

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**TESIS**

**“IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO  
CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD PARA AUMENTAR LA  
DISPONIBILIDAD DEL EQUIPO MAS CRITICO DEL ÁREA DE  
MOLIENDA DE MINERAL DE BAJA LEY”**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico Electricista

Elaborado por

Pier Carlo Santy Cabrera

 [0009-0009-7107-3606](https://orcid.org/0009-0009-7107-3606)

Asesor

MSc. Jorge Vera Ermitaño

 [0000-0002-2887-1348](https://orcid.org/0000-0002-2887-1348)

LIMA – PERÚ

2023

***Dedicatoria***

*A mis padres Carlos y Lucía, hermanos y mi esposa Angie, por el enorme aliento y apoyo.*

## **Agradecimientos**

Agradezco a mis profesores de la facultad, asesor, especialista y presidente por transmitir en cada clase su gran conocimiento y experiencia que será muy útil en mi etapa profesional.

## **RESUMEN**

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo incrementar la disponibilidad del área de molienda de mineral de baja ley mediante la aplicación de la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad. El tipo de investigación es cuantitativo, dado que la variable en estudio se obtiene a partir de evaluar mediante indicadores de desempeño de tiempos de falla y reparación. Los datos de estudio son del tipo documentada, pues se utilizan reportes, datos de intervenciones registrados en el software de gestión de mantenimiento, actas de reuniones, manual de operación y mantenimiento del fabricante.

Mediante la aplicación de la metodología, se determina que el equipo de mayor criticidad es la zaranda húmeda, se describe las funciones del equipo, se determina todas las posibles fallas y se analiza la criticidad mediante el impacto de las consecuencias en la producción, calidad, seguridad, medio ambiente que son parte fundamental de la compañía, se obtienen los diversos planes de mantenimiento que complementan a los planes del área, y se evaluaron los tiempos medios de falla, reparación, horas programadas y reales, se apreció que la disponibilidad promedio de las diversas líneas antes de la aplicación con un valor promedio de 79.42% y posterior a la aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad con un valor de 85.52% manifestándose un incremento de la disponibilidad.

Palabras clave: Activos, disponibilidad, mantenimiento preventivo, mantenimiento proactivo, análisis de fallas, funciones, análisis de criticidad.

## **ABSTRACT**

The objective of this research work is to increase the availability of the low-grade ore grinding area through the application of the maintenance methodology focused on reliability. The type of research is quantitative, since the variable under study is obtained by evaluating performance indicators of failure and repair times. The study data is of the documented type, since reports, intervention data recorded in the maintenance management software, meeting minutes, and the manufacturer's operation and maintenance manual are used.

Through the application of the methodology, it is determined that the most critical equipment is the wet screen, the functions of the equipment are described, all possible failures are determined and the criticality is analyzed through the impact of the consequences on production, quality, safety, environment that are a fundamental part of the company, the various maintenance plans that complement the area plans were obtained, and the average times of failure, repair, scheduled and real hours were evaluated, it was appreciated that the average availability of the various lines before the application with an average value of 79.42% and after the application of maintenance focused on reliability with a value of 85.52%, showing an increase in availability.

**Keywords:** Assets, availability, preventive maintenance, proactive maintenance, failure analysis, functions, criticality analysis.

# INDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE TABLAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>CAPITULO I. ASPECTOS METODOLÓGICOS DE LA TESIS</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Problemática de los equipos del área de molienda de una planta de procesamiento de mineral</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Problema específico de la investigación</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Objetivo de la tesis</b> .....	<b>3</b>
1.3.1 Objetivo General .....	3
<b>1.4 Hipótesis</b> .....	<b>4</b>
1.4.1 Hipótesis general .....	4
1.4.2 Hipótesis específicas .....	4
<b>1.5 Metodología</b> .....	<b>4</b>
1.5.1 Análisis de la información.....	4
1.5.2 Tipo y diseño de la investigación .....	10
1.5.3 Unidad de análisis.....	10
1.5.4 Variables e indicadores.....	11
1.5.4.1 Variable independiente.....	11
1.5.4.2 Variable dependiente .....	11
1.5.4.3 Indicadores de variable dependiente.....	11
1.5.5 Operacionalización de variables.....	12
1.5.6 Matriz de consistencia .....	13
<b>CAPITULO II FUNDAMENTOS TECNICOS Y DE INGENIERIA</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1 Definiciones y conceptos generales</b> .....	<b>14</b>
2.1.1 Definiciones del mantenimiento.....	14
2.1.2 Estrategias de mantenimiento.....	14
<b>2.2 Costos y productividad en mantenimiento</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3 Análisis y diagnóstico del área de mantenimiento</b> .....	<b>18</b>
<b>2.4 Mantenimiento centrado en la confiabilidad</b> .....	<b>19</b>
2.4.1 Norma SAE JA 1011 “Criterios de Evaluación para el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad” .....	20
2.4.2 Numero de prioridad de riesgo .....	26
<b>2.5 Análisis RAM confiabilidad (R), disponibilidad (A) y mantenibilidad (M)</b> .....	<b>29</b>
<b>2.6 Método para identificar el equipo de mayor criticidad del área de molienda</b> .....	<b>30</b>
2.6.1 Elementos para determinación de la criticidad.....	31
2.6.2 Evaluación de la criticidad basado en el riesgo .....	31
2.6.3 La zaranda húmeda.....	32

<b><i>CAPITULO III DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....</i></b>	<b>36</b>
3.1 Descripción del problema .....	36
3.2 Identificación de equipos críticos .....	37
3.3 Sistemas de la zaranda húmeda .....	42
3.4 Análisis modos y efectos de fallas .....	44
3.5 Determinación de las tareas de mantenimiento mediante el diagrama de decisión .....	55
3.5.1 Análisis de consecuencia y determinación de las tareas de mantenimiento .....	55
3.6 Planes de mantenimiento identificadas.....	64
3.6.1 Planes de mantenimiento basado en tarea a condición .....	64
3.6.2 Planes de mantenimiento mediante reacondicionamiento cíclico .....	66
3.6.3 Planes de mantenimiento mediante sustitución cíclica.....	67
3.6.4 Plan de Proyectos de evaluación y rediseño de tareas de mantenimiento .....	68
3.7 Análisis de costos de los planes de mantenimiento .....	70
3.7.1 Costo del plan de mantenimiento mediante Tarea a condición.....	70
3.7.2 Costo del plan de mantenimiento mediante reacondicionamiento cíclico .....	72
3.7.3 Costo del plan de mantenimiento mediante sustitución cíclica .....	73
3.7.4 Costo del proyecto de evaluación y rediseño de tarea de mantenimiento .....	74
<b><i>CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</i></b>	<b>76</b>
4.1 Criterios utilizados .....	76
4.2 Cálculo de indicadores de mantenimiento.....	76
4.3 Análisis económico de la implementación del RCM.....	78
4.4 Discusión.....	82
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>83</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>84</b>
<b>REFERENCIA BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>85</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Diagrama de flujo del área de Molienda.....	11
<b>Figura 2:</b> Polígono de productividad de mantenimiento .....	18
<b>Figura 3:</b> Matriz de criticidad .....	32
<b>Figura 4:</b> Partes principales de la zaranda húmeda.....	33
<b>Figura 5:</b> Principio de funcionamiento mediante clasificación .....	35
<b>Figura 6:</b> Gráfica de Pareto de los tipos causas de falla.....	37
<b>Figura 7:</b> Sistemas principales zaranda húmeda .....	42

## ÍNDICE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Operacionalización de variables .....	12
<b>Tabla 2:</b> Matriz de consistencia.....	13
<b>Tabla 3:</b> Rango de gravedad del modo de falla.....	27
<b>Tabla 4:</b> Rango de ocurrencia del modo de falla.....	28
<b>Tabla 5:</b> Rango de detectabilidad del modo de falla .....	28
<b>Tabla 6:</b> Valores del NPR y clasificación .....	29
<b>Tabla 7:</b> Criterios para evaluación de criticidad.....	31
<b>Tabla 8:</b> Tipo de criticidad y rangos.....	32
<b>Tabla 9:</b> Causas de fallas de equipos de molienda .....	36
<b>Tabla 10:</b> Equipos del área de molienda .....	38
<b>Tabla 11:</b> Análisis de criticidad de los equipos de la línea de molienda .....	39
<b>Tabla 12:</b> Disponibilidad de equipos de mayor criticidad de la línea de molienda .....	40
<b>Tabla 13:</b> Reporte horas programadas y disponibilidad de zarandas húmedas 11/12/13/14 antes del RCM .....	41
<b>Tabla 14:</b> Lista de partes de la zaranda húmeda.....	42
<b>Tabla 15:</b> Especificaciones técnicas de la zaranda húmeda.....	43
<b>Tabla 16:</b> Lista de zarandas húmedas de las líneas de molienda .....	43
<b>Tabla 17:</b> Análisis de modo y efecto de falla del sistema de accionamiento.....	44
<b>Tabla 18:</b> Análisis de modo y efecto de falla del sistema de excitadores .....	45
<b>Tabla 19:</b> Análisis de modo y efecto del sistema deck .....	46
<b>Tabla 20:</b> Análisis de modo y efecto del sistema de rocío de agua .....	47
<b>Tabla 21:</b> Análisis de modo y efecto del sistema hidráulico .....	48
<b>Tabla 22:</b> Análisis de modo y efecto del sistema de traslación .....	49
<b>Tabla 23:</b> Análisis de modo y efecto del sistema de resortes .....	50
<b>Tabla 24:</b> Análisis de modo y efecto del sistema estructural y placas.....	51
<b>Tabla 25:</b> Análisis de modo y efecto del sistema de descarga.....	51
<b>Tabla 26:</b> Análisis de modo y efecto del sistema eléctrico .....	52
<b>Tabla 27:</b> Análisis de modo y efecto del sistema de instrumentación .....	53
<b>Tabla 28:</b> Hoja de decisión del RCM del sistema de accionamiento .....	57
<b>Tabla 29:</b> Hoja de decisión del RCM del sistema de excitadores .....	58
<b>Tabla 30:</b> Hoja de decisión del RCM del sistema de paneles deck .....	59
<b>Tabla 31:</b> Hoja de decisión del RCM del sistema de rocío.....	59
<b>Tabla 32:</b> Hoja de decisión del RCM del sistema hidráulico .....	60
<b>Tabla 33:</b> Hoja de decisión del RCM del sistema de traslación.....	61
<b>Tabla 34:</b> Hoja de decisión del RCM del sistema de resortes .....	61
<b>Tabla 35:</b> Hoja de decisión del RCM del sistema estructural y placas.....	62
<b>Tabla 36:</b> Hoja de decisión del RCM del sistema de descarga .....	62
<b>Tabla 37:</b> Hoja de decisión del RCM del sistema eléctrico .....	63
<b>Tabla 38:</b> Hoja de decisión del RCM del sistema de instrumentación.....	63
<b>Tabla 39:</b> Plan de mantenimiento basado en tarea a condición.....	64
<b>Tabla 40:</b> Plan de mantenimiento mediante reacondicionamiento cíclico .....	66
<b>Tabla 41:</b> Plan de mantenimiento mediante sustitución cíclica .....	67
<b>Tabla 42:</b> Proyectos de evaluación y rediseño de tareas de mantenimiento .....	68
<b>Tabla 43:</b> Costo del plan de mantenimiento mediante tarea a condición.....	70
<b>Tabla 44:</b> Costo del plan de mantenimiento mediante reacondicionamiento cíclico .....	72
<b>Tabla 45:</b> Costo del plan de mantenimiento mediante sustitución cíclica.....	73
<b>Tabla 46:</b> Costo del proyecto de evaluación y rediseño de tarea de mantenimiento .....	74
<b>Tabla 47:</b> Costo de planes de mantenimiento .....	75
<b>Tabla 48:</b> Reporte horas programadas y disponibilidad de zarandas húmedas 11-12-13-14 después del RCM .....	77
<b>Tabla 49:</b> Total de horas por incremento de disponibilidad.....	78
<b>Tabla 50:</b> Resumen disponibilidad de las líneas antes y después del RCM .....	78
<b>Tabla 51:</b> Costo implementación del RCM.....	79
<b>Tabla 52:</b> Costo de oportunidad de producción .....	79
<b>Tabla 53:</b> Costo Mejorado PM y CM Anual.....	79
<b>Tabla 54:</b> Flujo económico anual del proyecto RCM.....	81

## CAPITULO I. ASPECTOS METODOLÓGICOS DE LA TESIS

### 1.1 Problemática de los equipos del área de molienda de una planta de procesamiento de mineral

Las compañías de procesamiento de mineral, en el contexto actual se enfrentan cada vez a retos más complejos y a una constante variación de precios de los minerales y al incremento de precio de sus insumos, que afecta directamente a sus costos operativos, sumado a ello la baja eficiencia de las líneas de producción por detenciones y fallas de los equipos, causa que muchas compañías no alcancen los niveles y objetivos planteados, ante ello se requiere que las maquinarias alcancen mayores niveles y largos periodos de producción de acuerdo a las metas planteadas por la compañía.

Debido a esto, es importante la aplicación de estrategias de mantenimiento que brinden una alta confiabilidad a los equipos, en la actualidad se disponen de diversas estrategias, en tal sentido el mantenimiento centrado en la confiabilidad es una estrategia que ha logrado altos niveles de disponibilidad de las maquinarias en diversos sectores de la industria.

El presente trabajo de investigación se centra en la aplicación de la metodología para un equipo de una línea de procesamiento de mineral de una compañía minera, mediante la aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, se pretende aumentar la disponibilidad de una zaranda húmeda en una planta concentradora, para ello la metodología recomienda la aplicación de una secuencia de pasos y técnicas que nos permitirán analizar las funciones, fallas, causas y efectos que presentan sus componentes, determinar cuáles son las que causan un mayor impacto y prestar mayor atención a ella, es decir concentrar los mayores recursos en tareas que permitan mitigar dichas fallas.

## 1.2. Problema específico de la investigación

En la actualidad han surgido diversas estrategias de mantenimiento, muchas de ellas han mostrado excelentes resultados en su ámbito de aplicación. Diversas compañías concentran sus esfuerzos en la aplicación de dichas técnicas mediante la capacitación de su personal, adquisición de equipamiento para la detección temprana de anomalías en los equipos, implementación de programas informáticos de gestión, sin embargo no logran alcanzar los objetivos deseados de disponibilidad de la maquinaria, o se acercan a ello pero con altos costes de mantenimiento por aplicación de los recursos mencionados y elevadas horas hombre, haciendo no viable la estrategia de mantenimiento adoptada, esto causa que muchas veces se retome a la estrategia inicial porque no se tiene el respaldo de la dirección de la compañía para continuar con dichas estrategias por los resultados no deseados.

Se encontró que diversas estrategias adoptadas no se adaptan al tipo de industria, equipamiento y componentes, además de ello la aplicación de la estrategia no logro implementarse correctamente, dado que alguna de las veces no se tiene el compromiso de las diversas áreas para su implementación o no se tiene un procedimiento de dicha implementación, mucho más aún no se aplica a la maquinaria o componente que genera mayor número fallas o pérdidas económicas a la compañía. Ante ello el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) ha demostrado excelentes resultados en su aplicación, y es que la ventaja de dicha metodología es su enfoque sistemático y secuencial, y sus resultados se centran en determinar cuáles son las funciones de los equipos y componentes, determinando así los de mayor criticidad del proceso, y cuáles son sus fallas y las tareas de mantenimiento que deben realizar asociadas a dichos equipos y componentes para mantener su funcionalidad.

Con ello, se concentran los mayores esfuerzos en los equipos y componentes que causen una mayor afectación a la disponibilidad, seguridad y medio ambiente logrando así los objetivos de la compañía.

La compañía minera del presente estudio, ha logrado una alta eficiencia en sus diversas áreas de operación, sin embargo en la línea de producción del área de molienda de la planta concentradora ha detectado fallas constantes en diversos equipos, y a pesar que se tienen diversas líneas de producción, los objetivos de producción para dichas líneas no son los esperados, con alta cantidad de horas de parada acumuladas mensualmente, mantenimientos no planificados, mucho más aun comprometiendo a la alimentación de los siguientes equipos de la línea, dado que por ser parte del circuito no se tenga los insumos para el siguiente proceso, y se paralice dicha línea, todo ello afecta económicamente a la compañía y los objetivos de producción de la planta.

### 1.3. Objetivo de la tesis

#### 1.3.1 Objetivo General

Implementar un plan de mantenimiento basado en el mantenimiento centrado en la confiabilidad para aumentar la disponibilidad del área de molienda de mineral de baja ley.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

Identificar y analizar los modos y efectos de fallas del equipo de mayor criticidad del área de molienda.

Determinar las tareas y acciones a tomar a partir de la aplicación del RCM para optimizar el plan de mantenimiento.

Calcular y analizar la disponibilidad del equipo de mayor criticidad de las diversas líneas del área de molienda.

Evaluar económicamente la ejecución de las diversas tareas del plan de mantenimiento basado en el RCM ejecutado en el equipo de mayor criticidad del área de molienda.

#### 1.4. Hipótesis

##### 1.4.1 Hipótesis general

Con la aplicación del plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad se aumentará la disponibilidad del área de molienda de mineral de baja ley.

##### 1.4.2 Hipótesis específicas

Con la identificación y análisis de los modos y efectos de fallas se permitirá proponer un plan de mantenimiento basado en RCM para aumentar disponibilidad del equipo de mayor criticidad del área de molienda.

Con el cálculo y análisis de la disponibilidad del equipo de mayor criticidad de las diversas líneas del área de molienda se propondrá un plan de mantenimiento basado en el RCM.

Con la determinación de las tareas y acciones que se aplicaran a partir de la utilización del RCM aumentara la disponibilidad del área de molienda.

Mediante la evaluación del costo de las tareas de mantenimiento se permitirá gestionar los recursos para la ejecución de tareas propuestas.

#### 1.5. Metodología

##### 1.5.1 Análisis de la información

##### 1.5.1.1 Antecedentes Internacionales

**Rattanakunuprakarn, S. (2020)** en sus tesis de maestría “Implementación de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) en Railway Trucks” [6]

estableció como objetivo proveer los conocimientos de la metodología RCM a un sistema ferroviario, estudiar la estrategia óptima de mantenimiento para abordar los problemas ferroviarios. El autor realiza una revisión exhaustiva de los enfoques de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) al transporte ferroviario, sus resultados, análisis y resumen de los beneficios y limitaciones del método aplicado en el transporte ferroviario de EEUU. Se propone recomendaciones para la mejora del plan de mantenimiento y la metodología RCM. Para los análisis de las funciones, modos de falla y efectos mediante el FMECA se indica que, para reducir el tiempo dedicado al análisis, se recomienda el uso del diagrama de árbol para determinar funciones significativas y funciones no significativas y resalta la importancia de analizar las funciones significativas y son las funciones cuyas fallas afectan negativamente la seguridad, el medio ambiente y las operaciones.

**Bernal, C. (2020)** en su tesis de pregrado “Diseño y evaluación económica de Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para sistemas de puerta de tren NS93” [7] estableció como objetivo diseñar y evaluar económicamente un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM), para los componentes del sistema de puertas del tren NS93, dado que es uno de los problemas que afecta durante el detenimiento de los trenes con ello la calidad del servicio, una vez realizado el análisis se establecerán divergencias y convergencias con el plan de mantenimiento preventivo que se aplica. En la investigación se utiliza la norma SAE JA1012 para determinar las funciones, fallas funciones y modos de fallas de la platina y motor de puerta. Para el análisis de criticidad de los modos de falla se utiliza los criterios de la Norma UNE ENE 50126. El análisis económico de la implementación se realizó para las actividades de mantenimiento preventivo cada

9500 km y para todas las puertas de la línea 5, siendo un total de 756 unidades. Como resultado el modo de falla con mayor riesgo es la pérdida de aislación del rotor/estator por falla de solenoide que pertenece al componente motor de puerta, platina de puerta y electroimán cuya tarea para mitigar el riesgo será programado basado en condición con límites definidos para el cambio del componente. El siguiente componente con riesgo alto es el limit switch, se propuso realizar una tarea de rediseño encargado a uno de los proveedores de la compañía. De análisis realizado a los principales modos de falla se espera reducir el número de fallas en un 82% y los tiempos de indisponibilidad en un 74%. Por otro lado, el costo las acciones de mantenimiento y para mitigación de los riesgos es de \$ 3.372.138, siendo \$1.074.654 mayor que el plan de mantenimiento preventivo actual.

**Langlo, F. (2014)** en su tesis de maestría “Aplicación de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para Sistemas de Perforación” [8] estableció como objetivo aplicar la metodología RCM a un sistema de perforación, el autor identifica la problemática que se tiene cuando el sistema de perforación tiene una parada y se declara el tiempo de inactividad, la tarifa diaria obtenida de la compañía operadora disminuye o se detiene por completo. Los equipos de perforación se alquilan a los operadores de los campos petroleros a una tarifa diaria aproximada de 450 mil dólares por día en el sector noruego, con el alto costo del tiempo de inactividad, se requiere de una estrategia de mantenimiento para evitar averías. La tesis se centra en el estudio del subsistema top drive del sistema de perforación, al tenerse muchos subsistemas el top drive resulta principal por utilizarse en la mayoría de plataformas de perforación moderna. Como parte del desarrollo del RCM se aplica el árbol de fallas (FTA) y el análisis de modo, efecto y criticidad de fallas (FMECA) para el subsistema de top drive. Se encontró mediante el FMECA tres

modos de falla que tienen un número de prioridad de riesgo superior a 50, que es el valor mínimo de prioridad de riesgo. Estos modos de falla fueron la llave dinamométrica, el elevador y el sistema de lubricación, de los cuales este último presentó el mayor valor de RPN, mientras que los de menor calificación fueron el pivote, la unidad de válvula y la unidad de presión hidráulica. Como resultado del FMECA, se clasifica al sistema de lubricación como el de mayor criticidad, en la matriz de riesgo tiene un valor de 3, mientras que el resto de los modos de falla se clasificaron como clase 4, a pesar de ello dicha clasificación es aceptable, como conclusión de la matriz de riesgo se debe verificar los procedimientos de muestreo y lubricación de aceite. Como tarea se desprende que se debe informar a las cuadrillas de perforación que el sistema de lubricación tiene prioridad y el perforador debe verificar que el personal esté capacitado en realizar correctamente los procedimientos de lubricación.

#### 1.5.1.2 Antecedentes Nacionales

**Peña Ávila, F. (2022)** en su tesis de pregrado “Implementación de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) para mejorar la confiabilidad de empernadores de AESA en Minera RAURA” [9] estableció como objetivo implementar un plan de mantenimiento aplicando la metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para mejorar la disponibilidad de los empernadores de AESA en la unidad minera Raura. El autor estableció pérdidas económicas de US\$ 62,644.78 y US\$ 172,604.42 en el año anterior al estudio por sanciones económicas por incumplimiento del contrato principalmente por paradas de los equipos empernadores debido a falla funcionales. El tipo y nivel de investigación fue el tecnológico y aplicado, el diseño de la investigación fue de un grupo con pre prueba y post prueba. Con el objetivo de reducir las paradas por

fallas funcionales de dichos equipos, se realizó la selección del objeto de estudio mediante un árbol jerárquico y análisis de criticidad, se determinaron los sistemas, subsistemas, y componentes del equipo a los cuales se definió sus funciones y a través del análisis de criticidad y del histórico de fallas se seleccionó las partes críticas al cual se aplicó el AMFE. Como resultado de la investigación se estableció un plan de mantenimiento detallado, con ello se logró mejorar la confiabilidad de los emperadores de 81.3 % a 88.5% el cual logro un incremento del 7.2%.

