

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS DE
CONFIABILIDAD PARA LA
OPTIMIZACIÓN DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO PARA UNA EMPRESA
DE SERVICIOS PARA LA MINERÍA

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero en Mantenimiento Industrial

Alumno: Sr. Ricardo Fuenzalida Carrasco

Profesor Guía: Mg. Ing. Cristian Cuadra Urbina

2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD PARA LA OPTIMIZACIÓN DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO PARA UNA EMPRESA DE SERVICIOS PARA LA MINERÍA.

Nombre del candidato(a): Ricardo Miguel Fuenzalida Carrasco

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial con Licenciatura en Ingeniería, Vespertino.

Campus: San Joaquín; **Departamento:** Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, CRISTIAN ENRIQUE CUADRA URBINA, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

* El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 09-04-2026

Firma:



Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09-04-2026

Firma:



Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

RESUMEN

KEYWORDS: CONMINUCIÓN – CONFIABILIDAD – RCM – FMECA – ANÁLISIS DE RIESGO – DISPONIBILIDAD – CRITICIDAD DE ACTIVOS - ROI - PAYBACK

El presente trabajo de título se desarrolló en el laboratorio de conminución de una empresa de servicios para la minería, cuyo proceso productivo depende críticamente de la disponibilidad y confiabilidad de sus equipos de chancado y molienda. A partir del análisis de los registros históricos de mantenimiento del año 2024 gestionados en Fractal, se evidenció una alta recurrencia de detenciones no programadas y una predominancia de mantenimiento reactivo, impactando negativamente la continuidad operacional del laboratorio.

Frente a esta problemática, se aplicó el método Jackknife para determinar la criticidad de los activos, identificándose al Chancador Primario Salas como el equipo más crítico por su condición de activo único, su rol inicial en el proceso y su alto impacto operacional. Sobre este equipo se desarrolló la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), considerando funciones, fallas funcionales, modos de falla, análisis de consecuencias y hojas de decisión, complementada con un análisis FMECA para priorizar los modos de falla mediante el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) y diseñar un plan de mantenimiento coherente con su contexto operativo.

Los resultados evidenciaron mejoras cuantificables en el desempeño del equipo, reflejadas en un incremento de la disponibilidad operativa de 2,53 puntos porcentuales. La evaluación económica basada en análisis de riesgo estimó una reducción significativa del riesgo anual, con un ahorro potencial neto de \$36.281.660 CLP/año, considerando los costos de implementación del plan RCM y su impacto financiero evaluado mediante indicadores de ROI (219%) y Payback (5,5 meses), validando así la viabilidad técnica y económica de la propuesta.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVO GENERAL	10
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
CAPÍTULO 1 ESTABLECIMIENTO DEL CONTEXTO OPERACIONAL.....	11
1.1. RESEÑA DE LA EMPRESA	12
1.2 CONTEXTO OPERACIONAL.....	13
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y ACTIVOS PRINCIPALES	16
1.3. PIRÁMIDE DE TAXONOMÍA DE EQUIPOS	18
1.4. INDICADORES DEL LABORATORIO, DISPONIBILIDAD GENERAL Y CÁLCULO DE INDISPONIBILIDAD	19
1.6 INDICADORES TÉCNICOS DE MANTENIMIENTO	22
1.7 ANÁLISIS PRELIMINAR DE CRITICIDAD	23
1.8 ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE GESTIÓN EN FRACTAL	24
CAPÍTULO 2: ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD MEDIANTE EL MÉTODO JACKKNIFE Y DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA RCM EN EL ACTIVO MÁS CRÍTICO DEL ÁREA DE CONMINUCIÓN.....	28
2.1 ANÁLISIS DE CRITICIDAD MEDIANTE MÉTODO JACKKNIFE	29
2.2 SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM	32
2.2.1 ETAPAS DE IMPLEMENTACIÓN DEL RCM	34
2.2.2 FORMACIÓN DEL EQUIPO NATURAL DE TRABAJO	35
2.2.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO CHANCADOR PRIMARIO (SALAS)	37
2.2.4 FUNCIONES DEL EQUIPO.....	39
2.3 ANÁLISIS DEL MODO, EFECTO Y CRITICIDAD DE LA FALLA	44
2.3.1 FALLAS FUNCIONALES	46

