todas las ordenes de trabajo	>95% de las ordenes de trabajo
Ejecución del trabajo	Cumplimiento de programación	%	Porcentaje de órdenes de trabajo completadas en el período programado antes de la fecha de finalización	>90%
	Tiempo promedio para reparar (MTTR)	Horas	Inactividad total / número de fallas	
	Tasa de utilización de mano de obra	%	Total de horas usadas en tareas / horas disponibles	>80%
	Eficiencia de mano de obra	%	Tiempo asignado para tareas / tiempo usado en tareas	
	Rotación de ordenes de trabajo	%	Número de tareas completadas / número de tareas recibidas	
	Cantidad de trabajos atrasados	%	Número de tareas atrasadas / número de tareas recibidas	

	Calidad de ejecución (rehacer)	%	Porcentaje de trabajo de mantenencias requeridas para rehacer	<3 %
--	--------------------------------	---	---	------

Tabla 19: Resumen de indicadores de rendimiento de mantenimiento atrasados. Fuente: (Muchiri, Pintelon, Gelders, & Martin, 2010)

Categoría	Medida/Indicador	Unidades	Descripción
Medidas de rendimiento del equipo	Número de fallas	Números	Número de averías clasificadas por sus consecuencias: operativas, no operativas, seguridad, etc.
	Fallas / Frecuencia de averías	Números/ unidad de tiempo	Número de averías por unidad de tiempo (una medida de confiabilidad)
	MTBF	horas	Tiempo medio entre fallos (una medida de confiabilidad)
	Disponibilidad	%	$MTBF/(MTBF+MTTR) = (\text{tiempo de funcionamiento} / (\text{tiempo de funcionamiento} + \text{inactividad}))$
	Eficacia global de equipos productivos (OEE)	%	Disponibilidad* tasa de rendimiento* tasa de calidad

Tabla 20: Cantidad de fallas y Tiempos medios para reparar, Equipo: Chancador. Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Chancador	X	Y
Modo de falla	Fallas	Total de fallas	MTTR (horas)
MF1	Soldar refuerzo chute alimentación chancador cono terciario.	4	3
MF2	Reparar uniones sueltas por pérdida de aceite.	1	2
MF3	Cambiar muela a chancador de mandíbula.	6	1
MF4	Soldar buzón alimentación chancador de mandíbula.	1	24

MF5	Soldar buzón chancador terciario.	1	12
MF6	Soldar protecciones machón chancador secundario y terciario.	1	2
MF7	Reapretar placas chancador mandíbulas.	1	1
MF8	Cambio de graseras.	1	0.16
MF9	Ajustar chancador (aumentar o disminuir su abertura).	2	0.25
MF10	Destrabar chancador.	1	12
	Promedio.	1.9	5.741

Tabla 21: Cantidad de fallas y Tiempos medios para reparar, Equipo: Correas Transportadoras.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Correas Transportadora	X	Y
Modo de Falla	Fallas más comunes.	Total de fallas	MTTR (horas)
MF1	Cambiar contactos a correas.	1	0.50
MF2	Cambiar correas de transmisión.	4	0.33
MF3	Montar correas.	6	0.17
MF4	Soldar polín guía.	1	0.33
MF5	Soldar protección a correa.	3	0.11
MF6	Alinear correas.	6	0.50
MF7	Cambio de polea cinta transportadora.	1	0.33
MF8	colocar polines vela.	5	0.50
MF9	soldar tensador.	3	0.33
MF10	colocar raspadores.	3	2.00
MF11	cambio de correas por corte.	1	0.17

MF12	tensar correas.	10	0.08
MF13	cambiar rodamientos de las cintas.	2	2.00
MF14	soldar chutes cintas.	1	1.00
	Promedio.	3.36	0.60

Tabla 22: Cantidad de fallas y Tiempos medios para reparar, Equipo: Celdas de Flotación. Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Celdas de flotación	X	Y
Modo de Falla	Fallas más comunes	Total de fallas	MTTR (horas)
MF1	Reparar con soldadura eje paleteros celdas Dember.	1	2.00
MF2	Reparar compuerta celda Dember.	4	1.00
MF4	Realizar trabajos eléctricos celdas flotación en paleteros.	1	1.00
MF5	Reparar problema de polea en motor celda.	2	0.50
MF6	Cambiar impulsor en celda N°2.	2	3.00
MF7	Problemas con difusor, pernos cortados.	4	1.00
MF8	Vaciar celdas.	3	0.17
MF9	Soldar paleteros.	10	0.75
MF10	Parchar celda Dember.	1	4.00
MF11	reemplazo de tubo en celda Dember.	2	3.00
MF12	reparar celda.	15	3.00
	Promedio.	4	1.77

Tabla 23: Cantidad de fallas y Tiempos medios para Reparar, Equipo: Molinos. Fuente: Elaboración propia.

		X	Y
Modos de falla	Fallas más comunes	Total de fallas	MTTR
MF1	Cambiar conexión partidor suave	5.00	0.20
MF2	Soldar parche codo molino	1.00	0.50
MF3	Falla en tablero de molino	2.00	1.00
MF4	Soldar codo Molino	23.00	0.09
MF5	Soldar cilindro molino	1.00	0.50
MF6	Destapar codo molino bloqueado con bolas	1.00	0.50
MF7	Reparar fuga en la caja de descarga	1.00	1.00
MF8	Apretar pernos de la coraza del molino	1.00	1.00
MF9	Reparar malla de la caja del molino N°2	2.00	0.50
MF10	Reparar compuerta de alimentación molino N°3	1.00	0.67
MF11	Reparar parada de seguridad del molino N°1	1.00	1.00
MF12	Reparar caja molino	1.00	1.50
MF13	Soldar tubo alimentación del molino	2.00	0.50
MF14	Cambiar distes molino	6.00	8.00
MF15	Soldar protección corona molino N°2	1.00	1.00
MF16	Cambiar goma empaquetadura	1.00	2.00
MF17	Reparar tubo que se acopla al molino por desgaste	1.00	4.00
MF18	Reemplazar corazas del molino	1.00	48.00
MF19	Soldar platina en compuerta para regular carga del molino	1.00	1.00

MF20	Cambio de gomas y pernos molino N°3	1.00	3.00
	Promedio	2.70	3.80

Tabla 24: Aplicación de Análisis modal de fallos y efectos, Correas transportadoras. Fuente: Elaboración propia.

Componente/Ítem	Función	Modo de falla	Efecto de falla	G	F	D	IPR
Raspadores	Sistema de limpieza de la cinta.	La cinta se encuentra muy abierta.	Funcionamiento incorrecto de la cinta.	2	4	5	40
Chutes	Sistema de traspaso que permite guiar el material a la correa transportadora.	Se traba porque existe material húmedo.	Acumulación de material. Detiene alimentación de la correa.	8	2	2	32
Tensado	Evitar el resbalamiento entre la cinta y el tambor de accionamiento.	Cinta se despega. Tambor no se encuentra alineado	Pérdidas de mineral.	2	10	2	40
Alineación	Permitir marcha correcta de la cinta, sin que la misma salga de su curso.	Impacto por choque. Hundimiento en el centro de la cinta. Mal procedimiento de Alineación.	Traslado brusco. Pérdidas de mineral.	2	6	2	24

Polines	Lograr que la carga se deslice.	Cinta desalineada.	Marcha incorrecta de la cinta.	8	5	3	120
---------	---------------------------------	--------------------	--------------------------------	---	---	---	-----