**Pardo Figueroa, S. (2020)** en su tesis de pregrado “Aplicación del mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) para la elaboración de un plan de mantenimiento de un molino de bolas Thyssenkrupp de 12 MW en una mina de cobre en el sur del Perú” [10] estableció como objetivo analizar la disponibilidad del molino de bolas aplicando la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad en una mina de cobre al sur del país. El autor estableció que, dentro del procesamiento de mineral de cobre, una de las etapas principales del proceso es la molienda, siendo el equipo que realiza la trituración el molino de bolas, a partir de ello considera dicho equipo como de mayor criticidad, y se debe asegurar la disponibilidad y confiabilidad para que la línea de producción de la planta minimice los tiempos de parada. El autor realiza el estudio para un molino de bolas de 8 sistemas, 23 subsistemas y más de 140 componentes siendo un equipo complejo, los elementos fueron considerados como críticos. Uno de los objetivos del trabajo de investigación fue analizar y determinar los diversos modos de falla de cada uno de los componentes, los resultados se utilizaron para la implementación del plan de mantenimiento basado en la confiabilidad, que lo dividió en cuatro secciones principales: plan de mantenimiento preventivo basado

en la condición, mantenimiento basado en la condición, mantenimiento basado en la inspección y rediseño o mejora. El autor estableció los componentes más importantes y críticos del molino son los liners del Shell y las tapas del molino de bolas, el motor carrier ring y el inserto del housing de alimentación, además estableció que el costo aproximado de la implementación del plan de mantenimiento basado en la confiabilidad en \$1, 860,572.2 dólares para el primer año y \$1, 768,572.2 dólares a partir del segundo año con 98 planes de mantenimiento por implementar en cada molino de bolas. El aporte de la investigación se centra en la aplicación de la metodología presentada para establecer los elementos más críticos, determinar el más apropiado plan de mantenimiento, estimación del costo de implementación, de tal forma de aumentar la productividad del equipo.

**Indigoyen Aguilar, A. (2020)** en su tesis de pregrado “Mantenimiento centrado en la confiabilidad para incrementar la disponibilidad de la chancadora Sandvik CH870 en la Compañía minera Milpo S.A.” [11] estableció como objetivo incrementar la disponibilidad de la chancadora aplicando el mantenimiento centrado en la confiabilidad. El autor identificó que el problema de la pérdida de producción fue la baja disponibilidad de la chancadora Sandvik CH870 con un promedio mensual de 77,4%, afectando los objetivos de producción de la compañía. El autor evaluó el impacto de la baja disponibilidad en los indicadores de mantenimiento como son el costo, el tiempo medio entre fallas y la mantenibilidad. Se estableció que la falta de conocimiento del tipo de fallas, imposibilita la evaluación del impacto, así como no permite tener tareas claras para mitigar dichos tipos de fallas. El objetivo de la investigación fue aplicar la metodología del RCM para incrementar la disponibilidad de la chancadora

mencionada. Como resultado del estudio se realizó un plan de mantenimiento preventivo, con las tareas que se desprenden de la aplicación de la metodología, logrando incrementar la disponibilidad mecánica mensual de 77.4% a 85,2%, esto se consigue principalmente de reducir las horas de parada por mantenimiento correctivo de un promedio mensual de 158 horas a 104 horas.

#### 1.5.2 Tipo y diseño de la investigación

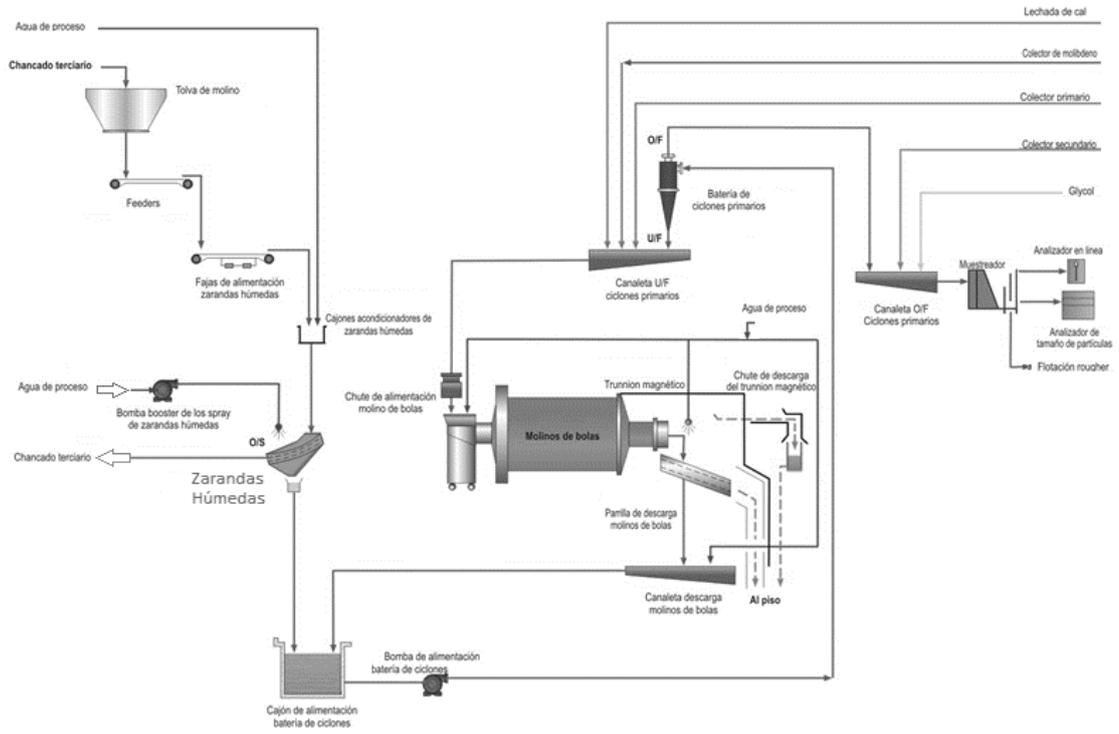
El tipo de investigación de la presente tesis corresponde a un enfoque cuantitativo, dado que para obtener la variable de estudio como es la disponibilidad, se realizarán cálculos numéricos con el tiempo total de fallas en un determinado periodo, tiempos de reparación, número de fallas, entre otras variables que serán parte del análisis para poder cuantificar la mejora del indiciado como parte de la aplicación de la metodología RCM.

De acuerdo a la planificación de la obtención de datos, la investigación será documental porque los datos se obtendrán de los reportes documentados, intervenciones programadas en el software de mantenimiento, datos de manuales de operación y mantenimiento del fabricante.

#### 1.5.3 Unidad de análisis

La unidad de análisis corresponde a los equipos del área de molienda de una planta concentradora de mineral de baja ley que se localiza en el sur del Perú. A continuación, en la Figura 1.1, se muestra el diagrama de flujo con los equipos del área de molienda, de forma simplificada se muestra una de las cuatro líneas de producción.

**Figura 1** Diagrama de flujo del área de molienda



*Fuente: La empresa (2022)*

#### 1.5.4 Variables e indicadores

A continuación, se indica la variable dependiente e independiente que se evaluará durante la aplicación del RCM.

##### 1.5.4.1 Variable independiente

Plan de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

##### 1.5.4.2 Variable dependiente

Disponibilidad mecánica de los equipos del área de molienda (D).

##### 1.5.4.3 Indicadores de variable dependiente

Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF)

Tiempo Medio para Reparar (MTTR)

### 1.5.5 Operacionalización de variables

**Tabla 1.1.** Operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicadores
Disponibilidad de componentes de equipos	Es la probabilidad de que un ítem o componente esté en condición de cumplir una función requerida bajo condiciones determinadas en un instante específico de tiempo, suponiendo que todos los recursos externos requeridos están presentes (ISO 14224-2016).	Disponibilidad ( $D$ ): $D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$ Donde: MTBF Tiempo medio entre fallas. MTTR Tiempo medio de reparación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilidad</li> <li>• Tiempo medio entre falla</li> <li>• Tiempo medio de reparación</li> </ul>
Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad	Metodología utilizada de análisis racional, sistemático y estructurado, para definir las tareas óptimas de mantenimiento, necesarias para eliminar los riesgos asociados a la materialización de los modos de falla presentes en los equipos y sistemas y sus consecuencias en el contexto operacional presente.	Conjunto de acciones para mantener o restaurar un activo a un estado especificado o a un estado capaz de garantizar un servicio determinado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funciones primarias y secundarias</li> <li>• Modos y efecto de fallas</li> <li>• Lista de tareas</li> <li>• Lista de cambios que deben hacerse al diseño del sistema ó equipo</li> </ul>

Fuente: *Elaboración propia (2022)*

## 1.5.6 Matriz de consistencia

**Tabla 1.2.** Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<ul style="list-style-type: none"> <li>¿En qué medida el Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad permite aumentar la disponibilidad mecánica del área de molienda de la planta concentradora?</li> </ul>	<p>Implementar un plan de mantenimiento basado en el mantenimiento centrado en la confiabilidad para aumentar la disponibilidad del área de molienda de mineral de baja ley.</p>	<p>Con la implementación del plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad se aumentará la disponibilidad del área de molienda de mineral de baja ley.</p>	<p><b>V.I.:</b> Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.  <b>V.D.:</b> Disponibilidad de la Zaranda Húmeda</p> <p><b>INDICADORES:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Disponibilidad entre fallas.</li> <li>- Tiempo medio entre reparaciones.</li> <li>- Tiempo medio en operación.</li> <li>- Ocurrencia de falla.</li> <li>- Costo de mantenimiento.</li> </ul>	<p><b>TIPO DE INVESTIGACIÓN</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Experimental.</li> </ul> <p><b>NIVEL DE INVESTIGACION</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicativo</li> <li>• Explicativo</li> </ul> <p><b>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Experimental</li> </ul> <p><b>TÉCNICA E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Matriz de análisis de modos y efectos de fallo.</li> <li>• Matriz de criticidad.</li> <li>• Diagrama de decisión RCM.</li> <li>• Registro de intervenciones de los equipos del área de molienda.</li> <li>• Registro histórico de cambio de componentes de los equipos.</li> <li>• Registro de intervenciones, reparaciones, tiempos de los componentes de los equipos.</li> </ul>
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS		
<ul style="list-style-type: none"> <li>¿Cuáles son los componentes de mayor criticidad de la Zaranda Húmeda de acuerdo a la matriz de criticidad?</li> <li>¿Cuáles son los modos y efectos de falla de los componentes de la Zaranda Húmeda de mayor criticidad que afectan la disponibilidad?</li> <li>¿Cuáles son las tareas que se deben implementar para los componentes de la Zaranda Húmeda que presentan mayor criticidad para disponibilidad?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar y analizar los modos y efectos de fallas del equipo de mayor criticidad del área de molienda.</li> <li>• Determinar las tareas y acciones a tomar a partir de la aplicación del RCM para optimizar el plan de mantenimiento.</li> <li>• Calcular y analizar la disponibilidad del equipo de mayor criticidad de las diversas líneas del área de molienda.</li> <li>• Evaluar económicamente la ejecución de tareas de mantenimiento basado en la confiabilidad del equipo de mayor criticidad del área de molienda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con la identificación y análisis de los modos y efectos de fallas permitirá proponer un plan de mantenimiento basado en RCM.</li> <li>• Con la determinación de las tareas y acciones que se aplicaran a partir de la utilización del RCM aumentara la disponibilidad del área de molienda.</li> <li>• Con el cálculo y análisis de la disponibilidad del equipo de mayor criticidad de las diversas líneas del área de molienda se propondrá un plan de mantenimiento basado en el RCM.</li> <li>• Mediante la evaluación del costo de las tareas de mantenimiento se permitirá gestionar los recursos para la ejecución de tareas propuestas.</li> </ul>	<p><b>POBLACIÓN:</b>            Activos físicos del área de molienda de una Planta Concentradora de mineral de baja ley de Cobre en una mina en el Departamento de Arequipa.  <b>MUESTRA:</b>            Equipos del circuito de Molienda de la planta concentradora.</p>	

Fuente: Elaboración propia (2022)

## CAPITULO II FUNDAMENTOS TECNICOS Y DE INGENIERIA

### 2.1 Definiciones y conceptos generales

#### 2.1.1 Definiciones del mantenimiento

El mantenimiento se refiere a un conjunto de acciones que tienen como objetivo mantener los equipos o sistemas en un estado funcional o restaurarlos a su estado para continuar haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan. Desempeña un papel importante para asegurar la calidad del producto y puede utilizarse como una ventaja competitiva. Cuando el equipo funciona de manera inconsistente, se podría producir productos de mala calidad o defectuoso, para lograr productos de buena calidad es importante que el equipo funcione y se desempeñe dentro de los parámetros requeridos, y esto se puede lograr mediante el mantenimiento.

Los objetivos de un sistema de producción es generar ganancias, utilizando las oportunidades del mercado, esto se logra maximizando la operatividad de los equipos y reduciendo el tiempo de inactividad, aumentar la calidad, seguridad, entrega a tiempo de productos, mediante ello se incrementa las utilidades.

#### 2.1.2 Estrategias de mantenimiento

Para lograr mantener el funcionamiento de los equipos durante el periodo de tiempo requerido y alcanzar los niveles de producción de deseado, cumpliendo con la calidad y seguridad se utiliza una serie de herramientas que se describen a continuación.

##### 2.1.2.1 Mantenimiento correctivo o por fallas

Este tipo de estrategia de mantenimiento se realiza cuando el equipo ya no puede realizar las funciones por lo que fue adquirido. Esta estrategia es

utilizada cuando el costo de las tareas de mantenimiento alternativo no es viable. Este enfoque se conoce ocasionalmente como una estrategia de hasta que el equipo o componente falle.

#### 2.1.2.2 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo se aplica cuando se conoce el inicio del final de la vida útil del activo. Al intervenir antes de alcanzar el final de la vida útil se evita que la falla ocurra. Las tareas de mantenimiento preventivo se realizan lo más cerca posible de la etapa final de la vida útil pero antes de que suceda la falla. El tiempo para realizar dichas tareas está determinado por el tiempo o el uso del activo desde la última intervención. Este tipo de estrategia de mantenimiento basado en el tiempo es el de mayor aplicación y, como tal, el mantenimiento preventivo a menudo se denomina mantenimiento basado en el tiempo [1].

##### 2.1.2.2.1 Mantenimiento preventivo con base en el tiempo o en el uso

A este tipo de estrategia de mantenimiento se conoce como planeado y se realiza para enfrentar las fallas potenciales. Las tareas se pueden realizar con base en el uso o las condiciones del equipo. El mantenimiento preventivo con base en la utilización o en un periodo de tiempo se realiza según el tiempo de funcionamiento del equipo. Las tareas específicas que se realizan son conocidas, así como sus frecuencias. La frecuencia o tiempo para las intervenciones se realiza en base al historial de los equipos, recomendaciones del fabricante.

#### 2.1.2.2.2 Mantenimiento preventivo con base en las condiciones

Se realiza en base a las condiciones que se determinan en el equipo, a través de los principales parámetros, cuyos valores se ven afectados por la condición que presenta. Este tipo de estrategia también se le conoce como mantenimiento predictivo.

#### 2.1.2.3 Mantenimiento de oportunidad

Se lleva a cabo cuando existe la oportunidad de hacerlo, dichas oportunidades se pueden presentar durante períodos de inactividad programados de un sistema específico y pueden utilizarse para ejecutar tareas de mantenimiento pendientes.

#### 2.1.2.4 Detección o búsqueda de fallas

El proceso de detección de fallas implica realizar una inspección para evaluar la posibilidad de cualquier presencia inicial de fallas. La búsqueda de fallas es aplicada a las fallas ocultas que a su vez afectan a los dispositivos de protección.

#### 2.1.2.5 Modificación del diseño

El proceso de modificación del diseño se implementa para garantizar que un equipo cumpla con los estándares apropiados. Este enfoque puede incluir mejoras, así como la necesidad ocasional de fabricación y expansión de la capacidad. Por lo general, es necesario coordinarse con el equipo de ingeniería y otros departamentos dentro de la organización para ejecutar con éxito la modificación del diseño.

#### 2.1.2.6 Reparación general

Una reparación general se refiere a una inspección y restauración del equipo o sus partes principales a una condición de funcionamiento aceptable. Las tareas que se realizan son extensas, con ello se asegura el funcionamiento del equipo por un largo periodo de tiempo.

### 2.1.2.7 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo se utiliza para anticipar cuándo una falla que ya se ha iniciado progresará hasta el punto en que resulte en la pérdida de alguna capacidad funcional. Esta falla puede deberse al envejecimiento, el uso o eventos aleatorios. Las fallas tardan algún tiempo en desarrollarse y, finalmente, conducir a una pérdida de función. Para implementar con éxito el mantenimiento predictivo, el mecanismo de falla debe proporcionar alguna indicación de que está en progreso, lo que se conoce como "condición de falla potencial". Sin embargo, debe tenerse en cuenta que no previene la falla por completo. En cambio, predice cuándo se perderá la funcionalidad después de que el mecanismo de falla comience a extenderse.

El mantenimiento predictivo a veces se conoce como mantenimiento basado en condiciones o mantenimiento en condiciones. Se compone de dos elementos principales: monitoreo, que a menudo se denomina monitoreo de condición y luego restauración o reparación de cualquier problema encontrado, conocido como restauración/reparación de condición o mantenimiento correctivo.

## 2.2 Costos y productividad en mantenimiento

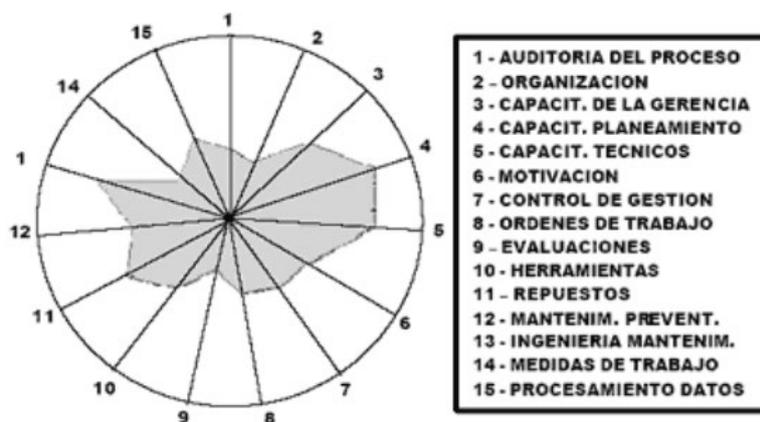
En relación al análisis de costos, el mantenimiento correctivo durante el periodo de vida del activo, tiene la forma de una curva ascendente, debido a que reduce la vida útil de los equipos y en consecuencia la depreciación del activo, pérdida de producción o calidad del producto o servicio, aumento de la compra de repuestos, aumento del "stock" de materia prima improductiva, incremento de las horas extras del personal de ejecución de las tareas de mantenimiento, pérdida de mercado y aumento del riesgo de incidentes.

### 2.3 Análisis y diagnóstico del área de mantenimiento

Como primer paso para la implementación de un sistema de información se constituye en la evaluación de necesidades de los usuarios y en la examinación de criterios de recolección de información, en función de los tipos de informes deseados. Esta etapa, que se identifica como Análisis y Diagnóstico del área de Mantenimiento, debe desarrollarse en participación de todos los interesados y especialistas de las áreas de: Planificación, Producción, Mantenimiento, en el cual todos los participantes tienen que poseer el poder de decisión en sus tareas, para que el sistema que se implementara logre el objetivo trazado. Durante dicha etapa se elige el proceso bien manual o automatizado a ser empleado, de acuerdo con los objetivos y los periodos de tiempo a ser logrados, la confiabilidad deseada y los costos asociados. El análisis y diagnóstico, fue originalmente concebido como es presentado en la siguiente figura, se le denominó "Polígono de Productividad del Mantenimiento" o "Radar del Mantenimiento" [13].

En la Figura N°2 se indica las áreas a diagnosticar del área de mantenimiento:

**Figura 2:** Polígono de productividad de mantenimiento



**Fuente:** Predictiva. (2020). *Análisis y Diagnóstico del Área de Mantenimiento* [13].

El método fue desarrollado con el objetivo de formar un grupo de trabajo de una propia compañía que mediante el asesoramiento o no de consultoría externa, examine

la situación de las diversas áreas de la gerencia del mantenimiento. Este grupo de trabajo, coordinado por el líder de mantenimiento, deberá estar conformado por representantes de las diversas áreas de ejecución del mantenimiento y demás que se relacionan de forma directamente e indirectamente; operación, material, organización y métodos, recursos humanos, capacitación y desarrollo, compras, procesamiento de datos, nuevos proyectos, archivo/biblioteca, control patrimonial, contabilidad y seguridad industrial, algunos de ellos tendrán una participación menor, solamente a los temas que los involucra [13].

#### 2.4 Mantenimiento centrado en la confiabilidad

El concepto del mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM se ha manifestado desde inicios de la década de 1960. Stanley Nowlan y Howard Heap de United Airlines introdujeron la metodología de manera formal en la industria de la aviación comercial en 1978. RCM es un proceso lógico que identifica qué equipo o componente en su instalación o máquina requiere realizar tareas de mantenimiento preventivo en vez de dejar que falle y posterior repararlo. Un análisis mediante la metodología RCM tiene en cuenta que los presupuestos para ejecutar las tareas de mantenimiento no son ilimitados y, como tal, existe una base lógica para decidir qué hacer y dónde invertir los mayores esfuerzos [1].

RCM es una serie de tareas que se generan producto de una evaluación sistemática que se emplea para desarrollar u optimizar el plan de mantenimiento de la compañía. Como parte del método identifica los mecanismos responsables de las fallas mediante la incorporación de la lógica de decisión para determinar cuáles son las consecuencias operativas y de seguridad de las fallas.

Si bien RCM tuvo sus orígenes en la aviación comercial, en la actualidad es un proceso de confiabilidad universal que es ampliamente utilizado y en diversos sectores de la industria mundial.

#### 2.4.1 Norma SAE JA 1011 “Criterios de Evaluación para el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad”

La Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) desarrolló un estándar que le denomina a una serie de pasos proceso RCM. El motivo fundamental de esto fue que la terminología RCM se aplicaba a muchas mejoras de programas de mantenimiento preventivo en compañías que no tenían una base técnica o lógico y no mostraban un desarrollo sistemático. Eran una serie de esfuerzos de mejora del mantenimiento preventivo, revisión, o actualizaciones de programas, que se describieron de forma deliberada bajo el proceso de RCM. La SAE pretendía asegurar que no se repliquen estos otros esfuerzos, muchos de ellos arbitrarios, del enfoque más preciso y completo de aplicar específicamente la lógica RCM. Como resultado, para denominar proceso RCM a un proceso de un programa de mantenimiento, se debe cumplir con los criterios que se muestran en el documento JA1011 de la organización [1].