2.3.2 MODOS DE FALLA	48
2.3.3 NÚMERO DE PRIORIDAD DE RIESGO	50
2.3.4 EFECTOS DE FALLA	56
2.3.5 HOJAS DE DECISIONES	64
2.4 PROPUESTA DE PLANES DE MANTENIMIENTO BASADOS EN RCM....	74
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA METODOLOGÍA RCM.....	77
3.1 IMPACTO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DEL EQUIPO	78
3.2 EVALUACIÓN DEL IMPACTO ECONÓMICO DEL RCM MEDIANTE ANÁLISIS DE RIESGO	83
3.4 RETORNO SOBRE LA INVERSIÓN (ROI) Y PERÍODO DE RECUPERACIÓN (PAYBACK)	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Rango de capacidad operativa según etapa del proceso	14
Tabla 1-2 Activos laboratorio conminución	15
Tabla 1-3 Principales indicadores de mantenimiento activos laboratorio conminución año 2024	20
Tabla 1-4 Frecuencias de fallas de los activos en el laboratorio de conminución.	23
Tabla 2-1 Resumen de los indicadores de confiabilidad utilizados para la construcción del grafico Jackknife.	30
Tabla 2-2 Equipos con comportamiento crítico.	31
Tabla 2-3 Especificaciones Chancador Primario Salas	38
Tabla 2-4 Fallas funcionales del chancador primario Salas.....	46
Tabla 2-5 Modos de falla del chancador primario Salas	48

Tabla 2-6 Criterio sugerido para Probabilidad de ocurrencia	51
Tabla 2-7 Criterio sugerido para Severidad de la consecuencia.	52
Tabla 2-8 Criterio sugerido para Probabilidad de detección.....	53
Tabla 2-9 NPR para cada modo de Falla	53
Tabla 2-10 Rangos NPR utilizados.	56
Tabla 2-11 Efectos de falla para modos de falla críticos.	57
Tabla 2-12 Hoja de decisión subsistema Mandíbula Movil.....	68
Tabla 2-13 Hoja de decisión subsistema Mandíbula Fija.	69
Tabla 2-14 Hoja de decisión subsistema Excéntrico.	70
Tabla 2-15 Hoja de decisión subsistema Rodamientos.	71
Tabla 2-16 Hoja de decisión subsistema Sistema de lubricación.....	72
Tabla 2-17 Hoja de decisión subsistema Estructura.	73
Tabla 3-1 TPRR de Chancador Primario Salas previo a aplicación de RCM.....	79
Tabla 3-2 TPRR de Chancador Primario Salas al aplicar RCM.	80
Tabla 3-3 Variación de disponibilidad en activo crítico.	82
Tabla 3-4 Cálculo escenario de riesgo anual previo a la aplicación de RCM.....	83
Tabla 3-5 Cálculo de escenario de riesgo anual con RCM.	85
Tabla 3-6 Costos asociados a la aplicación de RCM al activo crítico.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Diagrama de flujo sistema de preparación y análisis del material.	13
Figura 1-2 Diagrama de flujo del laboratorio de conminución.....	14
Figura 1-3 Imagen de Molino de Bolas en laboratorio de conminución	16
Figura 1-4 Pirámide de taxonomía de activos del Laboratorio de Conminución.	19
Figura 1-5 Configuración de activos más utilizada en el área de conminución.	22
Figura 2-1 Esquema general del proceso lógico del RCM.	32
Figura 2-2 Fotografía de chancador primario Salas.	40
Figura 2-3 Fotografía de placa de motor chancador primario Salas.	41
Figura 2-4 Fotografía de placas de mandíbulas chancador primario Salas.	41
Figura 2-5 Fotografía de polea conducida de chancador primario Salas.....	42

Figura 2-6 Fotografía de protección de seguridad chancador primario Salas.	42
Figura 2-7 Fotografía de vista trasera de chancador primario Salas.	43
Figura 2-8 Fotografía motor eléctrico de chancador primario Salas.	43
Figura 2-9 Hoja de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). ..	65

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1 Gráfico circular con información de cantidad de OTs.	26
Gráfico 1-2 Gráfico circular con información de cantidad de OTs correctivas por proceso.....	26
Gráfico 1-3 Gráfico circular con información de cantidad de OTs preventivas por proceso.....	27
Gráfico 2-1 Gráfico Jackknife de MTTR y número de fallas.	31