La norma SAE JA1011 la cual se aprobó y presento en 1999, se utiliza para evaluar cualquier proceso que pretende denominarse RCM, con la finalidad de determinar si efectivamente lo es o no. Dicho documento soporta esta evaluación, que es un mínimo de características que el proceso debe tener para poder ser considerado como RCM [1].

Como parte del proceso RCM se deben ir respondiendo a 7 preguntas del componente, activo o sistema en estudio: [4]

- ¿Cuáles son las funciones y sus parámetros bajo su contexto operacional?
- ¿De qué forma falla en realizar dichas funciones?
- ¿Cuál es la causa de la falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando se presenta una falla?
- ¿En qué sentido es importante cada falla?
- ¿Qué se puede hacer para prevenir o predecir cada falla?
- ¿Qué puede hacerse si no se encuentra una tarea proactiva?

El desarrollo de las preguntas anteriores y de la metodología RCM supone ir completando una serie de pasos principales para su implementación que a continuación:

1. Identificación del componente, equipo o sistema: Como primer paso, se identifican los componentes, equipos o sistemas críticos para el funcionamiento de un determinado activo, para lograr ello se realiza una evaluación profunda.
2. Definición de funciones y estándares: Como siguiente paso se establecen las funciones que debe cumplir cada sistema, equipo o componente crítico, estas funciones se definen en base a una serie de criterios que tienen que ver con el desempeño, confiabilidad, calidad, seguridad, medio ambiente. Además de ello, se establecen los estándares y criterios de rendimiento que se deben alcanzar.
3. Análisis de modos de falla: El siguiente paso consiste en identificar y analizar los posibles modos de falla para cada función. Se intenta comprender cómo y por qué podrían ocurrir cada una de estas fallas, y

clasificarlas en función del impacto en la operación, calidad, seguridad y medio ambiente.

4. Determinación de las estrategias de mantenimiento: En esta etapa en base a la criticidad de los modos de falla y sus consecuencias, se determina la mejor estrategia de mantenimiento y puede incluir diversas técnicas de mantenimiento proactivo, predictivo, preventivo o reactivo.
5. Desarrollo de las tareas de mantenimiento: En este paso se definen las tareas de mantenimiento necesarias para implementar las estrategias seleccionadas más acorde con el contexto operativo y los objetivos de la compañía. Tales tareas pueden incluir inspecciones, pruebas, lubricación, ajustes, reemplazos de componentes, entre otros.
6. Establecimiento de la frecuencia de ejecución de tareas: En este paso se determinará cual es la frecuencia para ejecutar las tareas de mantenimiento en función de la criticidad del modo de fallo, tasa de ocurrencia y costos que se incurre la actividad.
7. Documentación y revisión continua: En este último paso se documenta todo el proceso de aplicación del RCM, la evaluación de las funciones críticas, modos de falla, elección de la mejor estrategia de mantenimiento. Como parte de una mejora del proceso, se establece un sistema de revisión y actualización del proceso RCM.

Los pasos mencionados describen el desarrollo del RCM con el objetivo de incrementar la confiabilidad, disponibilidad y desempeño de la planta, equipo o componentes y las metas que se deseen alcanzar.

A continuación, se definirán los elementos que nos permitirán evaluar las preguntas y etapas de la implementación del proceso RCM:

- Funciones y parámetros de funcionamiento: Para aplicar la metodología que asegurara la operatividad del activo en un determinado contexto operativo, se necesita determinar qué es lo que los usuarios deseen que haga el activo y asegurar que es capaz de realizarlo en los niveles deseados. Para iniciar el proceso de RCM se debe definir las funciones del activo y los parámetros de funcionamientos requeridos dentro de su contexto operacional, dichas funciones se pueden clasificar en funciones primarias y secundarias.
- Funciones primarias: son aquellas funciones que realiza el activo por lo que fue adquirido, tiene que ver principalmente con la producción, seguridad, medio ambiente, calidad. El grado de incumplimiento de dichas funciones, puede afectar potencialmente a alguno o varios de los aspectos mencionados.
- Funciones secundarias: el cumplimiento de las funciones secundarias son parte de las expectativas del usuario por lo que fue adquirido el activo, sin embargo, no cumplen funciones principales, están relacionadas con las áreas de producción, seguridad, medio ambiente y calidad. El incumplimiento de dichas funciones, puede acarrear inconvenientes en las áreas mencionadas.

Durante el proceso de implementación del RCM, los operadores deben participar activamente, pues ellos son los que conocen con mayor precisión el aporte y contribución de los activos en la producción. Si la tarea se lleva a cabo de forma correcta, dicha tarea tomará un tercio del tiempo de implementación del proceso RCM, además de ello se tendrá un mejor entendimiento del funcionamiento del activo por las personas que son parte del equipo del RCM.

- Fallas funcionales: las tareas de mantenimiento se ejecutan para el cumplimiento de las metas de funcionamiento del activo. Durante el funcionamiento de un activo, lo único que pueda causar una parada no deseada es mediante la manifestación de algún tipo de falla. El éxito de un programa de mantenimiento se basa en cómo se hace frente a dichas fallas, pero antes de poder definir alguna estrategia de mantenimiento, es primordial conocer antes cuáles son los tipos de fallas que pueda estar asociado a un activo.
- Modos de falla: Una vez que se ha identificado cada falla funcional, el siguiente paso es tratar de identificar todos los eventos que puedan haber causado cada estado de falla. Estos eventos se denominan modos de falla. Estos modos de falla incluyen aquellos que han ocurrido en equipos iguales o similares operando en el mismo contexto, fallas que actualmente están siendo prevenidas por regímenes de mantenimiento existentes, así como fallas que aún no han ocurrido, pero tienen un riesgo de producirse.

Para que todas las causas probables de falla en los equipos puedan ser identificadas y resueltas adecuadamente, no solo se deben incluir los modos de falla causado por deterioro o desgaste por el uso normal, sino se deberían incluir fallas causadas por errores humanos, alguna de ellas por los operadores y el personal de mantenimiento, así como los errores de diseño. Es importante identificar la causa de cada falla con suficiente detalle para asegurarse de no desperdiciar tiempo y esfuerzo intentando realizar actividades para reducir los síntomas en lugar de las causas reales.

- Efectos de falla: el cuarto paso en el proceso de RCM tiene que ver con preparar una lista de los efectos de falla, que describen lo que ocurre con cada modo de falla. Esta descripción debería incluir toda la información necesaria para apoyar en la evaluación de las consecuencias de la falla, tal como:
  - a. Que evidencia existe (si la hay) de que la falla ha ocurrido.
  - b. De qué modo representa una amenaza para la seguridad o el medio ambiente, si la representa,
  - c. De qué manera afecta a la producción o a las operaciones, si las afecta.
  - d. Que daños físicos, si los hay, han sido causados por la falla.
  - e. Que debe hacerse para repararse la falla.
- Consecuencias de la falla: cuando se realiza un análisis profundo de una empresa existirá una gran posibilidad de encontrar miles de posibles modos de falla. Cada falla que tenga la posibilidad de producirse, tendrá una afectación en la organización de alguna forma, pero los efectos serán diferentes, comprometiendo la producción, calidad, seguridad, medio ambiente. Las intervenciones y tareas de mantenimiento tienen un tiempo y costo para llevarse a cabo.

Durante el análisis si encontramos que una falla tiene consecuencias importantes en el sistema, equipo o componente, se intentara evitar mediante la ejecución de tareas de mantenimiento, mientras que, si la falla no causara alguna consecuencia o leve, se podría realizar una simple tarea como la limpieza del equipo, sin embargo, esto debe contrastarse con las metas de la compañía.

El proceso de RCM da una mayor importancia en las consecuencias de las fallas que puede afectar al proceso, maquina o componente, como prioridad a las características técnicas, en base a ello la metodología indica que el mantenimiento proactivo no es evitar las fallas sino mitigarla. El proceso de RCM clasifica dichas fallas en 4 grupos:

- a. Consecuencias de fallas ocultas: Estas fallas en la mayoría de casos no tienen una consecuencia mayor en el proceso, en su mayoría, dichas fallas corresponden a sistemas de seguridad.
- b. Consecuencias ambientales y para la seguridad: Cuando sucede esta falla podría producir una lesión simple o fatal a las personas. Para el caso de una falla ambiental, si sucede puede causar daños al medio ambiente, incumplir alguna de las normativas del país.
- c. Consecuencias operaciones: Una falla tiene consecuencias operacionales, si cuando se manifiesta afecta directamente al nivel de producción, calidad, tiempos de entrega, servicio.
- d. Consecuencias no operacionales: Las consecuencias de estas fallas no afectan a las áreas anteriormente mencionadas, solo tendrá un efecto en la reparación.

#### 2.4.2 Numero de prioridad de riesgo

El número de prioridad de riesgo (NPR) nos indica la relevancia de cada modo de falla, se calcula multiplicando el índice de gravedad por el índice de ocurrencia por el índice de detectabilidad para cada modo de falla. El NPR para cualquier modo y efecto de falla individual no excederá del valor de 1000 [2].

## 1. Índice de gravedad (G)

El índice de gravedad es una estimación del grado de impacto de los efectos si una determinada falla ocurriera, en la presente implementación se definieron los rangos de criterios de gravedad que puedan manifestarse para los equipos de la compañía, a continuación, se muestra la Tabla N° 2.1 con la descripción y sus valores asociados:

**Tabla 3** Rango de gravedad del modo de falla

<b>Gravedad</b>	
<b>Efecto</b>	<b>Valor</b>
Modo de falla potencial, afecta la seguridad de las personas, podría infringir los reglamentos y normativas.	9-10
Pérdida total o degradación de la función primaria del equipo o componente.	7-8
Pérdida total o degradación de la función secundaria del equipo o componente.	5-6
Producción de ruido anormal, irritabilidad, sigue desempeñando las funciones primarias y secundarias.	2-4
No se produce consecuencias.	1

*Fuente: La empresa (2022)*

## 2. Índice de ocurrencia (O)

El índice de ocurrencia indica que tan probable es que un determinado modo de falla podría ocurrir y con qué frecuencia, para la presente investigación se definieron los rangos de criterios de ocurrencia que puedan manifestarse para los equipos de la compañía, a continuación, se muestra la Tabla N° 4 con la descripción y sus valores asociados:

**Tabla 4** Rango de ocurrencia del modo de falla

<b>Ocurrencia</b>		
<b>Criterio</b>	<b>Incidentes por ítem</b>	<b>Valor</b>
Nuevo equipo, componente o diseño, se desconoce el historial de falla.	1 en 10	10
Fallas son probables o inevitables para el tipo equipo o componente.	1 a 5 en 100	7-9
Posible falla asociada al tipo de equipo o componente.	0.1 a 1 en 100	4-6
Bajas fallas asociado al tipo de equipo o componente.	0.1 a 1 en 1000	2-4
Falla es eliminado mediante un control de mantenimiento.	No produce	1

*Fuente: La empresa (2022)*

### 3. Índice de detectabilidad (D)

El índice de detectabilidad indica que tan probable es detectar una falla o el efecto. Para la presente investigación se definieron los rangos de detectabilidad que puedan encontrarse en los equipos de la compañía, a continuación, se muestra en la Tabla N° 2.3 con la descripción y sus valores asociados:

**Tabla 5** Rango de detectabilidad del modo de falla

<b>Detectabilidad</b>	
<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
No se puede o no es fácilmente detectable el modo de falla.	9-10
Modo de falla detectado después de la operación detectado a través de equipamiento	6-8
Modo de falla detectado después de la operación de forma visual, audible o inspeccionado con o sin herramientas.	4-5
Modo de falla detectado por las alarmas y sensores del equipo.	2-3
Se previene la causa de falla mediante el diseño o rediseño.	1

*Fuente: La empresa (2022)*

Después de determinar los valores de ocurrencia, detectabilidad y gravedad para cada uno de los modos de falla del equipo, se aplicará la ecuación (2.1), el valor hallado de NPR se clasificará en crítico, moderado, bajo y opcional de acuerdo con la Tabla N° 6:

$$NPR = G \times O \times D \quad (2.1)$$

**Tabla 6:** Valores del NPR y clasificación

Tipo	Valor
Crítico	NPR > 252
Moderado	252 > NPR > 150
Bajo	150 > NPR > 80
Opcional	80 > NPR

*Fuente: La empresa (2022)*

## 2.5 Análisis RAM confiabilidad (R), disponibilidad (A) y mantenibilidad (M)

El análisis RAM se utiliza para diagnosticar el estado de un sistema, proceso, maquinaria en un determinado periodo de tiempo. Además de ello, nos permite obtener cuantitativamente los parámetros de confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad, A continuación, definiremos los siguientes términos que nos permitan obtener dichos parámetros.

1. Tiempo medio entre Fallas (MTBF): Es el tiempo promedio que transcurre entre una falla y la siguiente [1].

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo Total} - \text{Tiempo total de fallas}}{\text{Número de fallas}}$$

2. Tiempo medio de reparación (MTTR): Representa el tiempo en reparar una determinada falla. El tiempo comienza desde la aparición de la falla hasta el momento que recupera su función [1].

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de fallas}}{\text{Número de fallas}}$$

3. Disponibilidad: Él es tiempo programado durante el cual un determinado activo es capaz de realizar una función específica. Expresa además la probabilidad de que un determinado activo, pueda realizar una función por lo que fue adquirida durante un determinado periodo de tiempo o cuando se lo requiera, no es necesario que la función se esté ejecutando para que activo se considere disponible [1].

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

4. Mantenibilidad: Es la capacidad de que un activo pueda restituirse a una condición de funcionamiento, eso significa que el activo tiene capacidad inherente de ser mantenido [1].

$$TR = \frac{\textit{Tiempo total de fallas}}{\textit{Número de fallas}}$$

5. Confiabilidad: Es la capacidad que tiene un activo de continuar realizando las funciones por la que fue adquirido durante un periodo deseado bajo determinadas condiciones de funcionamiento [1].

$$R = \frac{MTBF}{MTFB + MTTR}$$

## 2.6 Método para identificar el equipo de mayor criticidad del área de molienda

Para determinar el equipo de mayor criticidad dentro de una instalación, sistema, equipo mediante el análisis de criticidad, se establece una lista jerarquizada en función a la calificación del riesgo de determinados parámetros. Los valores que se seleccionan para cada criterio corresponde al contexto operacional del equipo, normativa vigente, objetivos de la compañía, producción y ventas.

### 2.6.1 Elementos para determinación de la criticidad

Para determinar el nivel de criticidad, se evaluará la frecuencia de falla, impacto y flexibilidad operacional, costos de mantenimiento y el impacto en la seguridad y el ambiente. En la Tabla N° 7, se muestran los valores asociados para cada uno de estos criterios, y que se evaluara para cada equipo del área de molienda.

**Tabla 7** Criterios para evaluación de criticidad

<b>CRITERIOS PARA EVALUACIÓN DE CRITICIDAD</b>			
<b>Frecuencia de Fallas (F)</b>		<b>Costos de Mantenimiento (CR)</b>	
Mayor a 5 fallas / semana	4	Mayor o igual a 5.000 USD	2
2 -4 fallas / semana	3	Inferior a 5.000 USD	1
0,5 a 1 Fallas / semana	2	<b>Impacto en seguridad, ambiente, higiene (SAH)</b>	
< 0,5 Fallas / semana	1		
<b>Impacto Operacional (IO)</b>		Afecta a la seguridad del personal interno y externo.	8
Parada inmediata de la línea.	10	Afecta al medio ambiente y las instalaciones, provocando daños irreversibles.	6
Parada del sistema o subsistema y repercusión en otros sistemas.	7		
Impacto a nivel de producción y calidad.	4	Afecta a las instalaciones causando daños severos.	4
No genera ningún efecto significativo sobre operaciones y producción.	1	Provoca daños menores (Accidentes, incidentes).	3
<b>Flexibilidad Operacional</b>		Provoca un impacto ambiental cuyo efecto no infringe las normas.	2
No existe opción de producción y no hay forma de recuperarlo.	4		
No hay opción de suministro de repuesto en almacén.	2	No provoca ningún tipo de daño a personas, instalaciones o en el ambiente.	1
Función de repuesto disponible	1		

*Fuente: La empresa (2022)*

### 2.6.2 Evaluación de la criticidad basado en el riesgo

Mediante la evaluación de los criterios para cada uno de los equipos del área de molienda a través de la ecuación (2.2) y (2.3), nos permitirá determinar el

valor de criticidad y que se clasificará en tipo de criticidad como muy crítico, crítico, semi-crítico y no crítico, de acuerdo al rango que se encuentre, como se muestra los valores en la Tabla N° 8.

$$Criticidad = Frecuencia \times Consecuencia \quad (2.2)$$

Donde la consecuencia se obtiene de evaluar la ecuación (2.3).

$$Consecuencia = (IO \times FO) + CR + SAH \quad (2.3)$$

**Tabla 8** Tipo de criticidad y rangos

TIPO	FRECUENCIA	RANGO
Muy Crítico (MC)	3-4	90-200
Crítico (C)	1-4	40-120
Semi-Crítico (SC)	1-4	0-60
No Crítico (NC)	1-2	0-40

*Fuente: La empresa (2022)*

**Figura 3** Matriz de criticidad

FRECUENCIA	4	SC	C	C	MC	MC
	3	SC	SC	C	MC	MC
	2	NC	NC	SC	C	C
	1	NC	NC	SC	SC	C
		10	20	30	40	50
		<b>CONSECUENCIAS</b>				

*Fuente: La empresa (2022)*

### 2.6.3 La zaranda húmeda

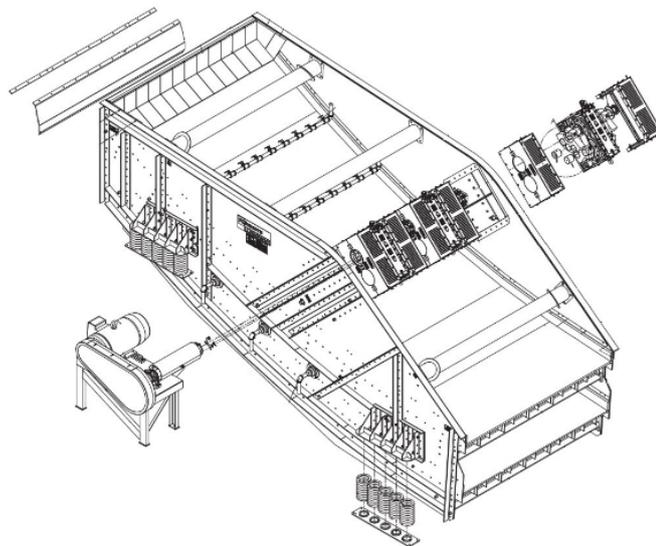
Es un equipo electromecánico vibratorio que tiene como función clasificar el mineral con determinado tamaño de partícula mediante la utilización de una parrilla con aberturas. Para la presente tesis, la zaranda en estudio es del tipo banana conformada por dos parrillas conocido como decks. Posee tres excitadores que son accionados mediante el eje cardánico acoplado a una

faja reductora y motor eléctrico, dicho conjunto genera un movimiento oscilatorio en la zaranda. El equipo dispone de rociadores de agua que permite un lavado continuo de mineral. La estructura de la zaranda se encuentra instalada sobre resortes que se encargan de amortiguar y garantizar el correcto funcionamiento. Las fajas de alimentación de zaranda de molino de bolas suministran el mineral a la zaranda y esta alimenta el molino de bolas. El mineral es separado en dos flujos, uno con tamaño mayor de la partícula denominado oversize y que es descargado en la faja oversize de zarandas húmedas y el otro con tamaño menor denominado undersize y que es descargado en los cajones de alimentación a la batería de ciclones.

#### 2.6.3.1 Partes principales del equipo

Los principales componentes de la zaranda húmeda son el sistema motriz, parrilla o decks, resortes, excitadores, ejes intermedios.

**Figura 4:** Partes principales de la zaranda húmeda



**Fuente:** Manual de operación y mantenimiento del fabricante [12].

a. Sistema motriz

Se encarga de convertir la energía eléctrica en energía mecánica a través de un motor eléctrico que trasmite movimiento giratorio a través de un eje conectado a la polea motriz unida a una correa de transmisión a la polea conducida, esta última conectada al eje motriz universal que transmitirá el movimiento giratorio al sistema de excitadores.

b. Parrilla o Decks

Es un conjunto de mallas que tiene la función de clasificar el mineral grueso y fino según su tamaño y granulometría, el mineral que posee un determinado tamaño pasaran a través de las aberturas de las mallas el cual se denomina undersize y el mineral que se rechaza se denomina oversize.

c. Resortes

Tienen la función mantener suspendido el cuerpo o estructura de la zaranda, además de ello, amortiguan las vibraciones generados por la zaranda y que puedan afectar otros componentes y sistemas del equipo.

d. Excitadores

El conjunto de excitadores son los encargados de generar movimiento vibratorio a la zaranda, estos están conectados a dos contrapesos con insertos sólidos, que producirá un movimiento del peso del contrapeso al ser removidos, la amplitud de la vibración varia debido a que la fuerza centrífuga se modifica.

e. Ejes intermedios

Los ejes intermedios tienen la función de acoplar al conjunto de los tres excitadores, que se encargaran de generar al movimiento vibratorio en la

zaranda. Los ejes intermedios se unen a los demás a través de unos pernos que permitirá un giro uniforme.

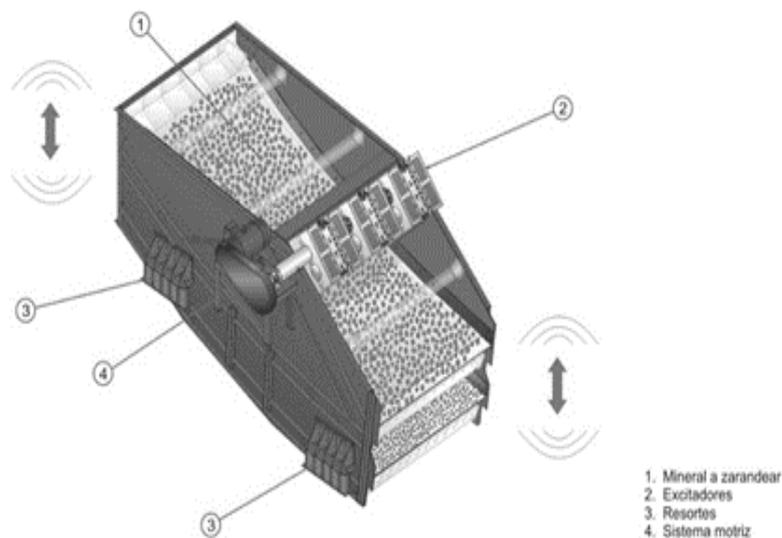
f. Sistema de rociadores

Tienen la función de mantener el mineral húmedo para que pueda pasar a través de las parrillas. Mediante una bomba de impulsión se logra dispersar en forma de spray el agua para el proceso de separación.

### 2.6.3.2 Principio de funcionamiento

El sistema motriz transmite movimiento giratorio hacia los ejes de los excitadores mediante el eje motriz universal; y debido a la fuerza centrífuga de sus contrapesos por movimiento de los excitadores se genera vibraciones en la zaranda. Las vibraciones producen que el mineral de menor granulometría ubicados sobre la malla pase a través de abertura de la malla, y los de mayor tamaño fluyan sobre la superficie de la malla. El sistema de resorte amortigua las vibraciones en la zaranda de esta forma uniformiza el movimiento vibratorio en toda la zaranda.

**Figura 5** Principio de funcionamiento mediante clasificación



**Fuente:** Manual de operación y mantenimiento del fabricante [12].

## CAPITULO III DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 3.1 Descripción de problema

Como parte de las metas de la compañía se tiene definido los objetivos de producción para las diversas áreas de la compañía, sin embargo, se observó que en molienda no alcanza los niveles deseados, se encontró algunas líneas de molienda detenidas por fallas de equipos y mantenimientos de último momento que causan la paralización de toda la línea. Esto causa que la disponibilidad de la línea de molienda y equipos no alcancen los niveles deseados.

En la Tabla N° 3.1 se muestra las causas de las fallas más representativas que causaron un impacto en la producción de la línea de molienda.

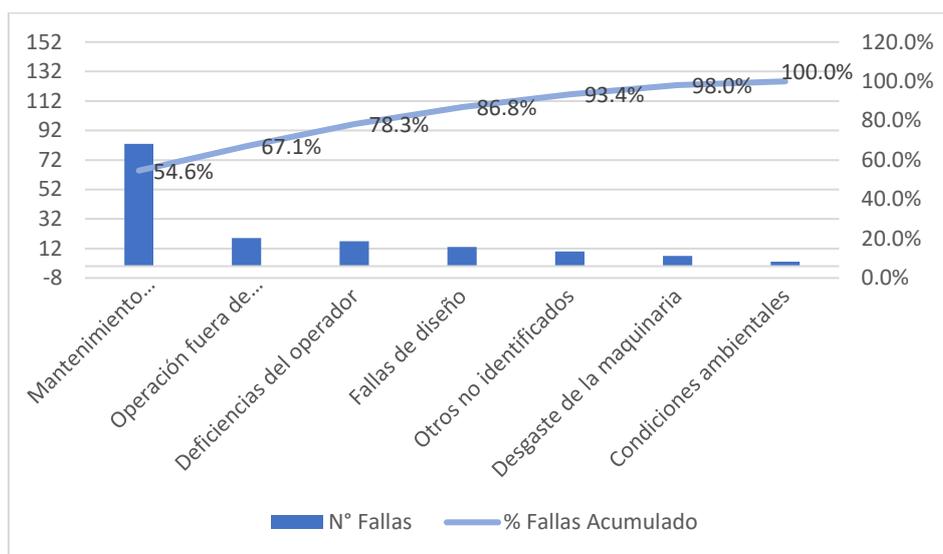
**Tabla 9** Causas de fallas de equipos de molienda

N°	Causas	Fallas	% Fallas
1	Operación fuera de especificaciones	19	12.5%
2	Desgaste de la maquinaria	7	4.6%
3	Deficiencias del operador	17	11.2%
4	Fallas de diseño	13	8.6%
5	Deficiencias del mantenimiento PM y CM	83	54.6%
6	Condiciones ambientales	3	2.0%
7	Otros no identificados	10	6.6%
Total de Fallas		152	100.0%

*Fuente: La empresa (2021)*

En la Tabla N° 9 de las causas de falla y detención de equipos en el año 2021, se aprecia que la mayor incidencia corresponde a deficiencias por mantenimiento preventivo y correctivo con 54.6% y 83 fallas relevantes que causaron impacto en la producción de las líneas de molienda.

**Figura 6** Gráfica de Pareto de los tipos causas de falla



*Fuente: La empresa (2021)*

En la gráfica de Pareto de la Figura 6 de las causas de falla y detención de los equipos del año 2021, se aprecia un mayor impacto por deficiencia del mantenimiento preventivo y correctivo en comparación con las causas de fallas por operación fuera de las especificaciones, y deficiencias del operador, es decir que si logramos reducir las deficiencias del mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos de la línea de molienda mejorando la estrategia del mantenimiento, de tal forma que se asegure que dichas tareas que se pretenden realizar serán las más óptimas, es posible lograr la reducción de las causas de falla y aumentar la disponibilidad de la línea de molienda.

### 3.2 Identificación de equipos críticos

A continuación, en la Tabla N° 10, se describe los equipos de la línea de molienda y se evalúa la mayor criticidad, los criterios que se analizarán son el impacto operacional, flexibilidad operacional, impacto en la seguridad y medio ambiente y la frecuencia de falla de cada equipo, en base a ello se determina el equipo más crítico del área de molienda.

**Tabla 10.** Equipos del área de molienda

<b>N°</b>	<b>Sección</b>	<b>Equipo</b>
1	Alimentación de zarandas	Tolvas de Molinos
2	Alimentación de zarandas	Feeders zarandas húmedas
3	Alimentación de zarandas	Faja de alimentación zarandas húmedas
4	Alimentación de zarandas	Balanza de 2 polines
5	Alimentación de zarandas	Cajones de alimentación zarandas húmedas
6	Clasificación por zarandas	Zarandas húmedas
7	Clasificación por ciclones	Cajón de alimentación a batería de ciclones
8	Clasificación por ciclones	Bomba de alimentación a batería de ciclones
9	Clasificación por ciclones	Batería de ciclones primarios
10	Clasificación por ciclones	Canaleta de O/F ciclones
11	Clasificación por ciclones	Muestreador de O/F de ciclones
12	Clasificación por ciclones	Analizador del o/f de ciclones
13	Clasificación por ciclones	Analizador de tamaño de partículas del o/f de ciclones
14	Clasificación por ciclones	Canaleta U/F ciclones
15	Molienda	Chute de alimentación molino de bolas
16	Molienda	Molino de bolas
17	Molienda	Trunnion magnético de molino de bolas
18	Molienda	Parrilla de descarga molino de bolas
19	Molienda	Canaleta descarga molino de bolas
20	Molienda	Sistema de freno molino de bolas
21	Molienda	Sistema lubricación rodamiento lado móvil molino de bolas
22	Molienda	Sistema lubricación rodamiento lado fijo molino de bolas
23	Molienda	Sistema de lubricación bomba de alimentación ciclón primario
24	Molienda	Tolva de almacenamiento de bolas
25	Molienda	Feeders rotatorios
26	Molienda	Faja de alta pendiente
27	Molienda	Faja de transferencia de bolas
28	Molienda	Deflectores de transferencia automática
29	Molienda	Chute de transferencia
30	Molienda	Chute de alimentación a molino

*Fuente: La empresa (2021)*

**Tabla 11.** Análisis de criticidad de los equipos de la línea de molienda

N°	Equipo	Frecuencia (F)	Impacto Operacional (IO)	Flexibilidad Operacional FO	Costo de Reparación (CR)	Impacto SAH	Consecuencia	Criticidad Equipo	Nivel de Criticidad
1	Tolvas de Molinos	2	4	2	1	3	12	24	NC
2	Feeders zarandas húmedas	1	4	3	2	2	16	16	NC
3	Faja de alimentación zarandas húmedas	1	4	2	1	4	13	13	NC
4	Balanza de 2 polines	2	4	2	1	1	10	20	NC
5	Cajones de alimentación zarandas húmedas	2	4	2	1	3	12	24	NC
6	Zarandas húmedas	4	10	3	2	3	35	140	MC
7	Cajón de alimentación a batería de ciclones	2	4	2	1	3	12	24	NC
8	Bomba de alimentación a batería de ciclones	2	10	3	2	3	35	70	C
9	Batería de ciclones primarios	2	10	3	2	3	35	70	C
10	Canaleta de O/F ciclones	2	4	2	1	3	12	24	NC
11	Muestreador de O/F de ciclones	1	4	2	1	1	10	10	NC
12	Analizador del o/f de ciclones	1	4	2	1	1	10	10	NC
13	Analizador de tamaño de partículas del o/f de ciclones	1	4	2	1	1	10	10	NC
14	Canaleta U/F ciclones	2	4	2	1	3	12	24	NC
15	Chute de alimentación molino de bolas	2	4	2	1	3	12	24	NC
16	Molino de bolas	2	10	3	2	3	35	70	C
17	Trunnion magnético de molino de bolas	1	4	2	1	1	10	10	NC
18	Parrilla de descarga molino de bolas	1	4	2	1	3	12	12	NC
19	Canaleta descarga molino de bolas	1	4	2	1	3	12	12	NC
20	Sistema de freno molino de bolas	2	7	2	2	3	19	38	NC
21	Sistema lubricación rodamiento lado móvil molino de bolas	2	7	3	1	3	25	50	SC
22	Sistema lubricación rodamiento lado fijo molino de bolas	2	7	3	1	3	25	50	SC
23	Sistema de lubricación bomba de alimentación ciclón primario	2	7	3	1	3	25	50	SC
24	Tolva de almacenamiento de bolas	1	4	2	1	3	12	12	NC
25	Feeders rotatorios	1	7	3	1	3	25	25	SC
26	Faja de alta pendiente	1	4	2	1	3	12	12	NC
27	Faja de transferencia de bolas	1	4	2	1	3	12	12	NC
28	Deflectores de transferencia automática	2	4	2	1	2	11	22	NC
29	Chute de transferencia	1	4	2	1	3	12	12	NC
30	Chute de alimentación a molino	1	4	2	1	3	12	12	NC

Fuente: La empresa (2021)

Como se puede apreciar en los valores de criticidad determinados en la Tabla N° 1.1 análisis de criticidad de equipos de la línea de molienda, la zaranda húmeda tiene un mayor valor de los equipos del área de molienda con criticidad 140 y nivel de criticidad “MC”, y de acuerdo a la Tabla N° 8 Tipo de criticidad y rangos, se clasifica como “Muy crítico”, luego le sigue la bomba de alimentación a batería de ciclones con criticidad 70 y “Critico”, batería de ciclones primarios con 70 y “Critico” y Molino de bolas con 70 y “Critico”.

A continuación, se presenta la disponibilidad de los equipos con mayor número de criticidad del área de molienda.

**Tabla 12:** Disponibilidad de equipos de mayor criticidad de la línea de molienda

<b>Equipo</b>	<b>Criticidad Equipo</b>	<b>Nivel de Criticidad</b>	<b>Disponibilidad año 2021 (%)</b>
Zarandas húmedas	140	MC	79.42%
Bomba de alimentación a batería de ciclones	70	C	88.69%
Batería de ciclones primarios	70	C	85.94%
Molino de bolas	70	C	86.50%

*Fuente: La empresa (2021)*

En la Tabla N° 12, se aprecia que la disponibilidad de los equipos supera el 85%, sin embargo, la zaranda húmeda tiene una disponibilidad menor al 80%. Como los equipos se encuentran en serie, es decir, que, si uno de ellos queda paralizado por falla, los demás equipos quedarán en espera y hasta el restablecimiento de la operatividad de dicho equipo. A continuación, se muestra disponibilidad de la zaranda de las líneas 11/12/13/14 para los diversos meses del periodo 2021.

**Tabla 13:** Reporte horas programadas y disponibilidad de zarandas húmedas 11/12/13/14 antes del RCM

Superintendencia: M Área: Planif. Molienda		REPORTE DISPONIBILIDAD DE ZARANDAS LINEAS 11-14						Rev.: 1
Mes	Equipo	Horas Prog.	Horas Real	TR	N° Fallas	MTBF	MTTR	Disponibilidad MTBF/(MTBF+MTTR)
Ene-21	P1-17-ZD-11	685	521	164	7	74.43	23.43	76.06%
	P1-17-ZD-12		531	154	6	88.50	25.67	77.52%
	P1-17-ZD-13		576	109	6	96.00	18.17	84.09%
	P1-17-ZD-14		528	157	4	132.00	39.25	77.08%
Feb-21	P1-17-ZD-11	679	560	119	9	62.22	13.22	82.47%
	P1-17-ZD-12		510	169	5	102.00	33.80	75.11%
	P1-17-ZD-13		516	163	4	129.00	40.75	75.99%
	P1-17-ZD-14		546	133	9	60.67	14.78	80.41%
Mar-21	P1-17-ZD-11	673	522	151	8	65.25	18.88	77.56%
	P1-17-ZD-12		549	124	4	137.25	31.00	81.58%
	P1-17-ZD-13		538	135	4	134.50	33.75	79.94%
	P1-17-ZD-14		556	117	10	55.60	11.70	82.62%
Abr-21	P1-17-ZD-11	667	557	110	5	111.40	22.00	83.51%
	P1-17-ZD-12		501	166	7	71.57	23.71	75.11%
	P1-17-ZD-13		537	130	6	89.50	21.67	80.51%
	P1-17-ZD-14		509	158	6	84.83	26.33	76.31%
May-21	P1-17-ZD-11	685	541	144	5	108.20	28.80	78.98%
	P1-17-ZD-12		547	138	9	60.78	15.33	79.85%
	P1-17-ZD-13		572	113	6	95.33	18.83	83.50%
	P1-17-ZD-14		576	109	10	57.60	10.90	84.09%
Jun-21	P1-17-ZD-11	679	575	104	9	63.89	11.56	84.68%
	P1-17-ZD-12		527	152	7	75.29	21.71	77.61%
	P1-17-ZD-13		513	166	6	85.50	27.67	75.55%
	P1-17-ZD-14		548	131	5	109.60	26.20	80.71%
Jul-21	P1-17-ZD-11	673	543	130	8	67.88	16.25	80.68%
	P1-17-ZD-12		566	107	9	62.89	11.89	84.10%
	P1-17-ZD-13		540	133	5	108.00	26.60	80.24%
	P1-17-ZD-14		517	156	8	64.63	19.50	76.82%
Ago-21	P1-17-ZD-11	667	518	149	5	103.60	29.80	77.66%
	P1-17-ZD-12		511	156	9	56.78	17.33	76.61%
	P1-17-ZD-13		541	126	7	77.29	18.00	81.11%
	P1-17-ZD-14		536	131	10	53.60	13.10	80.36%
Set-21	P1-17-ZD-11	682	581	101	7	83.00	14.43	85.19%
	P1-17-ZD-12		526	156	4	131.50	39.00	77.13%
	P1-17-ZD-13		532	150	6	88.67	25.00	78.01%
	P1-17-ZD-14		572	110	6	95.33	18.33	83.87%
Oct-21	P1-17-ZD-11	679	513	166	6	85.50	27.67	75.55%
	P1-17-ZD-12		571	108	10	57.10	10.80	84.09%
	P1-17-ZD-13		525	154	5	105.00	30.80	77.32%
	P1-17-ZD-14		510	169	5	102.00	33.80	75.11%
Nov-21	P1-17-ZD-11	673	555	118	9	61.67	13.11	82.47%
	P1-17-ZD-12		515	158	9	57.22	17.56	76.52%
	P1-17-ZD-13		514	159	9	57.11	17.67	76.37%
	P1-17-ZD-14		516	157	8	64.50	19.63	76.67%
Dic-21	P1-17-ZD-11	667	514	153	7	73.43	21.86	77.06%
	P1-17-ZD-12		522	145	8	65.25	18.13	78.26%
	P1-17-ZD-13		508	159	9	56.44	17.67	76.16%
	P1-17-ZD-14		561	106	4	140.25	26.50	84.11%

Fuente: La empresa (2021)

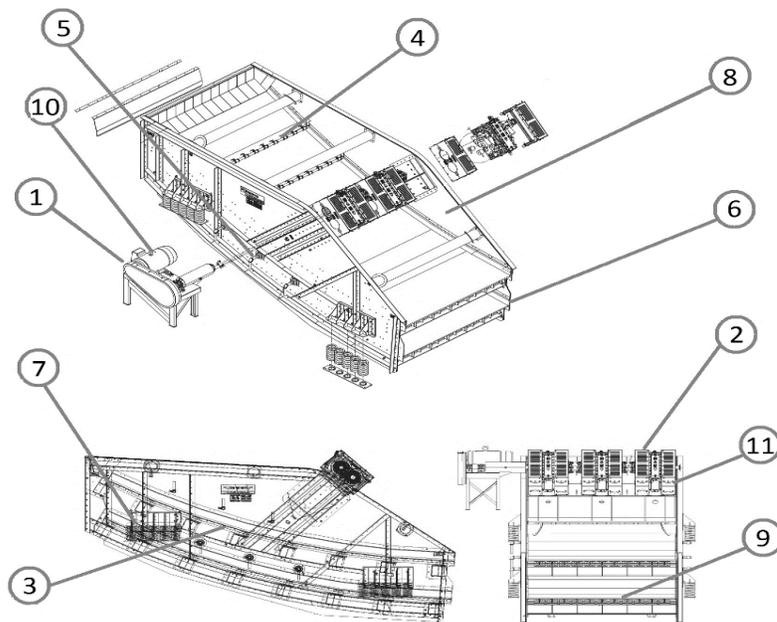
De la tabla N° 13 se aprecia que la disponibilidad anual promedio de las 4 líneas de zarandas es de 79.42%, dicho valor es menor en 7.62% que la disponibilidad promedio de los tres equipos siguientes con mayor valor de criticidad. La disponibilidad anual de la zaranda húmeda se encuentra por debajo del promedio de los demás equipos de la línea de molienda, en base a ello se propone implementar la

metodología RCM a la zaranda húmeda con el objetivo de incrementar la disponibilidad con un valor de 85% o superior en el primer año.

### 3.3 Sistemas de la zaranda húmeda

A continuación, en la Figura N° 7 se presenta los sistemas principales que componen la zaranda húmeda dentro del proceso de clasificación del mineral, cada uno de ellos con sus especificaciones técnicas de funcionamiento.

**Figura 7** Sistemas principales zaranda húmeda



*Fuente: Manual de operación y mantenimiento del fabricante [12].*

**Tabla 14.** Lista de partes de la zaranda húmeda

N°	DESCRIPCIÓN
1	Sistema de accionamiento
2	Excitadores
3	Deck
4	Sistema de rocío de agua
5	Sistema hidráulico
6	Sistema de traslación
7	Sistema de resortes
8	Sistema estructural y placas
9	Sistema de descarga
10	Sistema Eléctrico
11	Sistema instrumentación

*Fuente: La empresa (2021)*

**Tabla 15.** Especificaciones técnicas de la zaranda húmeda

<b>ESPECIFICACIONES GENERALES DEL EQUIPO</b>		
Marca		LUDOWICI
Modelo		BRU-2-360
Tipo		Banana Doble Deck
Dimensiones (ancho x largo mm)		3,600x8,500
Capacidad (L/H)		1930
Ajuste de la Inclinación		28° a 8°
Cantidad de resortes de amortiguación		20
Cantidad de excitadores		3
Modelo del excitador		HE150
Velocidad (RPM)		840
Amplitud (mm)		11
Motor Eléctrico	Marca	GENERAL ELECTRIC
	Potencia (HP)	175
	Velocidad nominal (RPM)	1800
Deck Superior	Tipo	POLYDECK
	Tamaño sección (mm)	405x405
	Profundidad de cama de descarga (mm)	-
Deck inferior	Tipo	POLYDECK
	Tamaño de sección (mm)	405x405

*Fuente: La empresa (2021)*

A continuación, en la Tabla N° 16, se muestra la lista de zarandas que conforman las cuatro líneas de molienda y que serán parte del estudio de la presente tesis:

**Tabla 16:** Lista de zarandas húmedas de las líneas de molienda

<b>Ítem</b>	<b>Descripción del equipo</b>	<b>TAG</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>
1	Zaranda línea N°1	P1-17-ZD-11	LUDOWICI	BRU-2-360
2	Zaranda línea N°2	P1-17-ZD-12	LUDOWICI	BRU-2-360
3	Zaranda línea N°3	P1-17-ZD-13	LUDOWICI	BRU-2-360
4	Zaranda línea N°4	P1-17-ZD-14	LUDOWICI	BRU-2-360

*Fuente: La empresa (2021)*

### 3.4 Análisis modos y efectos de fallas

A continuación, en la Tabla N° 17 se determina las funciones de cada sub-sistema que compone la zaranda, así como se describen las fallas funcionales, posibles modos de falla y sus efectos. Como parte del análisis, se calcula el número de prioridad de riesgo de cada falla (NPR) mediante la multiplicación de ocurrencia (O), detectabilidad (D) y severidad (S) para determinar la priorización y clasificar de acuerdo a los rangos establecidos en Tabla N° 2.4 como crítico (C), moderado (M), bajo (B) y opcional (O).