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 3-1 Tiempo total de reparación.	78
Fórmula 3-2 Disponibilidad en Base a TTO y TTR.	82
Fórmula 3-3 Ahorro bruto mediante comparación de riesgo.....	88
Fórmula 3-4 Ahorro neto mediante comparación de riesgo.	88
Fórmula 3-5 Cálculo de Retorno Sobre La Inversión (ROI)	90
Fórmula 3-6 Periodo de Recuperación de la inversión.	91

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

SIGLAS

MTBF:	Mean Time Between Failures (MTBF: Tiempo medio entre fallas)
MTTR:	Mean Time To Repair (MTTR: Tiempo medio de reparación)
RCM:	Reliability-Centered Maintenance (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad)
CBM:	Condition-Based Maintenance (Mantenimiento Basado en Condición)
OT:	Orden de Trabajo
ISO:	International Organization for Standardization
SAE:	Society of Automotive Engineers
ROI:	Return on Investment (Retorno sobre la Inversión)

UNIDADES DE MEDIDA

kg	kilogramo
hr	hora

INTRODUCCIÓN

En la industria minera, la conminución constituye un proceso clave, ya que implica la reducción del tamaño de los minerales mediante trituración y molienda para permitir la continuidad de las etapas posteriores del proceso. Se caracteriza por su alta demanda energética y por el uso de equipos como chancadores y molinos, los cuales operan bajo condiciones de elevada exigencia mecánica y son propensos a fallas. En este contexto, el mantenimiento adquiere un rol fundamental para asegurar la continuidad operacional, en concordancia con lo señalado por Crespo (2007), especialmente en entornos donde la indisponibilidad impacta directamente en los resultados productivos.

La empresa analizada presta servicios de análisis de minerales y cuenta con un laboratorio de conminución, además de un área de mantenimiento industrial que gestiona los activos mediante estrategias correctivas y preventivas apoyadas en la plataforma Fractal. No obstante, el análisis de la información se orienta principalmente a la gestión operativa diaria, evidenciándose una oportunidad de mejora en la incorporación de herramientas de confiabilidad que permitan priorizar recursos según el impacto real de los equipos, fortaleciendo así la gestión estratégica del mantenimiento.

Frente a esta situación, la presente tesis propone la aplicación de una metodología basada en buenas prácticas de confiabilidad para identificar los activos más críticos mediante indicadores como MTBF, MTTR y disponibilidad. A partir de esta priorización, se desarrolla la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) sobre el activo crítico, con el objetivo de diseñar un plan de mantenimiento coherente con su contexto operativo, fortalecer la toma de decisiones y generar un impacto económico favorable para la organización.

OBJETIVO GENERAL

Proponer una metodología para la identificación y gestión del activo más crítico del área de conminución en una empresa de servicios para la minería, integrando el análisis de confiabilidad y disponibilidad de los equipos, con el fin de optimizar la gestión del mantenimiento y aumentar la confiabilidad operativa del sistema.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer el contexto operacional y el comportamiento de falla de los activos del área de conminución en una empresa de servicios para la minería, mediante la revisión del diagrama de flujo del proceso, el historial de fallas y el análisis de indicadores tales como MTBF, MTTR y disponibilidad obtenidos desde el sistema Fractal.
- Analizar los resultados de confiabilidad obtenidos mediante el método Jackknife en los equipos del área de conminución, como base para la aplicación de la metodología RCM al activo más crítico identificado, con el fin de definir estrategias de mantenimiento que mejoren su desempeño operacional.
- Evaluar el impacto y la efectividad de las recomendaciones derivadas de la metodología RCM, comparando los resultados obtenidos antes y después de su implementación mediante el análisis del riesgo económico, incluyendo el retorno de la inversión (ROI) y el período de recuperación (Payback), así como la disponibilidad operativa del activo crítico.

CAPÍTULO 1 ESTABLECIMIENTO DEL CONTEXTO OPERACIONAL

1.1. RESEÑA DE LA EMPRESA

La empresa es una multinacional que brinda diversos servicios de inspecciones, ensayos y certificaciones teniendo presencia consolidada en los rubros mineros y metalúrgicos. Lo que busca esta compañía es asegurar calidad, confiabilidad y una adecuada trazabilidad en cada una de sus actividades, siguiendo los lineamientos de la norma ISO 9001 (2015), la cual establece los requisitos para sistemas de gestión de calidad orientado a la mejora continua, de esta manera la empresa brinda soporte técnico para las operaciones de extracción, procesamiento y análisis de minerales.