**Tabla 17.** Análisis de modo y efecto de falla del sistema de accionamiento

Unid. Producción:		Área Sur		Sub-Sistema:		Sistema de accionamiento						
Planta:		Concentradora		Equipo:		Zaranda Húmeda						
Sistema:		Molienda		Modo Operación:		Continuo						
Grupo de trabajo:		Planificación Molienda		Líneas N°:		11/12/13/14						
Función		Falla Funcional		Modo de Falla (Causa de la Falla)		Efecto de la Falla (Que ocurre cuando Falla)						
						O	D	S	NPR	NIVEL		
1.1	Transmitir el giro a una determinada velocidad y potencia	A	No se genera movimiento	1	Motor averiado no enciende	1	No se genera movimiento del eje motriz.	4	3	8	96	B
				2	Correa de transmisión rota	2	No transmite movimiento al eje de los excitadores.	7	5	8	280	C
				3	Eje motriz universal roto o desacoplado	3	No transmite movimiento del motor a la polea conducida y correa de transmisión.	4	5	8	160	M
				4	Polea motriz o conducida desprendida	4	No transmite movimiento del motor a polea conducida y correa de transmisión.	4	5	8	160	M
		B	No se alcanza la velocidad requerida y potencia	1	Correa de transmisión desgastada	1	No alcanza la velocidad requerida, el eje del excitador disminuye su velocidad, se reduce la producción.	7	3	8	168	M
				2	Polea motriz o conducida desgastada	2	No alcanza la velocidad requerida, el eje del excitador disminuye su velocidad, se reduce la producción.	4	7	8	224	M
1.2	Reducir las RPM y transmitir movimiento a los excitadores	A	No reduce a la velocidad requerida	1	Las poleas no corresponden al diseño del reductor	1	No controla la velocidad del excitador, aumenta las vibraciones del equipo.	3	7	7	147	B
1.3	Reducir vibraciones de la transmisión	A	Vibración por encima del rango	1	Correas de transmisión no corresponde al diseño	1	No compensa el desalineamiento de las poleas, aumenta la vibración.	3	7	8	168	M

Fuente: La empresa (2022)

**Tabla 18.** Análisis de modo y efecto de falla del sistema de excitadores

Unid. Producción:		Área Sur		Sub-Sistema:		Excitadores								
Planta:		Concentradora		Equipo:		Zaranda Húmeda								
Sistema:		Molienda		Modo Operación:		Continuo								
Grupo de trabajo:		Planificación Molienda		Líneas N°:		11/12/13/14								
Función		Falla Funcional		Modo de Falla (Causa de la Falla)		Efecto de la Falla (Que ocurre cuando Falla)				O	D	S	NPR	NIVEL
2	Generar movimientos vibratorios a la zaranda en un determinado rango de amplitud, balancear el peso del contrapeso ubicado en el eje del excitador	A	No se genera movimiento vibratorio	1	Rotura del eje del excitador	1	No acciona los contrapesos del excitador.	5	5	8	200	M		
				2	Desajuste de los contrapesos	2	Soltura de contrapesos, no puede generar fuerza de movimiento para vibración.	5	6	8	240	M		
				3	Ejes intermedios desacoplados o pernos sueltos	3	No se puede transmitir movimiento a todo el eje de la zaranda, causa vibración irregular, daño de resortes y estructura del equipo.	4	5	8	160	M		
		B	Se genera movimiento vibratorio con amplitudes fuera del rango de operación	1	Rotura de contrapesos del excitador	1	Vibración irregular fuera de parámetros de operación, sobrecarga de resortes.	4	6	9	216	M		
				2	Desalineamiento de los contrapesos	2	Vibración irregular fuera de parámetros de operación, sobrecarga de resortes.	7	6	6	252	M		
				3	Contrapesos no corresponden al diseño	3	Se produce movimiento y vibración irregular fuera de los parámetros de operación, sobrecarga de resortes y estructura del equipo.	3	7	5	105	B		
				4	Rotura de cojinetes de los ejes intermedios	4	Soltura del eje intermedio, no genera movimiento de los contrapesos.	3	6	9	162	M		
		C	Sobrecalentamiento de los excitadores	1	Nivel de aceite incorrecto	1	Se genera fricción en cojinetes, sobrecalentamiento, se podría fracturar cojinetes.	4	8	6	192	M		
				2	Respiraderos obstruidos	2	Se produce insuficiente abastecimiento de aceite lubricante al sistema hidráulico, sobrecalentamiento.	3	8	6	144	B		
				3	Lubricante no corresponde a las especificaciones	3	Se genera fricción en cojinetes, sobrecalentamiento, se podría fracturar cojinetes.	4	7	5	140	B		
		D	Derrame de aceite de los excitadores	1	Tapa de rodamiento aflojado.	1	Derrame del aceite, deficiencia en el flujo y presión, aumento de fricción, sobrecalentamiento.	3	7	6	126	B		
				2	Carcasa, sello y empaquetadura sellos dañados	2	Derrame del aceite, aumento de fricción en cojinetes, sobrecalentamiento.	4	9	6	216	M		

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 19** Análisis de modo y efecto del sistema deck

Unid. Producción:		Área Sur		Sub-Sistema:		Deck								
Planta:		Concentradora		Equipo:		Zaranda Húmeda								
Sistema:		Molienda		Modo Operación:		Continuo								
Grupo de trabajo:		Planificación Molienda		Líneas N°:		11/12/13/14								
Función		Falla Funcional		Modo de Falla (Causa de la Falla)		Efecto de la Falla (Que ocurre cuando Falla)				O	D	S	NPR	NIVEL
3	Clasificar el mineral según su granulometría, pasar hasta un determinado tamaño por la malla undersize y retener con mayor tamaño por la malla oversize	A	Deja pasar el mineral con tamaño mayor de abertura de malla	1	Rotura de sección o todo el deck	1	El mineral cae hacia el undersize o se desborda, no permitiendo su clasificación, se afecta el rendimiento de la zaranda, se detiene el equipo hasta su reparación.	4	4	6	96	B		
				2	Soltura o rotura de los pernos de ajuste del deck	2	Desprendimiento, levantamiento del deck que podría ocasionar su rotura, el mineral cae hacia los lados levantados, no clasifica.	6	5	6	180	M		
		B	El mineral se desplaza o cae hacia un lado de la malla	1	Ajuste incorrecto del deck	1	Soltura del perno, levantamiento del deck que podría ocasionar su rotura, el mineral cae hacia los lados levantados, no clasifica.	6	7	5	210	M		
				2	Angulo incorrecto del deck	2	Mineral pasa a una velocidad diferente, salpica y cae desordenadamente, acumulación hacia los lados y desborde, clasificación disminuye.	5	6	6	180	M		
		C	El mineral con tamaño menor no pasa a través de la malla	1	Deck obstruido por partículas mineras solidas	1	Obstrucción del deck, acumulación de mineral, reducción área de clasificación y eficiencia.	5	4	5	100	B		
				2	Angulo incorrecto del deck	2	Cae hacia desordenadamente, acumulación hacia los lados y desborde, reducción de la clasificación.	5	6	4	120	B		

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 20:** Análisis de modo y efecto del sistema de rocío de agua

Unid. Producción:		Área Sur		Sub-Sistema:		Sistema de rocío de agua								
Planta:		Concentradora		Equipo:		Zaranda Húmeda								
Sistema:		Molienda		Modo Operación:		Continuo								
Grupo de trabajo:		Planificación Molienda		Líneas N°:		11/12/13/14								
Función		Falla Funcional		Modo de Falla (Causa de la Falla)		Efecto de la Falla (Que ocurre cuando Falla)				O	D	S	NPR	NIVEL
4	Esparcir agua de los rociadores de la tubería central un determinado caudal y presión para lavar el mineral que es descargado en la zaranda	A	No sale agua de los rociadores	1	Taponamiento del rociador	1	No permite dispersar el agua sobre el mineral, disminuye la capacidad de clasificación en los decks.	4	5	5	100	B		
				2	Válvula mariposa de alimentación obstruida	2	No se dispersa el agua sobre el mineral, disminuye la capacidad de clasificación en los decks.	5	6	5	150	B		
				3	Bomba de agua opera deficientemente, rotura de alabes	3	No se dispersa el agua sobre el mineral, disminuye la capacidad de clasificación en los decks.	6	6	5	180	M		
		B	Sale agua con caudal insuficiente o irregular, y a baja presión	1	Bomba de agua opera deficientemente, rotura de alabes	1	No impulsa agua suficiente hacia las tuberías y rociadores, no permite alcanzar la distancia de dispersión sobre el mineral, disminuye la clasificación en los decks.	6	6	5	180	M		
				2	Válvula mariposa con apertura desgastada	2	No abre toda la válvula, reduce el flujo de agua, no alcanza los requerimientos de abastecimiento de agua para funcionamiento del rociador, se reduce la presión, disminuye la clasificación del deck.	4	7	5	140	B		
				3	Tubería parcialmente obstruida por material extraño	3	No pasa el agua suficiente hacia las tuberías, no llega agua y presión requerida al rociador, se dispersa agua parcialmente, no se alcanza la distancia, disminuye la capacidad de clasificación.	4	7	5	140	B		

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 21:** Análisis de modo y efecto del sistema hidráulico

Unid. Producción:		Área Sur		Sub-Sistema:		Sistema hidráulico								
Planta:		Concentradora		Equipo:		Zaranda Húmeda								
Sistema:		Molienda		Modo Operación:		Continuo								
Grupo de trabajo:		Planificación Molienda		Líneas N°:		11/12/13/14								
Función		Falla Funcional		Modo de Falla (Causa de la Falla)		Efecto de la Falla (Que ocurre cuando Falla)				O	D	S	NPR	NIVEL
5	A	No se suministra el aceite lubricante a la presión requerida	1	Taponamiento de los filtros, tuberías	1	Elevación de presión diferencial del filtro aceite lubricante, la presión se reduce en la salida, no fluye aceite lubricante, genera sobrecalentamiento de cojinetes.	4	8	5	160	M			
			2	Alabes de bomba averiada	2	No impulsa el aceite lubricante hacia los cojinetes, se sobrecalienta.	6	7	5	210	M			
			3	Válvula de control de presión de aceite lubricante dañada	3	No permite el paso de aceite lubricante, generándose caída de presión y del flujo, se genera sobrecalentamiento en cojinetes y elementos de contacto.	5	7	5	175	M			
			4	Aceite lubricante no correspondes a las especificaciones	4	No permite lubricar correctamente las superficies de contacto, sobrecalentamiento de cojinete y superficies.	4	7	4	112	B			
	B	No se suministra el aceite lubricante a la temperatura en el rango de operación requerida	1	Tuberías e Intercambiador obstruido y sucio	1	Sobrecalentamiento, el aceite se degrada y pierde sus propiedades.	6	8	4	192	M			
			2	Motor eléctrico del ventilador averiado	2	No fluye aire hacia el intercambiado de calor, aumenta la temperatura del aceite lubricante, se acelera el sobrecalentamiento de cojinetes y superficie de contacto.	5	6	6	180	M			
	C	Fuga de aceite al exterior	1	Manguera desconectada o rota	1	Derrame de aceite lubricante, no llega hacia los cojinetes y superficies de contacto, se sobrecalienta los cojinetes.	6	5	5	150	B			
			2	Conectores desgastados o fisurados	2	Derrame de aceite lubricante por las aberturas, no llega hacia los cojinetes y superficies de contacto, sobrecalentamiento de cojinetes y superficies de contacto.	4	6	5	120	B			

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 22:** Análisis de modo y efecto del sistema de traslación

<b>Unid. Producción:</b>		Área Sur		<b>Sub-Sistema:</b>		Sistema de traslación						
<b>Planta:</b>		Concentradora		<b>Equipo:</b>		Zaranda Húmeda						
<b>Sistema:</b>		Molienda		<b>Modo Operación:</b>		Continuo						
<b>Grupo de trabajo:</b>		Planificación Molienda		<b>Líneas N°:</b>		11/12/13/14						
Función		Falla Funcional		Modo de Falla (Causa de la Falla)		Efecto de la Falla (Que ocurre cuando Falla)						
O	D	S	NPR	NIVEL								
6	Desplazar lateralmente la estructura de la zaranda sobre los rieles a una determinada distancia y velocidad para realizar mantenimiento u operación	A	No se desplaza la estructura de zaranda o se desplaza a una velocidad irregular	1	Motor eléctrico averiado	1	No transmite movimiento a los engranajes y el eje del reductor, la estructura queda detenida.	4	5	4	80	O
				2	Rotura de dientes de engranajes del reductor	2	No transmite adecuadamente toda la velocidad de giro del motor hacia el eje del reductor, existe variación en la velocidad de traslación de la estructura.	3	6	2	36	O
				3	Eje del reductor y acople de riel roto	3	No transmite movimiento al engranaje en contacto con el riel, la estructura queda detenida.	3	5	3	45	O
				4	Riel obstruido con elemento externo	4	Riel obstruido, no permite el deslizamiento de la estructura sobre el riel, la estructura queda detenida.	5	4	6	120	B
				5	Sobrecalentamiento de los rieles por lubricación	5	Deformación de los rieles, desgaste y rotura	4	4	6	96	B

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 23:** Análisis de modo y efecto del sistema de resortes

Unid. Producción:		Área Sur		Sub-Sistema:		Sistema de resortes									
Planta:		Concentradora		Equipo:		Zaranda Húmeda									
Sistema:		Molienda		Modo Operación:		Continuo									
Grupo de trabajo:		Planificación Molienda		Líneas N°:		11/12/13/14									
Función		Falla Funcional		Modo de Falla (Causa de la Falla)		Efecto de la Falla (Que ocurre cuando Falla)				O	D	S	NPR	NIVEL	
7	Mantener suspendido todo el cuerpo de la zaranda y reducir las vibraciones generadas por los excitadores	A	No se suspende la estructura de la zaranda	1	Rotura del resorte por corrosión	1	La altura de uno de los lados se reduce, se presenta desnivel, el material se desborda, la zaranda queda detenida hasta el cambio de resorte.				5	6	8	240	M
				2	Acumulación de material en resortes	2	No puede desplazarse el resorte en toda su longitud, se disminuye el coeficiente, la zaranda se detiene hasta su cambio.				6	6	7	252	M
				3	Rotura de resorte por flujo irregular del mineral	3	Reducción de la altura de uno de los lados del resorte, se inclina, el material se desborda. La zaranda queda detenida hasta su cambio.				5	5	7	175	M
				4	Especificaciones de resortes no corresponden al diseño	4	El resorte no se desplaza en toda su longitud, o lo hace con mayor velocidad, no hay reducción de las vibraciones. La zaranda queda detenida hasta su cambio.				3	6	6	108	B
		B	Vibraciones anormales o elevadas de la estructura de la zaranda	1	Soltura de uno de los resortes	1	Inclinación del lado del resorte suelto, desbordamiento de mineral, aumento de vibraciones.				3	5	7	105	B
				2	Acumulación de material en resortes	2	No puede desplazarse el resorte en toda su longitud, se disminuye el coeficiente, aumenta las vibraciones, la zaranda se detiene hasta su limpieza.				3	6	7	126	B
				3	Especificaciones de resortes no corresponden al diseño	3	El resorte no se desplaza en toda su longitud, o lo hace con mayor velocidad, no hay reducción de las vibraciones. La zaranda queda detenida hasta su cambio.				2	6	6	72	O

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 24:** Análisis de modo y efecto del sistema estructural y placas

<b>Unid. Producción:</b>	Área Sur	<b>Sub-Sistema:</b>	Sistema estructural y placas								
<b>Planta:</b>	Concentradora	<b>Equipo:</b>	Zaranda Húmeda								
<b>Sistema:</b>	Molienda	<b>Modo Operación:</b>	Continuo								
<b>Grupo de trabajo:</b>	Planificación Molienda	<b>Líneas N°:</b>	11/12/13/14								
<b>Función</b>	<b>Falla Funcional</b>	<b>Modo de Falla (Causa de la Falla)</b>	<b>Efecto de la Falla (Que ocurre cuando Falla)</b>				<b>O</b>	<b>D</b>	<b>S</b>	<b>NPR</b>	<b>NIVEL</b>
8	A	Inestabilidad de estructura, aumento de vibración	1	Rotura de pernos de amarre de perfiles	1	Aflojamiento de los perfiles, aumento de la inestabilidad, aumenta la vibración de la zaranda.	5	5	6	150	B
			2	Desgaste y rotura de perfiles estructurales	2	Reducción de la estabilidad estructural, soltura de piezas estructurales.	4	6	9	216	M
			3	Corrosión, rotura de soldadura de perfiles	3	Reducción de estabilidad estructural, soltura de piezas estructurales.	4	4	6	96	B
			4	Rotura de pernos de sujeción de planchas	4	Desprendimiento de planchas del cuerpo de la zaranda.	5	4	9	180	M

*Fuente: Elaboración propia (2022)*

**Tabla 25:** Análisis de modo y efecto del sistema de descarga

<b>Unid. Producción:</b>	Área Sur	<b>Sub-Sistema:</b>	Sistema de descarga								
<b>Planta:</b>	Concentradora	<b>Equipo:</b>	Zaranda Húmeda								
<b>Sistema:</b>	Molienda	<b>Modo Operación:</b>	Continuo								
<b>Grupo de trabajo:</b>	Planificación Molienda	<b>Líneas N°:</b>	11/12/13/14								
<b>Función</b>	<b>Falla Funcional</b>	<b>Modo de Falla (Causa de la Falla)</b>	<b>Efecto de la Falla (Que ocurre cuando Falla)</b>				<b>O</b>	<b>D</b>	<b>S</b>	<b>NPR</b>	<b>NIVEL</b>
9	A	Material se queda en zaranda o sale incompleto	1	Desgaste y rotura de liners	1	Reducción de la protección de la plancha de la mesa por flujo de mineral, se detiene la zaranda hasta su reposición.	8	6	6	288	C
			2	Rotura o desprendimiento de pernos de los liners	2	Desprendimiento de liners, reducción de protección de plancha de mesa.	8	5	6	240	M
			3	Desgaste, rotura de faldera	3	Cae el mineral hacia la parte interior, podría afectar a componentes del sistema hidráulico.	8	6	6	288	C
			4	Desgaste o rotura de plancha de mesa descarga	4	Cae el mineral hacia la parte interior, podría afectar a componentes del sistema hidráulico.	8	5	7	280	C

*Fuente: Elaboración propia (2022)*

**Tabla 26:** Análisis de modo y efecto del sistema hidráulico

Unid. Producción:		Área Sur		Sub-Sistema:		Sistema Eléctrico					
Planta:		Concentradora		Equipo:		Zaranda Húmeda					
Sistema:		Molienda		Modo Operación:		Continuo					
Grupo de trabajo:		Planificación Molienda		Líneas N°:		11/12/13/14					
Función		Falla Funcional		Modo de Falla (Causa de la Falla)		Efecto de la Falla (Que ocurre cuando Falla)					
						O	D	S	NPR	NIVEL	
10	Suministrar energía eléctrica a un nivel de tensión y frecuencia requerida, así como proveer control y protección del equipo y personal.	A	No llega tensión al motor de sistema de accionamiento, hidráulico, traslación	1	Cable dañado y/o desconexión de borneras	1	No llega tensión hacia el motor del sistema de accionamiento, motor de bomba del sistema hidráulico, sistema de traslación.				
				1	Variador de velocidad averiado	1	Sobrecalentamiento, deterioro y avería del motor, se detiene la zaranda hasta la reparación.				
		B	Sobrecalentamiento de los motores	2	Sobretensión o caída en los bornes del motor	2	Se incrementa la corriente en el bobinado del motor, produce sobrecalentamiento, puede deteriorar y averiar el motor.				
				1	Rotura de cable de aterramiento	1	Se pierde protección de descarga de corriente de la estructura a tierra, riesgo de electrocución del personal que realiza trabajos en el área.				
		C	Estructura y placa de la zaranda energizada	2	Cables sueltos, hace contacto con estructura	2	Energizado de la estructura de la zaranda, produce riesgo de descarga eléctrica al personal.				

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 27:** Análisis de modo y efecto del sistema de instrumentación

Unid. Producción:		Área Sur		Sub-Sistema:		Sistema instrumentación								
Planta:		Concentradora		Equipo:		Zaranda Húmeda								
Sistema:		Molienda		Modo Operación:		Continuo								
Grupo de trabajo:		Planificación Molienda		Líneas N°:		11/12/13/14								
Función		Falla Funcional		Modo de Falla (Causa de la Falla)		Efecto de la Falla (Que ocurre cuando Falla)				O	D	S	NPR	NIVEL
11	Medir y generar alarma cuando se produzca desviación de los parámetros en determinados rangos de operación.	A	No mide niveles anormales de vibración o arroja medidas erróneas	1	Medidor averiado o desconectado	1	No registra el paso de corriente del sensor, muestra valores que no corresponden a las medidas, podría conllevar riesgo de avería mayor por no detectar vibraciones altas.	4	7	9	252	M		
				2	Sensor no calibrado	2	Muestra valores erróneos de vibraciones, genera riesgo de avería mayor por no detectar vibraciones altas.	4	9	9	324	C		
		B	Botonera de parada de emergencia no detiene el equipo	1	Cables sueltos, mala conexión de borneras de botonera	1	No envía señal de detenimiento al hacer contacto en pulsador, conlleva un riesgo de accidente.	2	7	9	126	B		
				2	Rotura de la botonera	2	No envía señal de detenimiento al hacer contacto en pulsador, conlleva un riesgo de accidente.	2	7	9	126	B		
		C	No regula temperatura de aceite del sistema hidráulico	1	Sensor temperatura desconectado o averiado	1	No acciona enfriador de aceite, lazo de retroalimentación averiado, produce sobrecalentamiento de los contactos.	4	8	9	288	C		
				2	Sensor de medición de temperatura esta descalibrado	2	Muestra valores erróneos de temperatura del aceite lubricante, produce riesgo de avería por sobrecalentamiento.	4	8	9	288	C		
		D	No transmite indicador de flujo de rociadores o indica erróneos	1	Transmisor averiado o cableado desconectado	1	No muestra el flujo de agua en el rociador, no alerta la ausencia de agua.	4	7	2	56	O		
				2	Descalibración del sensor del transmisor de flujo	2	Muestra valor flujo de caudal erróneo, no alerta la ausencia de agua en el rociador.	5	7	2	70	O		

Fuente: Elaboración propia (2022)

De las tablas N° 17 al 27 Análisis de modo y efecto de falla para los diversos sistemas, se evalúa y obtienen las funciones, fallas funcionales, modos y efectos de fallas de los diversos sistemas que componen la zaranda de la línea de molienda, la determinación se realiza en conjunto con el equipo de trabajo del RCM, es decir del aporte del equipo de mantenimiento y operaciones, además de ello se toma en cuenta la información de los manuales y recomendaciones del fabricante. Como se aprecia en la Tabla 17. Análisis de modo y efecto de falla del sistema de accionamiento, para el sistema de accionamiento se tiene un mayor valor de NPR de 280, denominado “C” para prioridad de riesgo crítico correspondiente a la ausencia de transmisión de movimiento a los excitadores mediante la correa de transmisión rota. De la misma forma, en la Tabla N° 18 para el sistema de excitadores se tiene el mayor valor de NPR con 252, denominado “M” para prioridad de riesgo moderado correspondiente a la vibración irregular fuera de parámetros de operación y sobrecarga de resortes por desalineamiento de los contrapesos. Para el sistema de deck como se aprecia en la Tabla N° 19, se tiene un menor valor de NPR con 96, denominado “B” para prioridad de riesgo bajo correspondiente a la caída del mineral hacia el undersize o desbordamiento por rotura de la sección del deck. De igual forma se aprecian los diversos valores del número de prioridad de riesgo para los otros sistemas de la zaranda que nos indicará que se deben priorizar dichas fallas. Como se aprecia en los valores NPR obtenidos, que a pesar de que una falla puede tener mayor severidad frente a otra falla, el valor de NPR no siempre será mayor, y esto es debido a que dicho valor se obtiene de la ocurrencia, detectabilidad y severidad, dado que una falla no podría ser recurrente, sin embargo, el efecto podría ser severo, considerando dicho criterio para la determinación de las tareas de

mantenimiento de la zaranda de la línea de molienda se utilizarán los valores anteriores además del diagrama decisión del RCM a partir de la evaluación de consecuencias que se presentan en las Tablas N° 17 al 27.

### 3.5 Determinación de las tareas de mantenimiento mediante el diagrama de decisión

#### 3.5.1 Análisis de consecuencia y determinación de las tareas de mantenimiento

A continuación, se analiza y determina mediante la hoja de decisión del RCM las tareas de mantenimiento asociado a los diversos modos de falla de los sistemas que conforman la zaranda de la línea de molienda. Las tres primeras columnas de las Tablas N° 28 al 37 titulado como F, FF y FM agrupado como “Referencia de información” corresponden a las funciones (F), falla funcional (FF) y modo de falla (FM) respectivamente que se determinaron en las Tablas N° 17 al 27.

Para las columnas denominadas H, S, E, O, N de las Tablas N° 28 al 37 se utiliza para registrar las respuestas a las preguntas relacionadas con las consecuencias de cada modo de falla. Las siguientes tres columnas etiquetado como H1, H2 y H3 se registran si ha sido seleccionada una tarea proactiva y si es así que tipo de tarea. De ser necesario se responde a las preguntas “acción a falta de” en las columnas H4, H5 y S4 que registran las tareas si las hay.

La evaluación de las consecuencias mediante la hoja de decisión inicia con la pregunta en la columna H (Oculto) si es evidente a los usuarios la pérdida de función causada por un modo de falla, si no es así se escribirá la letra N (No) y se pasará a la pregunta H1, en caso contrario si es evidente se colocará la letra S (Si) y se pasara a la pregunta S (Seguridad), aquí se responderá a la pregunta si el modo de falla que produce la falla funcional afecta la integridad de las personas, de ser así, se escribirá S (Si) y se pasara a la pregunta S1, de lo contrario, se escribirá la letra N (No) y se

pasara a la pregunta E (Medio ambiente), en esta etapa se responderá a la pregunta si el modo de falla produce una pérdida de función que infringe cualquier normativa o reglamento de medio ambiente, de ser así, se colocara S (Si), y se pasa a la pregunta S1, caso contrario, se coloca la letra N (No), y pasara a la pregunta O (Operacional), en esta etapa se responderá a la pregunta si el modo de falla afecta la capacidad operacional, de ser así se colocará la letra S en la columna O y se pasará a la pregunta O1, caso contrario se escribirá la letra N (No) y se pasara a la pregunta N1. Para la determinación de las tareas de mantenimiento se utiliza la hoja de decisión, descrito anteriormente, así como el indicador del número de prioridad de riesgo para cada modo de falla que se determinó en las Tablas N° 17 al 27. Una vez evaluado, en la columna de “Tarea propuesta” se coloca la tarea de mantenimiento, la frecuencia de ejecución, el personal que ejecutará la tarea que podrán ser del tipo mecánico, electricista, instrumentista, predictivo e ingeniería, además de la cantidad que participara en la tarea. Las actividades se registran en una orden de mantenimiento, para difusión y cumplimiento por el equipo de supervisión como parte de la ejecución del plan de mantenimiento.

**Tabla 28:** Hoja de decisión del RCM del sistema de accionamiento

Unid. Producción:			Área Sur							Sub-Sistema:			Sistema de accionamiento			
Planta:			Concentradora							Equipo:			Zaranda Húmeda			
Sistema:			Molienda							Modo Operación:			Continuo			
Grupo de trabajo:			Planificación Molienda							Líneas N°:			11/12/13/14			
Referencia de información			Evaluación de consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad
										H4	H5	S4				
F	FF	FM	H	S	E	O										
1.1	A	1	S	N	N	S	N	S				Inspección del motor, medición de amperaje y pruebas de aislamiento, reparación bobinado.	4M	Elec.	3	
1.1	A	2	S	N	N	S	N	N	S			Inspección y cambio de correa del sistema de accionamiento.	2M	Mec.	2	
1.1	A	3	S	N	N	S	S					Inspección y análisis de tintes penetrantes al eje universal del sistema de accionamiento.	1M	Pred.	3	
1.1	A	4	S	N	N	S	S					Inspección y revisión de ajuste de las polea motriz y conducida.	1M	Mec.	2	
1.1	B	1	S	N	N	S	N	N	S			Cambio y ajuste de correa de transmisión de sistema de accionamiento.	2M	Mec.	3	
1.1	B	2	S	N	N	S	N	N	S			Inspección y cambio de sistema de accionamiento.	6M	Mec.	4	
1.2	A	1	S	N	N	S	N	N	N			Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de especificaciones de polea antes de la instalación.	1M	Proy.	2	
1.3	A	1	S	N	N	S	N	N	N			Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de especificaciones de la correa de transmisión antes de la instalación.	1M	Proy.	2	

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 29** Hoja de decisión del RCM del sistema de excitadores

<b>Unid. Producción:</b>			Área Sur						<b>Sub-Sistema:</b>			Sistema de excitadores				
<b>Planta:</b>			Concentradora						<b>Equipo:</b>			Zaranda Húmeda				
<b>Sistema:</b>			Molienda						<b>Modo Operación:</b>			Continuo				
<b>Grupo de trabajo:</b>			Planificación Molienda						<b>Líneas N°:</b>			11/12/13/14				
Referencia de información			Evaluación de consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad
F	FF	FM	H	S	E	O										
2	A	1	N	N	N	S	S					Inspección y análisis de tintes penetrantes a los ejes de los excitadores, análisis de vibraciones.	1M	Pred.	3	
2	A	2	S	N	N	S	S					Inspección del ajuste y fijación de los contrapeso.	7D	Mec.	4	
2	A	3	N	N	N	S	S					Medición del ajuste y torqueo de los pernos que unen los ejes intermedios del excitador.	7D	Mec.	4	
2	B	1	N	N	N	S	S					Inspección por tintes penetrantes de fisuras en el acople de los excitadores.	1M	Pred.	3	
2	B	1	S	N	N	S	N	N	S			Cambio de sistema de excitadores.	6M	Mec.	6	
2	B	2	S	N	N	S	S					Medición de desalineamiento, análisis de vibraciones irregulares de los excitadores.	7D	Pred.	3	
2	B	3	S	N	N	S	N	N	N			Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de especificaciones del contrapeso antes de la instalación.	1M	Proy.	2	
2	B	4	S	N	N	S	S					Inspección por tintes penetrantes de fisuras en cojinetes, inspección por ultrasonido de desgaste.	2M	Pred.	3	
2	C	1	S	N	N	S	S					Medición de nivel del reservorio del aceite lubricante.	7D	Mec.	3	
2	C	2	S	N	N	S	N	S				Revisión y limpieza de los respiraderos del sistema hidráulico de los excitadores.	1M	Mec.	3	
2	C	3	S	N	N	S	N	N	N			Rediseñar proceso, adicionar check list y prueba de muestreo para verificación del aceite lubricante antes del llenado.	1M	Proy.	2	
2	D	1	S	N	N	S	S					Inspección y ajuste de tapas de rodamiento de los excitadores.	2M	Mec.	3	
2	D	2	S	N	N	S	N	N	S			Revisión y cambio de la carcasa, sello, y empaquetadura de los cojinetes del excitador.	2M	Mec.	3	

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 30:** Hoja de decisión del RCM del sistema de paneles deck

<b>Unid. Producción:</b>			Área Sur							<b>Sub-Sistema:</b>			Deck			
<b>Planta:</b>			Concentradora							<b>Equipo:</b>			Zaranda Húmeda			
<b>Sistema:</b>			Molienda							<b>Modo Operación:</b>			Continuo			
<b>Grupo de trabajo:</b>			Planificación Molienda							<b>Líneas N°:</b>			11/12/13/14			
Referencia de información			Evaluación de consecuencias				H1 S1 O1	H2 S2 O2	H3 S3 O3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad
F	FF	FM	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
3	A	1	N	S			S						Inspección y medición de deformaciones del deck.	10D	Mec.	3
3	A	1	S	N	N	S	N	N	S				Cambio sistema de mallas del deck	4M	Mec.	4
3	A	2	N	S			S						Medición del torque y reajuste de pernos del deck.	7D	Mec.	3
3	B	1	S	S			N	S					Ajuste de la posición y juntas del deck de acuerdo al torque recomendado por el fabricante.	15D	Mec.	4
3	B	2	N	S			S						Medición de la desviación del set del ángulo del deck, análisis de vibraciones por soldadura.	7D	Pred.	3
3	C	1	N	N	N	S	S						Inspección de obstrucciones, análisis de vibraciones por acumulación de mineral.	15D	Pred.	3

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 3.1** Hoja de decisión del RCM del sistema de rocío

<b>Unid. Producción:</b>			Área Sur							<b>Sub-Sistema:</b>			Sistema de rocío de agua			
<b>Planta:</b>			Concentradora							<b>Equipo:</b>			Zaranda Húmeda			
<b>Sistema:</b>			Molienda							<b>Modo Operación:</b>			Continuo			
<b>Grupo de trabajo:</b>			Planificación Molienda							<b>Líneas N°:</b>			11/12/13/14			
Referencia de información			Evaluación de consecuencias				H1 S1 O1	H2 S2 O2	H3 S3 O3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad
F	FF	FM	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
4	A	1	S	N	N	S	N	S					Apertura y limpieza, pruebas de flushing.	4M	Mec.	3
4	A	2	S	N	N	S	N	N	S				Revisión y cambio de la válvula mariposa del manifold.	6M	Mec.	3
4	A	3	S	N	N	S	N	N	S				Revisión y cambio de sistema de bomba de rociadores.	3M	Mec.	3
4	B	1	S	N	N	S	N	N	S				Revisión y cambio de alabes de la bomba de rociadores.	6M	Mec.	3
4	B	2	S	N	N	S	N	N	S				Revisión y cambio de la válvula mariposa del manifold.	6M	Mec.	3
4	B	3	S	N	N	S	N	S					Apertura y limpieza, pruebas de flushing.	3M	Mec.	3

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 32:** Hoja de decisión del RCM del sistema hidráulico

Unid. Producción:			Área Sur							Sub-Sistema:			Sistema hidráulico			
Planta:			Concentradora							Equipo:			Zaranda Húmeda			
Sistema:			Molienda							Modo Operación:			Continuo			
Grupo de trabajo:			Planificación Molienda							Líneas N°:			11/12/13/14			
Referencia de información			Evaluación de consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4				
5	A	1	S	N	N	S	N	N	S				Revisión y cambio de los filtros y aceite lubricante.	4M	Mec.	4
5	A	2	S	N	N	S	N	N	S				Inspección y cambio de sistema de bomba de aceite lubricante.	6M	Mec.	4
5	A	3	S	N	N	S	N	N	S				Cambio de válvulas de control de sistema de lubricación.	6M	Mec.	4
5	A	4	S	N	N	S	N	N	N				Rediseñar proceso, adicionar check list y prueba de muestreo para verificación del aceite lubricante antes del llenado.	1M	Proy.	2
5	B	1	S	N	N	S	N	S					Limpieza y pruebas de estanqueidad del sistema de tuberías del sistema de lubricación.	3M	Mec.	4
5	B	2	S	N	N	S	N	S					Revisión y reparación de los estatores, bobinado, y componentes móviles del motor.	4M	Elec.	3
5	C	1	S	S			S						Medición de la presión, inspección de las mangueras, medición con termografía de fugas de aceite.	2M	Pred.	3
5	C	2	S	N	N	S	S						Inspección de fisura de conectores por tintes penetrantes.	1M	Pred.	3

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 33:** Hoja de decisión del RCM del sistema de traslación

<b>Unid. Producción:</b>							Área Sur						<b>Sub-Sistema:</b>			Sistema de traslación		
<b>Planta:</b>							Concentradora						<b>Equipo:</b>			Zaranda Húmeda		
<b>Sistema:</b>							Molienda						<b>Modo Operación:</b>			Continuo		
<b>Grupo de trabajo:</b>							Planificación Molienda						<b>Líneas N°:</b>			11/12/13/14		
Referencia de información			Evaluación de consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad		
F	FF	FM	H	S	E	O			H4	H5	S4							
7	A	1	N	N	N	S	S						Inspección de corrosión en resortes.	2M	Mec.	3		
7	A	2	N	N	N	S	N	S					Inspección y limpieza de material acumulado en resortes.	7D	Mec.	3		
7	A	3	N	N	N	S	S						Medición de inclinación del equipo, análisis de vibraciones en diversos puntos.	15D	Pred.	3		
7	A	3	S	N	N	S	N	N	S				Cambio de resortes de suspensión.	4M	Mec.	5		
7	A	4	S	N	N	S	N	N	N				Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de la especificaciones del resorte antes de la instalación.	1M	Proy.	2		
7	B	1	N	N	N	S	S						Medición de torqueo y ajuste de pernos sujeción de resortes.	15D	Mec.	3		

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 34:** Hoja de decisión del RCM del sistema de resortes

<b>Unid. Producción:</b>							Área Sur						<b>Sub-Sistema:</b>			Sistema de resortes		
<b>Planta:</b>							Concentradora						<b>Equipo:</b>			Zaranda Húmeda		
<b>Sistema:</b>							Molienda						<b>Modo Operación:</b>			Continuo		
<b>Grupo de trabajo:</b>							Planificación Molienda						<b>Líneas N°:</b>			11/12/13/14		
Referencia de información			Evaluación de consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad		
F	FF	FM	H	S	E	O			H4	H5	S4							
7	A	1	N	N	N	S	S						Inspección de corrosión en resortes.	2M	Mec.	3		
7	A	2	N	N	N	S	N	S					Inspección y limpieza de material acumulado.	7D	Mec.	3		
7	A	3	N	N	N	S	S						Medición de inclinación del equipo, análisis de vibraciones en diversos puntos.	15D	Pred.	3		
7	A	4	S	N	N	S	N	N	N				Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de especificaciones antes de instalación.	1M	Proy.	2		
7	B	1	N	N	N	S	S						Medición de torqueo y ajuste de pernos de resortes.	15D	Mec.	3		
7	B	2	N	N	N	S	N	S					Inspección y limpieza de material acumulado.	7D	Mec.	3		
7	B	3	S	N	N	S	N	N	N				Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de especificaciones antes de instalación.	1M	Proy.	2		

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 35 :**Hoja de decisión del RCM del sistema estructural y placas

<b>Unid. Producción:</b>			Área Sur			<b>Sub-Sistema:</b>			Sistema estructural y placas							
<b>Planta:</b>			Concentradora			<b>Equipo:</b>			Zaranda Húmeda							
<b>Sistema:</b>			Molienda			<b>Modo Operación:</b>			Continuo							
<b>Grupo de trabajo:</b>			Planificación Molienda			<b>Líneas N°:</b>			11/12/13/14							
Referencia de información			Evaluación de consecuencias				H1 S1 O1	H2 S2 O2	H3 S3 O3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad
F	FF	FM	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
8	A	1	S	N	N	S	N	S					Inspección, colocación de wearing a pernos.	7D	Mec.	3
8	A	2	S	S			S						Medición e inspección por tintes penetrantes de fisuras en perfiles principales del equipo.	1M	Pred.	3
8	A	3	S	N	N	S	S						Medición e inspección por tintes penetrantes de fisuras en soldadura de unión perfiles principales del equipo.	1M	Pred.	3
8	A	4	S	N	N	S	N	S					Inspección y colocación de wearing a los pernos de sujeción de planchas.	1M	Mec.	4

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 36:** Hoja de decisión del RCM del sistema de descarga

<b>Unid. Producción:</b>			Área Sur			<b>Sub-Sistema:</b>			Sistema de descarga							
<b>Planta:</b>			Concentradora			<b>Equipo:</b>			Zaranda Húmeda							
<b>Sistema:</b>			Molienda			<b>Modo Operación:</b>			Continuo							
<b>Grupo de trabajo:</b>			Planificación Molienda			<b>Líneas N°:</b>			11/12/13/14							
Referencia de información			Evaluación de consecuencias				H1 S1 O1	H2 S2 O2	H3 S3 O3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad
F	FF	FM	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
9	A	1	S	N	N	S	S						Inspección por ultrasonido del desgaste de liners.	20D	Pred.	2
9	A	1	S	N	N	S	N	N	S				Cambio de liners de sistema descarga.	4M	Mec.	4
9	A	2	S	N	N	S	N	N	S				Inspección y cambio de perno de los liners.	2M	Mec.	4
9	A	3	S	N	N	S	S						Inspección por ultrasonido del desgaste de la faldera, inspección por tintes penetrantes de fisuras.	20D	Pred.	3
9	A	4	S	N	N	S	S						Inspección por ultrasonido del desgaste de plancha de mesa, inspección por tintes penetrantes de fisuras.	25D	Pred.	3

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 37** Hoja de decisión del RCM del sistema eléctrico

<b>Unid. Producción:</b>			Área Sur						<b>Sub-Sistema:</b>			Sistema Eléctrico				
<b>Planta:</b>			Concentradora						<b>Equipo:</b>			Zaranda Húmeda				
<b>Sistema:</b>			Molienda						<b>Modo Operación:</b>			Continuo				
<b>Grupo de trabajo:</b>			Planificación Molienda						<b>Líneas N°:</b>			11/12/13/14				
Referencia de información			Evaluación de consecuencias				H1 S1	H2 S2	H3 S3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad
F	FF	FM	H	S	E	O	O1 N1	O2 N2	O3 N3	H4	H5	S4				
10	A	1	S	N	N	S	N	S					Inspección y reconexión de conectores aflojados y dañados de motores.	20D	Elec.	3
10	B	1	S	N	N	S	S						Inspección con termografía de sobrecarga y anomalías eléctricas en el variador de velocidad.	2M	Pred.	2
10	B	2	S	N	N	S	S						Inspección termográfica de sobrecarga en motor.	1M	Pred.	2
10	C	1	S	S			N	N	N	N			Rediseño redundante de aterramiento de estructura.	1M	Proy.	2
10	C	2	S	S			N	N	N	N			Rediseñar el tipo de terminales del cable por otros de mayor resistencia a la alta vibración.	1M	Proy.	2

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 38** Hoja de decisión del RCM del sistema de instrumentación

<b>Unid. Producción:</b>			Área Sur						<b>Sub-Sistema:</b>			Sistema de Instrumentación				
<b>Planta:</b>			Concentradora						<b>Equipo:</b>			Zaranda Húmeda				
<b>Sistema:</b>			Molienda						<b>Modo Operación:</b>			Continuo				
<b>Grupo de trabajo:</b>			Planificación Molienda						<b>Líneas N°:</b>			11/12/13/14				
Referencia de información			Evaluación de consecuencias				H1 S1	H2 S2	H3 S3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad
F	FF	FM	H	S	E	O	O1 N1	O2 N2	O3 N3	H4	H5	S4				
11	A	1	S	N	N	S	N	N	S				Revisión y cambio de todos los sensores de vibración.	4M	Inst.	3
11	A	2	S	N	N	S	S						Inspección de calibración de sensores de vibración.	15D	Inst.	3
11	B	1	S	S			N	N	N	N			Rediseñar el tipo de terminales del cable por otros de mayor resistencia a la alta vibración.	1M	Proy.	2
11	B	2	S	S			N	N	N	N			Rediseñar con redundancia la detención de emergencia.	1M	Proy.	2
11	C	1	S	N	N	S	N	N	S				Revisión y cambio de sensores de temperatura del S.H.	4M	Inst.	3
11	C	2	S	N	N	S	N	S					Calibración y prueba de sensores de temperatura del S.H.	1M	Inst.	3
11	D	1	S	N	N	S	N	S					Calibración y prueba de sensores de flujo de rociadores.	1M	Inst.	2
11	D	2	S	N	N	S	N	N	S				Revisión y cambio de sensores de flujo del manifold.	4M	Inst.	3

Fuente: Elaboración propia (2022)

### 3.6 Planes de mantenimiento identificadas

A continuación, se presentan los planes que clasifican las tareas de mantenimiento que se obtuvieron de la evaluación de las hojas de decisión del RCM de los sistemas que componen la zaranda húmeda de las líneas 11/12/13/14 que se evaluaron y presentaron en las Tablas N° 28 al 38. Los planes se dividen en cuatro grupos correspondiente a tareas a condición, reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica y rediseño.

#### 2.6.1 Planes de mantenimiento basado en tarea a condición

**Tabla 39** Plan de mantenimiento basado en tarea a condición

Sistema	Actividad de mantenimiento	Código de tarea	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad	Duración	HH	Equipo Operando
Sistema de accionamiento	Inspección y análisis de tintes penetrantes al eje universal del sistema de accionamiento.	PM01-TA011-01	1M	Pred.	3	3	9	No
Sistema de accionamiento	Inspección y revisión de ajuste de las polea motriz y conducida.	PM01-TA011-02	1M	Mec.	2	2	4	No
Excitadores	Inspección y análisis de tintes penetrantes a los ejes de los excitadores, análisis de vibraciones.	PM01-TA011-03	1M	Pred.	3	3	9	No
Excitadores	Inspección del ajuste y fijación de los contrapesos.	PM01-TA011-04	7D	Mec.	4	4	16	No
Excitadores	Medición del ajuste y torqueo de los pernos que unen los ejes intermedios del excitador.	PM01-TA011-05	7D	Mec.	4	2	8	No
Excitadores	Inspección por tintes penetrantes de fisuras en el acople de los excitadores.	PM01-TA011-06	1M	Pred.	3	3	9	No
Excitadores	Medición de desalineamiento, análisis de vibraciones irregulares de los excitadores.	PM01-TA011-07	7D	Pred.	3	2	6	Si/No
Excitadores	Inspección por tintes penetrantes de fisuras en cojinetes, inspección por ultrasonido de desgaste.	PM01-TA011-08	2M	Pred.	3	3	9	No
Excitadores	Medición de nivel del reservorio del aceite lubricante.	PM01-TA011-09	7D	Mec.	3	2	6	Si
Excitadores	Inspección y ajuste de tapas de rodamiento de los excitadores.	PM01-TA011-10	2M	Mec.	3	2	6	No
Deck	Inspección y medición de deformaciones del deck.	PM01-TA011-11	10D	Mec.	3	3	9	No
Deck	Medición del torque y reajuste de los pernos del deck.	PM01-TA011-12	7D	Mec.	3	4	12	No

Deck	Medición de la desviación del set del ángulo del deck, análisis de vibraciones por soltura.	PM01-TA011-13	7D	Pred.	3	3	9	No
Deck	Inspección de obstrucciones, análisis de vibraciones por acumulación de mineral.	PM01-TA011-14	15D	Pred.	3	2	6	No
Sistema hidráulico	Medición de presión, inspección de las mangueras, medición con termografía de fugas de aceite.	PM01-TA011-15	2M	Pred.	3	3	9	Si
Sistema hidráulico	Inspección de fisura de conectores por tintes penetrantes.	PM01-TA011-16	1M	Pred.	3	4	12	No
Sistema de traslación	Inspección y análisis de tintes penetrantes al eje del reductor y rieles de traslación.	PM01-TA011-17	2M	Pred.	3	4	12	No
Sistema de resortes	Inspección de corrosión en resortes.	PM01-TA011-18	2M	Mec.	3	3	9	No
Sistema de resortes	Medición de inclinación del equipo, análisis de vibraciones en diversos puntos.	PM01-TA011-19	15D	Pred.	3	2	6	No
Sistema de resortes	Medición de torqueo y ajuste de pernos de sujeción de resortes.	PM01-TA011-20	15D	Mec.	3	2	6	No
Sistema estructural y placas	Medición e inspección por tintes penetrantes de fisuras en perfiles principales del equipo.	PM01-TA011-21	1M	Pred.	3	3	9	No
Sistema estructural y placas	Medición e inspección por tintes penetrantes de fisuras en la soldadura de unión de perfiles principales del equipo.	PM01-TA011-22	1M	Pred.	3	3	9	No
Sistema de descarga	Inspección por ultrasonido del desgaste de liners.	PM01-TA011-23	20D	Pred.	2	3	6	No
Sistema de descarga	Inspección por ultrasonido del desgaste de la faldera, inspección por tintes penetrantes de fisuras.	PM01-TA011-24	20D	Pred.	3	3	9	No
Sistema de descarga	Inspección por ultrasonido del desgaste de la plancha de la mesa, inspección por tintes penetrantes de fisuras.	PM01-TA011-25	25D	Pred.	3	3	9	No
Sistema Eléctrico	Inspección con termografía de sobrecarga y anomalías eléctricas en el variador de velocidad.	PM01-TA011-26	2M	Pred.	2	2	4	Si
Sistema Eléctrico	Inspección con termografía de sobrecarga y anomalías eléctricas en el motor.	PM01-TA011-27	1M	Pred.	2	2	4	Si
Sistema instrumentación	Inspección del nivel de calibración de los sensores de vibración.	PM01-TA011-28	15D	Inst.	3	2	6	No

Fuente: Elaboración propia (2022)

### 3.6.2 Planes de mantenimiento mediante reacondicionamiento cíclico

**Tabla 40:** Plan de mantenimiento mediante reacondicionamiento cíclico

Sistema	Actividad de mantenimiento	Código de tarea	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad	Duración	HH	Equipo Operando
Sistema de accionamiento	Inspección del motor, medición de amperaje y pruebas de aislamiento, reparación bobinada.	PM02-RC011-01	4M	Elec.	3	6	18	No
Excitadores	Revisión y limpieza de los respiraderos del sistema hidráulico de los excitadores.	PM02-RC011-02	1M	Mec.	3	4	12	No
Deck	Ajuste de la posición y juntas del deck de acuerdo al torque recomendado por el fabricante.	PM02-RC011-03	15D	Mec.	4	8	32	No
Sistema de rocío de agua	Apertura y limpieza de alimentación de sistema de rociadores, pruebas de flushing.	PM02-RC011-04	4M	Mec.	3	6	18	No
Sistema hidráulico	Limpieza y pruebas de estanqueidad del sistema de tuberías del sistema de lubricación.	PM02-RC011-05	3M	Mec.	4	4	16	No
Sistema hidráulico	Revisión y reparación de los estatores, bobinado, y componentes móviles del motor.	PM02-RC011-06	4M	Elec.	3	6	18	No
Sistema de traslación	Inspección y limpieza de los rieles, engranes y juntas de la traslación.	PM02-RC011-07	1M	Mec.	3	4	12	No
Sistema de traslación	Reparación de rieles deformados, soldadura de rieles fisurados, refuerzo con perfiles.	PM02-RC011-08	2M	Mec.	3	6	18	No
Sistema de resortes	Inspección y limpieza de material acumulado en resortes.	PM02-RC011-09	7D	Mec.	3	4	12	No
Sistema estructural y placas	Inspección y colocación de wearing a los pernos para protección.	PM02-RC011-10	7D	Mec.	3	6	18	No
Sistema estructural y placas	Inspección y colocación de wearing a los pernos de sujeción de planchas.	PM02-RC011-11	1M	Mec.	4	6	24	No
Sistema Eléctrico	Inspección y reconexión de conectores aflojados y dañados de motores.	PM02-RC011-12	20D	Elec.	3	3	9	No
Sistema instrumentación	Calibración y prueba de sensores de temperatura de sistema hidráulico.	PM02-RC011-13	1M	Inst.	3	3	9	No
Sistema instrumentación	Calibración y prueba de sensores de flujo de sistema de rociadores.	PM02-RC011-14	1M	Inst.	2	3	6	No

Fuente: Elaboración propia (2022)

### 3.6.3 Planes de mantenimiento mediante sustitución cíclica

**Tabla 41:** Plan de mantenimiento mediante sustitución cíclica

Sistema	Actividad de mantenimiento	Código de tarea	Frecuencia	Ejecutor	Cantidad	Duración	HH	Equipo Operando
Sistema accionamiento	Inspección y cambio de correa del sistema de accionamiento.	PM03-SC011-01	2M	Mec.	2	4	8	No
Sistema accionamiento	Cambio y ajuste de correa de transmisión de sistema de accionamiento.	PM03-SC011-02	2M	Mec.	3	4	12	No
Sistema accionamiento	Inspección y cambio de sistema accionamiento.	PM03-SC011-03	6M	Mec.	4	12	48	No
Excitadores	Revisión y cambio de la carcasa, sello, y empaquetadura de los cojinetes del excitador.	PM03-SC011-04	2M	Mec.	3	6	18	No
Excitadores	Cambio de sistema de excitadores.	PM03-SC011-05	6M	Mec.	6	12	72	No
Deck	Cambio sistema de mallas del deck	PM03-SC011-06	4M	Mec.	4	12	48	No
Sistema de rocío de agua	Revisión y cambio de la válvula mariposa del manifold del sistema de rociadores de agua.	PM03-SC011-07	6M	Mec.	3	4	12	No
Sistema de rocío de agua	Revisión y cambio de sistema de bomba del sistema de rociadores.	PM03-SC011-08	3M	Mec.	3	6	18	No
Sistema hidráulico	Revisión y cambio de los filtros y aceite lubricante.	PM03-SC011-09	4M	Mec.	4	6	24	No
Sistema hidráulico	Inspección y cambio de sistema de bomba de aceite lubricante.	PM03-SC011-10	6M	Mec.	4	6	24	No
Sistema hidráulico	Cambio de válvulas de control de sistema de lubricación.	PM03-SC011-11	6M	Mec.	4	6	24	No
Sistema de traslación	Cambio de engranajes del reductor del sistema de traslación.	PM03-SC011-12	4M	Mec.	3	6	18	No
Sistema de resortes	Cambio de resortes de suspensión.	PM03-SC011-13	4M	Mec.	5	10	50	No
Sistema de descarga	Cambio de liners de sistema descarga.	PM03-SC011-14	4M	Mec.	4	10	40	No
Sistema de descarga	Inspección y cambio de perno de los liners.	PM03-SC011-15	2M	Mec.	4	6	24	No
Sistema instrumentación	Revisión y cambio de todos los sensores de vibración del equipo.	PM03-SC011-16	4M	Inst.	3	6	18	No
Sistema instrumentación	Revisión y cambio de todos los sensores de temperatura del sistema de lubricación.	PM03-SC011-17	4M	Inst.	3	3	9	No
Sistema instrumentación	Revisión y cambio de todos los sensores de flujo del sistema de rociadores del equipo.	PM03-SC011-18	4M	Inst.	3	3	9	No

Fuente: Elaboración propia (2022)

### 3.6.4 Plan de Proyectos de evaluación y rediseño de tareas de mantenimiento

**Tabla 42** Proyectos de evaluación y rediseño de tareas de mantenimiento

Sistema	Proyecto de Ingeniería	Código de tarea	Ejecutor	Cantidad	Duración	HH	Equipo Operando
Sistema de accionamiento	Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de especificaciones de polea antes de la instalación.	P01-RI011-01	Proy.	2	8	16	Si
Sistema de accionamiento	Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de especificaciones de la correa de transmisión antes de la instalación.	P01-RI011-02	Proy.	2	8	16	Si
Excitadores	Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de especificaciones del contrapeso antes de la instalación.	P01-RI011-03	Proy.	2	8	16	Si
Excitadores	Rediseñar proceso, adicionar check list y prueba de muestreo para verificación del aceite lubricante antes del llenado.	P01-RI011-04	Proy.	2	8	16	Si
Sistema hidráulico	Rediseñar proceso, adicionar check list y prueba de muestreo para verificación del aceite lubricante antes del llenado.	P01-RI011-05	Proy.	2	8	16	Si
Sistema de resortes	Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de las especificaciones del resorte antes de la instalación.	P01-RI011-06	Proy.	2	8	16	Si
Sistema de resortes	Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de las especificaciones del resorte antes de la instalación.	P01-RI011-07	Proy.	2	8	16	Si
Sistema Eléctrico	Rediseño con protección redundante de sistema de aterramiento de estructura.	P01-RI011-08	Proy.	2	8	16	Si
Sistema Eléctrico	Rediseñar el tipo de terminales del cable por otros de mayor resistencia a la alta vibración.	P01-RI011-09	Proy.	2	8	16	Si
Sistema instrumentación	Rediseñar el tipo de terminales del cable por otros de mayor resistencia a la alta vibración.	P01-RI011-10	Proy.	2	8	16	Si
Sistema instrumentación	Rediseñar con redundancia el sistema de detención de emergencia.	P01-RI011-11	Proy.	2	8	16	Si

*Fuente: Elaboración propia (2022)*

En las Tablas N° 28 al 38, se presenta los planes agrupados en 4 categorías, se especifica el código de tarea para su registro en el sistema, con la duración y cantidad de personal. Para el plan de mantenimiento basado en tarea a condición se aprecia que la actividad se ejecuta en su mayoría por personal de mantenimiento predictivo, dichas tareas incluyen el análisis mediante vibraciones, tintes penetrantes, termografía, ultrasonido para evaluar la tendencia y el rango de los diversos parámetros de sistemas de la zaranda. La compañía se soporta de empresas especializadas que disponen del equipamiento y personal calificado para ejecutar dichas tareas, que en algunos casos se pueden realizar sin paralizar el equipo. Como se aprecia en la Tabla N° 40, para el plan de mantenimiento mediante reacondicionamiento cíclico, dichas tareas buscan la continuidad de las funciones del equipo por un periodo de tiempo deseado, dichas tareas se ejecutan con el equipo detenido dado que se intervendrán los diversos sistemas. En la Tabla N° 41, se aprecia para el plan de mantenimiento por sustitución cíclica, de la misma manera la continuación de las funciones que realiza el equipo mediante la sustitución de componentes que han sido evaluados y que dispone de información de las tareas de mantenimiento basado en condición, las tareas se ejecutan con el equipo detenido. Para ejecutar dichas actividades, se requiere del suministro de componentes de los proveedores locales con la debida anticipación para asegurar su utilización de acuerdo a las frecuencias establecidas. Para el plan de proyectos de rediseño, en su mayoría se busca rediseñar la revisión a detalle de los componentes para asegurar que correspondan a las especificaciones requeridas, la elaboración del check list se realiza por el área de proyectos.

### 3.7 Análisis de costos de los planes de mantenimiento

El costo de las tareas es determinado en base a la tarifa de mano de obra, costo de materiales, tarifas de herramientas y equipos utilizados para llevar a cabo las tareas propuestas en los tiempos determinados, a continuación, se presenta los costos de los planes.

#### 3.7.1 Costo del plan de mantenimiento mediante Tarea a condición

**Tabla 43:** Costo del plan de mantenimiento mediante tarea a condición

Sistema	Actividad de mantenimiento	Código de tarea	Frec.	Ejecutor	Cant.	Duración	HH	Equipo Operando	Costo HH (\$)	Costo Material (\$)	Costo Equipos (\$)	Costo Tarea (\$)	Costo Anual (\$)
Sistema de accionamiento	Inspección y análisis de tintes penetrantes al eje universal del sistema de accionamiento.	PM01-TA011-01	1M	Pred.	3	3	9	No	17	91.8	168.3	413.1	4,957.20
Sistema de accionamiento	Inspección y revisión de ajuste de las polea motriz y conducida.	PM01-TA011-02	1M	Mec.	2	2	4	No	13	31.2	57.2	140.4	1,684.80
Excitadores	Inspección y análisis de tintes penetrantes a los ejes de los excitadores, análisis de vibraciones.	PM01-TA011-03	1M	Pred.	3	3	9	No	17	91.8	168.3	413.1	4,957.20
Excitadores	Inspección del ajuste y fijación de los contrapesos.	PM01-TA011-04	7D	Mec.	4	4	16	No	13	124.8	228.8	561.6	28,882.29
Excitadores	Medición del ajuste y torqueo de los pernos que unen los ejes intermedios del excitador.	PM01-TA011-05	7D	Mec.	4	2	8	No	13	62.4	114.4	280.8	14,441.14
Excitadores	Inspección por tintes penetrantes de fisuras en el acople de los excitadores.	PM01-TA011-06	1M	Pred.	3	3	9	No	17	91.8	168.3	413.1	4,957.20
Excitadores	Medición de desalineamiento, análisis de vibraciones irregulares de los excitadores.	PM01-TA011-07	7D	Pred.	3	2	6	No	17	61.2	112.2	275.4	14,163.43
Excitadores	Inspección por tintes penetrantes de fisuras en cojinetes, inspección por ultrasonido de desgaste.	PM01-TA011-08	2M	Pred.	3	3	9	No	17	91.8	168.3	413.1	2,478.60
Excitadores	Medición de nivel del reservorio del aceite lubricante.	PM01-TA011-09	7D	Mec.	3	2	6	Si	13	46.8	85.8	210.6	10,830.86
Excitadores	Inspección y ajuste de tapas de rodamiento de los excitadores.	PM01-TA011-10	2M	Mec.	3	2	6	No	13	46.8	85.8	210.6	1,263.60
Deck	Inspección y medición de deformaciones del deck.	PM01-TA011-11	10D	Mec.	3	3	9	No	13	70.2	128.7	315.9	11,372.40
Deck	Medición del torque y reajuste de los pernos del deck.	PM01-TA011-12	7D	Mec.	3	4	12	No	13	93.6	171.6	421.2	21,661.71
Deck	Medición de la desviación del set del ángulo del deck, análisis de vibraciones por soldadura.	PM01-TA011-13	7D	Pred.	3	3	9	No	17	91.8	168.3	413.1	21,245.14

Deck	Inspección de obstrucciones, análisis de vibraciones por acumulación de mineral.	PM01-TA011-14	15D	Pred.	3	2	6	No	17	61.2	112.2	275.4	6,609.60
Sistema hidráulico	Medición de la presión, inspección de las mangueras, medición con termografía de fugas de aceite.	PM01-TA011-15	2M	Pred.	3	3	9	Si	17	91.8	168.3	413.1	2,478.60
Sistema hidráulico	Inspección de fisura de conectores por tintes penetrantes.	PM01-TA011-16	1M	Pred.	3	4	12	No	17	122.4	224.4	550.8	6,609.60
Sistema de traslación	Inspección y análisis de tintes penetrantes al eje del reductor y rieles de traslación.	PM01-TA011-17	2M	Pred.	3	4	12	No	17	122.4	224.4	550.8	3,304.80
Sistema de resortes	Inspección de corrosión en resortes.	PM01-TA011-18	2M	Mec.	3	3	9	No	13	70.2	128.7	315.9	1,895.40
Sistema de resortes	Medición de inclinación del equipo, análisis de vibraciones en diversos puntos.	PM01-TA011-19	15D	Pred.	3	2	6	No	17	61.2	112.2	275.4	6,609.60
Sistema de resortes	Medición de torqueo y ajuste de pernos de sujeción de resortes.	PM01-TA011-20	15D	Mec.	3	2	6	No	13	46.8	85.8	210.6	5,054.40
Sistema estructural y placas	Medición e inspección por tintes penetrantes de fisuras en perfiles principales del equipo.	PM01-TA011-21	1M	Pred.	3	3	9	No	17	91.8	168.3	413.1	4,957.20
Sistema estructural y placas	Medición e inspección por tintes penetrantes de fisuras en la soldadura de unión de perfiles principales del equipo.	PM01-TA011-22	1M	Pred.	3	3	9	No	17	91.8	168.3	413.1	4,957.20
Sistema de descarga	Inspección por ultrasonido del desgaste de liners.	PM01-TA011-23	20D	Pred.	2	3	6	No	17	61.2	112.2	275.4	4,957.20
Sistema de descarga	Inspección por ultrasonido del desgaste de la faldera, inspección por tintes penetrantes de fisuras.	PM01-TA011-24	20D	Pred.	3	3	9	No	17	91.8	168.3	413.1	7,435.80
Sistema de descarga	Inspección por ultrasonido del desgaste de la plancha de la mesa, inspección por tintes penetrantes de fisuras.	PM01-TA011-25	25D	Pred.	3	3	9	No	17	91.8	168.3	413.1	5,948.64
Sistema Eléctrico	Inspección con termografía de sobrecarga y anomalías eléctricas en el variador de velocidad.	PM01-TA011-26	2M	Pred.	2	2	4	Si	17	40.8	74.8	183.6	1,101.60
Sistema Eléctrico	Inspección con termografía de sobrecarga y anomalías eléctricas en el motor.	PM01-TA011-27	1M	Pred.	2	2	4	Si	17	40.8	74.8	183.6	2,203.20
Sistema instrumentación	Inspección del nivel de calibración de los sensores de vibración.	PM01-TA011-28	15D	Inst.	3	2	6	No	14	50.4	92.4	226.8	5,443.20
												<b>Total \$</b>	<b>212,461.61</b>

Fuente: Elaboración propia (2022)

### 3.7.2 Costo del plan de mantenimiento mediante reacondicionamiento cíclico

**Tabla 44:** Costo del plan de mantenimiento mediante reacondicionamiento cíclico

Sistema	Actividad de mantenimiento	Código de tarea	Frec.	Ejecutor	Cant.	Duración	HH	Equipo Operando	Costo HH (\$)	Costo Material (\$)	Costo Equipos (\$)	Costo Tarea (\$)	Costo Anual (\$)
Sistema de accionamiento	Inspección del motor, medición de amperaje y pruebas de aislamiento, reparación bobinada.	PM02-RC011-01	4M	Elec.	3	6	18	No	13	140.4	257.4	631.8	1,895.40
Excitadores	Revisión y limpieza de los respiraderos del sistema hidráulico de los excitadores.	PM02-RC011-02	1M	Mec.	3	4	12	No	13	93.6	171.6	421.2	5,054.40
Deck	Ajuste de la posición y juntas del deck de acuerdo al torque recomendado por el fabricante.	PM02-RC011-03	15D	Mec.	4	8	32	No	13	249.6	457.6	1123.2	26,956.80
Sistema de rocío de agua	Apertura y limpieza de alimentación de sistema de rociadores, pruebas de flushing.	PM02-RC011-04	4M	Mec.	3	6	18	No	13	140.4	257.4	631.8	1,895.40
Sistema hidráulico	Limpieza y pruebas de estanqueidad del sistema de tuberías del sistema de lubricación.	PM02-RC011-05	3M	Mec.	4	4	16	No	13	124.8	228.8	561.6	2,246.40
Sistema hidráulico	Revisión y reparación de los estatores, bobinado, y componentes móviles del motor.	PM02-RC011-06	4M	Elec.	3	6	18	No	13	140.4	257.4	631.8	1,895.40
Sistema de traslación	Inspección y limpieza de los rieles, engranes y juntas de la traslación.	PM02-RC011-07	1M	Mec.	3	4	12	No	13	93.6	171.6	421.2	5,054.40
Sistema de traslación	Reparación de rieles deformados, soldadura de rieles fisurados, refuerzo con perfiles.	PM02-RC011-08	2M	Mec.	3	6	18	No	13	140.4	257.4	631.8	3,790.80
Sistema de resortes	Inspección y limpieza de material acumulado en resortes.	PM02-RC011-09	7D	Mec.	3	4	12	No	13	93.6	171.6	421.2	21,661.71
Sistema estructural y placas	Inspección y colocación de wearing a los pernos para protección.	PM02-RC011-10	7D	Mec.	3	6	18	No	13	140.4	257.4	631.8	32,492.57
Sistema estructural y placas	Inspección y colocación de wearing a los pernos de sujeción de planchas.	PM02-RC011-11	1M	Mec.	4	6	24	No	13	187.2	343.2	842.4	10,108.80
Sistema Eléctrico	Inspección y reconexión de conectores alojados y dañados de motores.	PM02-RC011-12	20D	Elec.	3	3	9	No	13	70.2	128.7	315.9	5,686.20
Sistema instrumentación	Calibración y prueba de sensores de temperatura de sistema hidráulico.	PM02-RC011-13	1M	Inst.	3	3	9	No	14	75.6	138.6	340.2	4,082.40
Sistema instrumentación	Calibración y prueba de sensores de flujo de sistema de rociadores.	PM02-RC011-14	1M	Inst.	2	3	6	No	14	50.4	92.4	226.8	2,721.60
<b>Total \$</b>												<b>125,542.29</b>	

Fuente: Elaboración propia (2022)

### 3.7.3 Costo del plan de mantenimiento mediante sustitución cíclica

**Tabla 45:** Costo del plan de mantenimiento mediante sustitución cíclica

Sistema	Actividad de mantenimiento	Código de tarea	Frec.	Ejecutor	Cant.	Duración	HH	Equipo Operando	Costo HH (\$)	Costo Material (\$)	Costo Equipos (\$)	Costo Tarea (\$)	Costo Anual (\$)
Sistema de accionamiento	Inspección y cambio de correa del sistema de accionamiento.	PM03-SC011-01	2M	Mec.	2	4	8	No	13	145.6	49.9	299.52	1,797.12
Sistema de accionamiento	Cambio y ajuste de correa de transmisión de sistema de accionamiento.	PM03-SC011-02	2M	Mec.	3	4	12	No	13	218.40	74.9	449.28	2,695.68
Sistema de accionamiento	Inspección y cambio de sistema de accionamiento.	PM03-SC011-03	6M	Mec.	4	12	48	No	13	22,000.00	1583.7	24,207.68	48,415.36
Excitadores	Revisión y cambio de la carcasa, sello, y empaquetadura de los cojinetes del excitador.	PM03-SC011-04	2M	Mec.	3	6	18	No	13	327.60	39.3	600.91	3,605.47
Excitadores	Cambio de sistema de excitadores.	PM03-SC011-05	6M	Mec.	6	12	72	No	13	31,000.00	2235.5	34,171.52	68,343.04
Deck	Cambio sistema de mallas del deck	PM03-SC011-06	4M	Mec.	4	12	48	No	13	37,000.00	2633.7	40,257.68	120,773.04
Sistema de rocío de agua	Revisión y cambio de la válvula mariposa del manifold del sistema de rociadores de agua.	PM03-SC011-07	6M	Mec.	3	4	12	No	13	218.40	26.2	400.61	801.22
Sistema de rocío de agua	Revisión y cambio de sistema de bomba del sistema de rociadores.	PM03-SC011-08	3M	Mec.	3	6	18	No	13	2,800.00	212.4	3,246.38	12,985.52
Sistema hidráulico	Revisión y cambio de los filtros y aceite lubricante.	PM03-SC011-09	4M	Mec.	4	6	24	No	13	6,400.00	469.8	7,181.84	21,545.52
Sistema hidráulico	Inspección y cambio de sistema de bomba de aceite lubricante.	PM03-SC011-10	6M	Mec.	4	6	24	No	13	2,200.00	175.8	2,687.84	5,375.68
Sistema hidráulico	Cambio de válvulas de control de sistema de lubricación.	PM03-SC011-11	6M	Mec.	4	6	24	No	13	4,300.00	322.8	4,934.84	9,869.68
Sistema de traslación	Cambio de engranajes del reductor del sistema de traslación.	PM03-SC011-12	4M	Mec.	3	6	18	No	13	3,500.00	261.4	3,995.38	11,986.14
Sistema de resortes	Cambio de resortes de suspensión.	PM03-SC011-13	4M	Mec.	5	10	50	No	13	14,000.00	1025.5	15,675.50	47,026.50
Sistema de descarga	Cambio de liners de sistema descarga.	PM03-SC011-14	4M	Mec.	4	10	40	No	13	7,000.00	526.4	8,046.40	24,139.20
Sistema de descarga	Inspección y cambio de perno de los liners.	PM03-SC011-15	2M	Mec.	4	6	24	No	13	1,600.00	133.8	2,045.84	12,275.04
Sistema instrumentación	Revisión y cambio de todos los sensores de vibración del equipo.	PM03-SC011-16	4M	Inst.	3	6	18	No	14	4,800.00	353.6	5,405.64	16,216.92
Sistema instrumentación	Revisión y cambio de todos los sensores de temperatura del sistema de lubricación.	PM03-SC011-17	4M	Inst.	3	3	9	No	14	2,800.00	204.8	3,130.82	9,392.46
Sistema instrumentación	Revisión y cambio de todos los sensores de flujo del sistema de rociadores del equipo.	PM03-SC011-18	4M	Inst.	3	3	9	No	14	1,200.00	92.8	1,418.82	4,256.46
												<b>Total \$</b>	<b>421,500.05</b>

Fuente: Elaboración propia (2022)

### 3.7.4 Costo del proyecto de evaluación y rediseño de tarea de mantenimiento

**Tabla 46:** Costo del proyecto de evaluación y rediseño de tarea de mantenimiento

Sistema	Actividad de mantenimiento	Código de tarea	Frec.	Ejecutor	Cant.	Duración	HH	Equipo Operando	Costo HH (\$)	Costo Material (\$)	Costo Equipos (\$)	Costo Tarea (\$)	Costo Anual (\$)
Sistema de accionamiento	Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de especificaciones de polea antes de la instalación.	P01-RI011-01	1M	Proy.	2	8	16	Si	18	28.8	28.8	345.6	4,147.20
Sistema de accionamiento	Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de especificaciones de la correa de transmisión antes de la instalación.	P01-RI011-02	1M	Proy.	2	8	16	Si	18	28.8	28.8	345.6	4,147.20
Excitadores	Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de especificaciones del contrapeso antes de la instalación.	P01-RI011-03	1M	Proy.	2	8	16	Si	18	28.8	28.8	345.6	4,147.20
Excitadores	Rediseñar proceso, adicionar check list y prueba de muestreo para verificación del aceite lubricante antes del llenado.	P01-RI011-04	1M	Proy.	2	8	16	Si	18	28.8	28.8	345.6	4,147.20
Sistema hidráulico	Rediseñar proceso, adicionar check list y prueba de muestreo para verificación del aceite lubricante antes del llenado.	P01-RI011-05	1M	Proy.	2	8	16	Si	18	28.8	28.8	345.6	4,147.20
Sistema de resortes	Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de la especificaciones del resorte antes de la instalación.	P01-RI011-06	1M	Proy.	2	8	16	Si	18	28.8	28.8	345.6	4,147.20
Sistema de resortes	Rediseñar proceso, adicionar check list de verificación de la especificaciones del resorte antes de la instalación.	P01-RI011-07	1M	Proy.	2	8	16	Si	18	28.8	28.8	345.6	4,147.20
Sistema Eléctrico	Rediseño con protección redundante de sistema de aterramiento de estructura.	P01-RI011-08	1M	Proy.	2	8	16	Si	18	28.8	28.8	345.6	4,147.20
Sistema Eléctrico	Rediseñar el tipo de terminales del cable por otros de mayor resistencia a la alta vibración.	P01-RI011-09	1M	Proy.	2	8	16	Si	18	28.8	28.8	345.6	4,147.20
Sistema instrumentación	Rediseñar el tipo de terminales del cable por otros de mayor resistencia a la alta vibración.	P01-RI011-10	1M	Proy.	2	8	16	Si	18	28.8	28.8	345.6	4,147.20
Sistema instrumentación	Rediseñar con redundancia el sistema de detención de emergencia.	P01-RI011-11	1M	Proy.	2	8	16	Si	18	28.8	28.8	345.6	4,147.20
<b>Total \$</b>												<b>45,619.20</b>	

Fuente: Elaboración propia (2022)

**Tabla 47:** Costo de planes de mantenimiento

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo Plan (\$)</b>
1	Plan Mantenimiento por tarea a condición	212,461.61
2	Plan Mantenimiento por reacondicionamiento cíclico	125,542.29
3	Plan Mantenimiento por sustitución cíclica	421,500.05
4	Proyecto de evaluación y Rediseño	45,619.20
<b>Costo Anual RCM (\$)</b>		805,123.15
<b>Costo Mensual RCM (\$)</b>		67,093.60

*Fuente: Elaboración propia (2022)*

Como se aprecia en la Tabla N° 43 al 46, se muestra los costos de planes de mantenimiento y rediseño. El plan de mantenimiento por sustitución cíclica, tiene mayor monto en comparación de los demás planes, y es que dichas tareas corresponden al reemplazo de componentes de la zaranda como parrillas deck, sistema de resortes, que al realizar el cambio de uno deben cambiarse los demás para no generar desnivel en el equipo y por recomendaciones del fabricante. El monto siguiente corresponde a mantenimiento por tarea a condición, debido al tipo de tarea se utiliza equipos sofisticados y personal capacitado, además que la frecuencia de las tareas es mayor en comparación de los demás planes. El menor monto corresponde al rediseño, debido que solo se realizarán mejoras del sistema de revisión de componentes, el costo de dichas tareas es en mayor proporción por horas hombre y bajos costos de materiales y equipos.

El costo total de los planes de mantenimiento representa el costo total del proyecto del RCM, la inversión en este punto será por incremento del presupuesto de mantenimiento preventivo del periodo anterior.

## CAPITULO IV ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Criterios utilizados

Para la determinación de la disponibilidad, se evaluó el MTBF y MTTR solo para el primer año de implementación del RCM, es posible que los valores mejoren en los siguientes años de implementación de la metodología, pues como se ha visto en otras implementaciones, los efectos en la disponibilidad tienden a aumentar durante los siguientes años debido a una mayor adaptación y conocimiento del personal del RCM. Para la evaluación económica, se considera el aprovechamiento de las horas de producción que varían con respecto a la disponibilidad del año anterior antes de la implementación del RCM, como se conoce la tarifa de la compañía por la hora producida de la zaranda húmeda, el total de horas producidas reflejadas en costo nos representara el beneficio, a esto se le descuenta los costos de capacitación por la implementación de la metodología, además se descuenta el costo de implementar los diversos planes de mantenimiento determinados con la metodología. Una vez evaluado el beneficio se realizará la evaluación del retorno de la inversión (ROI) para evaluar la rentabilidad del proyecto.

### 4.2 Cálculo de indicadores de mantenimiento

A continuación, en la Tabla N° 4.1 se muestra el cálculo del MTBF, MTTR y disponibilidad de las zarandas posterior a la implementación del RCM, en la tabla se muestra las horas programadas, hora paralizadas y número de fallas para cada una de las zarandas de las cuatro líneas durante todos los meses del año.

**Tabla 48:** Reporte horas programadas y disponibilidad de zarandas húmedas 11-12-13-14 después del RCM

Superintendencia: M Área: Planif. Molienda		REPORTE DISPONIBILIDAD DE ZARANDAS LINEAS 11-14						Rev.: 1
Mes	Equipo	Horas Prog.	Horas Real	TR	N° Fallas	MTBF	MTTR	Disponibilidad MTBF/(MTBF+MTTR)
Ene-22	P1-17-ZD-11	692	562	130	6	93.67	21.67	81.21%
	P1-17-ZD-12		579	113	3	193.00	37.67	83.67%
	P1-17-ZD-13		618	74	5	123.60	14.80	89.31%
	P1-17-ZD-14		578	114	1	578.00	114.00	83.53%
Feb-22	P1-17-ZD-11	684	604	80	6	100.67	13.33	88.30%
	P1-17-ZD-12		557	127	4	139.25	31.75	81.43%
	P1-17-ZD-13		565	119	2	282.50	59.50	82.60%
	P1-17-ZD-14		585	99	8	73.13	12.38	85.53%
Mar-22	P1-17-ZD-11	678	570	108	7	81.43	15.43	84.07%
	P1-17-ZD-12		592	86	1	592.00	86.00	87.32%
	P1-17-ZD-13		589	89	2	294.50	44.50	86.87%
	P1-17-ZD-14		595	83	8	74.38	10.38	87.76%
Abr-22	P1-17-ZD-11	670	596	74	4	149.00	18.50	88.96%
	P1-17-ZD-12		550	120	4	137.50	30.00	82.09%
	P1-17-ZD-13		585	85	5	117.00	17.00	87.31%
	P1-17-ZD-14		548	122	3	182.67	40.67	81.79%
May-22	P1-17-ZD-11	684	593	91	3	197.67	30.33	86.70%
	P1-17-ZD-12		592	92	6	98.67	15.33	86.55%
	P1-17-ZD-13		614	70	5	122.80	14.00	89.77%
	P1-17-ZD-14		625	59	8	78.13	7.38	91.37%
Jun-22	P1-17-ZD-11	682	619	63	8	77.38	7.88	90.76%
	P1-17-ZD-12		566	116	4	141.50	29.00	82.99%
	P1-17-ZD-13		562	120	3	187.33	40.00	82.40%
	P1-17-ZD-14		587	95	4	146.75	23.75	86.07%
Jul-22	P1-17-ZD-11	678	590	88	7	84.29	12.57	87.02%
	P1-17-ZD-12		610	68	8	76.25	8.50	89.97%
	P1-17-ZD-13		588	90	4	147.00	22.50	86.73%
	P1-17-ZD-14		561	117	5	112.20	23.40	82.74%
Ago-22	P1-17-ZD-11	676	557	119	2	278.50	59.50	82.40%
	P1-17-ZD-12		551	125	7	78.71	17.86	81.51%
	P1-17-ZD-13		582	94	6	97.00	15.67	86.09%
	P1-17-ZD-14		579	97	8	72.38	12.13	85.65%
Set-22	P1-17-ZD-11	684	624	60	4	156.00	15.00	91.23%
	P1-17-ZD-12		572	112	1	572.00	112.00	83.63%
	P1-17-ZD-13		580	104	4	145.00	26.00	84.80%
	P1-17-ZD-14		624	60	5	124.80	12.00	91.23%
Oct-22	P1-17-ZD-11	694	560	134	3	186.67	44.67	80.69%
	P1-17-ZD-12		622	72	8	77.75	9.00	89.63%
	P1-17-ZD-13		568	126	2	284.00	63.00	81.84%
	P1-17-ZD-14		559	135	2	279.50	67.50	80.55%
Nov-22	P1-17-ZD-11	676	600	76	6	100.00	12.67	88.76%
	P1-17-ZD-12		567	109	7	81.00	15.57	83.88%
	P1-17-ZD-13		560	116	6	93.33	19.33	82.84%
	P1-17-ZD-14		561	115	6	93.50	19.17	82.99%
Dic-22	P1-17-ZD-11	670	558	112	5	111.60	22.40	83.28%
	P1-17-ZD-12		569	101	7	81.29	14.43	84.93%
	P1-17-ZD-13		557	113	8	69.63	14.13	83.13%
	P1-17-ZD-14		609	61	3	203.00	20.33	90.90%

Fuente: Elaboración propia (2023)

**Tabla 49:** Total de horas por incremento de disponibilidad

Equipo	Antes RCM (H)	Después de RCM (H)	Incremento anual de Disponibilidad (H)	Incremento mes de Disponibilidad (H)
Total horas anual pérdidas de 4 equipos	6673.00	4733.00	1940.00	161.67
Total horas anual perdidas por equipo	1668.25	1183.25	485.00	40.42

Fuente: Elaboración propia (2023)

Luego de la aplicación del RCM, y en base a la Tabla N° 13 y 48 la disponibilidad promedio de las zarandas de las líneas 11/12/13/14 aumento de 79.42% a 85.52%, es decir se tuvo una mejora del 6.09% con la implementación del RCM, además de ello el total de horas anual de paralización del equipo disminuyo en 485 horas por cada línea, por lo que se aprecia un aumento en la producción, en la siguiente Tabla N° 50 se detalla la disponibilidad para cada línea.

**Tabla 4.3** Resumen disponibilidad de las líneas antes y después del RCM

Equipo	Disponibilidad antes del RCM	Disponibilidad después del RCM	Incremento Disponibilidad
P1-17-ZD-11	80.16%	86.12%	5.96%
P1-17-ZD-12	78.63%	84.80%	6.17%
P1-17-ZD-13	79.07%	85.31%	6.24%
P1-17-ZD-14	79.85%	85.84%	6.00%
Disponibilidad promedio	79.42%	85.52%	6.09%

Fuente: La empresa (2023)

### 4.3 Análisis económico de la implementación del RCM

Para la evaluación del desempeño económico del impacto de la implementación del RCM se evalúa el gasto de inversión en la capacitación de la metodología, la oportunidad de utilidad de producción, la reducción del mantenimiento correctivo, y el aumento del plan de mantenimiento preventivo en comparación con RCM, esto

último significa un incremento del presupuesto del mantenimiento, que se utilizará para la implementación del mantenimiento mediante el RCM. Como resultado de los costos mencionados, se evaluará la rentabilidad de proyecto mediante el indicador del retorno de la inversión (ROI). En las siguientes tablas se presentan los montos indicados.

**Tabla 51:** Costo implementación del RCM

Ítem	Descripción	Costo Inversión (\$)
1	Asesoría y capacitación en metodología RCM	22,400.00
2	Gastos adicionales materiales oficina	12,000.00
3	Personal especialista de metodología	18,400.00
4	Sistema de registro y documentación	2,400.00
<b>Total Costo Implementación del RCM (\$)</b>		<b>55,200.00</b>

*Fuente: La empresa (2022)*

**Tabla 52:** Costo de oportunidad de producción

Ítem	Descripción del Equipo	Costo Oportunidad (\$)
1	Costo oportunidad utilidad de producción	2,425,000.00
2	Perdida de material	0.00
<b>Total Anual Oportunidad Producción (\$)</b>		<b>2,425,000.00</b>
<b>Total Mes Oportunidad Producción (\$)</b>		<b>202,083.33</b>

*Fuente: La empresa (2023)*

**Tabla 53:** Costo Mejorado PM y CM Anual

Ítem	Descripción del Equipo	Costo (\$)
1	PM 2021 Zaranda por línea de 11/12/13/14	367,000.00
2	CM 2021 Zaranda por línea de 11/12/13/14	212,860.00
<b>Total Costo Mantenimiento Anual 2021 (\$)</b>		<b>579,860.00</b>
1	CM 2022 Zaranda por línea de 11/12/13/14	187,316.80
2	Costo RCM Zaranda por línea de 11/12/13/14	805,123.15
<b>Total Costo Mantenimiento Anual 2022 (\$)</b>		<b>992,439.95</b>
<b>Incremento Costos de Mantenimiento Anual (\$)</b>		<b>412,579.95</b>

*Fuente: La empresa (2023)*

Los costos indicados en las Tablas N° 47, 51, 52, y 53, se utilizan para evaluar el desempeño económico del proyecto, como se aprecia en la Tabla N° 47 para los costos de planes de mantenimiento como resultado de las tareas del RCM. En la Tabla N° 51 se indica los costos de capacitación al personal de mantenimiento y operaciones para la implementación de la metodología, aquí se cubre todos los costos administrativos y capacitación. En la Tabla N° 52 se muestra el costo de oportunidad de la utilidad de producción de las horas reducidas de paralización como resultado de la implementación de la metodología que corresponde a 485 horas y a 5,000 \$/hora por cada línea.

En la Tabla N° 53, se muestra los costos de mantenimiento preventivo y correctivo correspondiente al 2021 por cada zaranda de las líneas 11, 12, 13 y 14, y mantenimiento correctivo y costo de implementación del RCM del 2022, se aprecia una reducción del costo de mantenimiento correctivo en \$ 25, 543.20 correspondiente al 12%, lo que significa una oportunidad dado que es una mejora, por otro lado, para el 2022 se muestra el costo del RCM mientras que en el 2021 se muestra el costo del mantenimiento preventivo, y esto es debido a que la implementación del RCM para el año 2022 contiene el mantenimiento preventivo del equipo. Dicho costo aumento debido a las demás tareas asociados al RCM como las tareas de mantenimiento por tareas a condición, reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica y rediseño. Los costos mencionados en las tablas anteriores se utilizarán para evaluar el desempeño económico, como se muestra en la siguiente Tabla N° 54.

**Tabla 54:** Flujo económico anual del proyecto RCM

FLUJO DE CAJA	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Capacitación implementación RCM y PM	-55,200.00												
Reducción Mantenimiento Correctivo		2,128.60	2,128.60	2,128.60	2,128.60	2,128.60	2,128.60	2,128.60	2,128.60	2,128.60	2,128.60	2,128.60	2,128.60
Implementación RCM-PM 2021		-36,510.26	-36,510.26	-36,510.26	-36,510.26	-36,510.26	-36,510.26	-36,510.26	-36,510.26	-36,510.26	-36,510.26	-36,510.26	-36,510.26
Oportunidad utilidad producción		202,083.33	202,083.33	202,083.33	202,083.33	202,083.33	202,083.33	202,083.33	202,083.33	202,083.33	202,083.33	202,083.33	202,083.33
Gastos Administrativos		-7,800.00	-7,800.00	-7,800.00	-7,800.00	-7,800.00	-7,800.00	-7,800.00	-7,800.00	-7,800.00	-7,800.00	-7,800.00	-7,800.00
<b>SALDO DE CAJA</b>	<b>-55,200.00</b>	<b>159,901.67</b>											
Tasa	1.3%												
Valor Presente Neto (VPN)	\$ 1,710,855.98												
Inversión (I)	\$ 493,323.15												
Retorno de la inversión ROI=(VPN-I)/I	246.80%												

*Fuente: La empresa (2023)*

En la Tabla N° 54, se aprecia un valor de descuento para el costo de capacitación por la implementación del RCM, por otro lado, un valor positivo por la reducción del costo del mantenimiento correctivo, y un valor de descuento por el aumento con respecto al costo del proyecto del RCM frente al costo del mantenimiento preventivo. Con respecto a la producción, se tiene un valor positivo por el costo de oportunidad de la utilidad de producción por reducción de las horas de paralización y aumento de la disponibilidad, y finalmente un valor de descuento por los costos administrativos que se incurren por la implementación del RCM. En base a la evaluación de los costos anteriores, se aprecia un valor presente neto positivo de \$ 1,710,855.98, es decir el proyecto de implementación del RCM es rentable, con una Tasa Interna de Retorno (ROI) de 246.80%.

#### 4.4 Discusión

En el presente trabajo de investigación se verifica que la aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad a los equipos del área de molienda de una planta concentradora de mineral de baja ley permite aumentar la disponibilidad del equipo de mayor criticidad, como anteriormente fue determinado, dicho equipo corresponde a la zaranda húmeda, el cual logró aumentar la disponibilidad de 79.42% a 85.52% logrando una mejora del 6.09% después del primer año y un aprovechamiento de 485 horas anual de producción por cada una de las 4 líneas del área de molienda, además de ello se verifica que la disponibilidad promedio del área supera el 85% luego de la implementación. Como anteriormente se mencionó dichos resultados corresponden al primer año, según la tendencia, es posible que la disponibilidad siga aumentando después del primer año.

Haciendo un contraste con otras investigaciones, en la tesis de pregrado “Implementación de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) para mejorar la confiabilidad de empernadores de AESA en Minera RAURA” [9] el aumento de disponibilidad fue del 81.3 % a 88.5% con un incremento del 7.2%, para nuestro caso el aumento fue del 6.09%, siendo menor el incremento. Como se vio para el caso de equipos empernadores es de menor complejidad intervenir la maquinaria en cualquier momento y realizar inspecciones, en el caso de las zarandas los equipos funcionan en cascada como parte de una línea por lo que de mayor complejidad realizar paradas para inspecciones.

## **CONCLUSIONES**

1. La disponibilidad de la zaranda se incrementó en 6.09% de 79.42% a 85.52%, lo que representa 485 horas anuales de reducción de paralizaciones por fallas en cada línea, de esta forma se cumple con los objetivos de la gerencia.
2. Se disminuyó el costo del mantenimiento correctivo en \$ 25,543.20 lo que representa una reducción de 12% entre el periodo 2021 y 2022, contribuyendo a los objetivos de la compañía.
3. La implementación genera un valor presente neto positivo de \$ 1,710,855.98 con un ROI de 246.80%, el proyecto es rentable para la compañía, y se podría recomendar su implementación a los demás equipos de la compañía.
4. El trabajo en conjunto con las diversas áreas de operaciones y mantenimiento contribuye a una mayor generación de conciencia y de información para el proyecto del RCM.

## **RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda aplicar la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad a los equipos con los siguientes valores altos de criticidad para aumentar la disponibilidad total del área de molienda.
2. Realizar el cálculo de la disponibilidad para el segundo año, y evaluar el incremento para evaluar la eficiencia del método y sus tareas.
3. Planificar las paradas de equipos para ejecutar las intervenciones en las paradas por operaciones, de esta forma reducir tiempos de parada por mantenimiento.
4. Realizar capacitaciones semanales a todo el equipo de mantenimiento, supervisores, técnicos, planificadores, sobre el impacto en las operaciones de los modos de falla, y las tareas que se realizarán para incrementar la disponibilidad.

## REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- [1] Sifonte J y Reyes-Picknell J. (2017), Reliability centered maintenance-reengineered, USA, Taylor & Francis Group.
- [2] McDermott R. y Mikulak R. Beauregard M. (2009), *The basics of FMEA*, USA, Taylor & Francis Group.
- [3] Bloom N. (2006), Reliability centered maintenance Implementation made simple. USA McGraw-Hill.
- [4] Moubray J. (2000), Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, USA, ALADON LLC.
- [5] Organización Internacional para la Estandarización (2016). ISO-14224-2016, Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos.
- [6] Rattanakunuprakarn, S. (2020). Implementación de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) en Railway Trucks [Tesis de Maestría]. Universidad de Florida, EEUU.
- [7] Bernal, C. (2017). Diseño y evaluación económica de Plan de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para sistemas de puerta de tren NS93 [Tesis Pregrado]. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- [8] Langlo, F. (2014). Aplicación de mantenimiento centrado en la confiabilidad para sistemas de perforación [Tesis de Maestría]. Universidad de Stavanger, Noruega.
- [9] Peña Ávila, F. (2022). Implementación de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) para mejorar la confiabilidad de emperadores de AESA en Minera RAURA [Tesis Pregrado]. Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú.
- [10] Pardo Figueroa, S. (2020). Aplicación del mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM) para la elaboración de un plan de mantenimiento de un molino de bolas Thyssenkrupp 12 MW [Tesis Pregrado]. Universidad Nacional San Agustín, Perú.

- [11] Indigoyen Aguilar, A. (2020). Mantenimiento centrado en la confiabilidad para incrementar la disponibilidad de la chancadora Sandvik CH870 [Tesis Pregrado]. Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú.
- [12] Manual de operación y mantenimiento, Ludowici.
- [13] Predictiva. (2020). *Análisis y Diagnóstico del Área de Mantenimiento*. Predictiva21. <https://predictiva21.com/2-2-analisis-diagnostico-mantenimiento/>