En Chile, Región Metropolitana, en Pudahuel esta compañía posee laboratorios especializados en diversas áreas de ensayos y análisis, una de ellas es el área de preparación y conminución de muestras la cual tiene una gran relevancia en los procesos de la minería. La conminución corresponde al conjunto de operaciones destinadas a reducir el tamaño de los minerales.

Estas actividades de conminución además requieren de procesos de chanchado, pulverización, homogenización y división de las muestras, para los cuales se utilizan diversos equipos sometidos a una exigente operación, por lo que es clave contar con un desempeño óptimo con el fin de garantizar que los trabajos realizados se cumplan con todos los estándares adecuados.

La compañía además posee un área interna de mantenimiento industrial la cual está encargada de asegurar la continuidad operacional de los distintos activos utilizados en las etapas de los procesos que se llevan a cabo. Esta área gestiona planes de mantenimiento preventivo y correctivo, manejando datos históricos de las fallas en los equipos y sus repuestos, con el fin de tener un control adecuado para lograr planificar las actividades de mantenimiento y sus

frecuencias, en concordancia con los principios de la gestión de activos establecidos en la norma ISO 55000 (2014).

1.2 CONTEXTO OPERACIONAL

Los laboratorios que apoyan la cadena productiva para la minería son claves dentro del proceso, deben ser procesos técnicamente rigurosos, confiables, y con una adecuada trazabilidad, siendo esto los pilares para el análisis y validación de la calidad de los distintos minerales procesados, aportando siempre a optimizar procesos y aportar información de valor para la oportuna toma de decisiones. A continuación se muestra la **Figura 1-1**, el cual es el diagrama de flujo del proceso desde el inicio en el ingreso de las muestras:

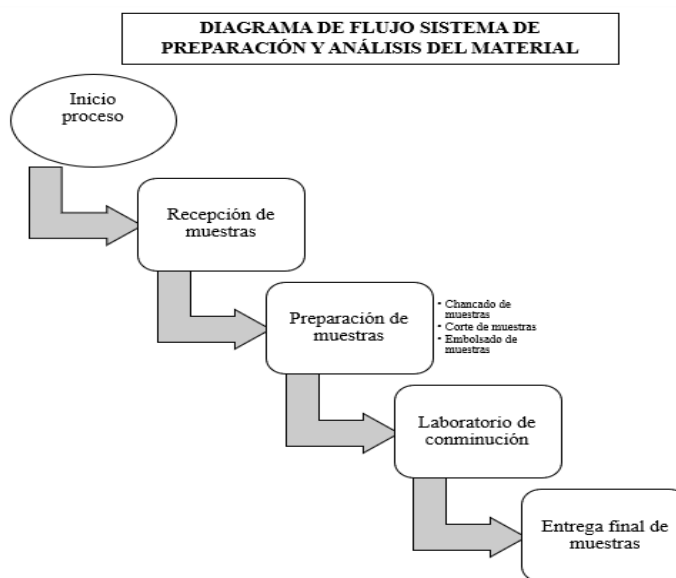


Figura 1-1 Diagrama de flujo sistema de preparación y análisis del material.

Fuente: Elaboración propia.

El laboratorio de conminución se compone de 27 activos los cuales realizan el proceso de chancado, molienda, clasificación, división y sellado para la entrega de las muestras. La correcta interacción entre estos sistemas es clave y determinante para la calidad final de los

resultados analíticos, coincidiendo con lo señalado por Moubray (1997), quien destaca que entender el contexto operacional es clave para definir estrategias de mantenimiento centradas en confiabilidad, a continuación en la **Figura 1-2** se presenta el diagrama de flujo del laboratorio de conminución:



Figura 1-2 Diagrama de flujo del laboratorio de conminución.

Fuente: Elaboración propia en base a información de empresa.

El rango de capacidad operativa en las cuales trabaja el laboratorio de conminución dividido por etapa del proceso se presenta a continuación en la **Tabla 1-1**:

Tabla 1-1 Rango de capacidad operativa según etapa del proceso

Etapa del proceso	Rango de capacidad operativa (kg/h)	Observaciones
Chancado	200 – 350 kg/h	Depende de dureza del mineral, abertura de cierre y granulometría de alimentación.
Molienda	180 – 300 kg/h	Influido por carga de bolas, tipo de ensayo y tamaño de alimentación.
Clasificación	150 – 220 kg/h	Varía según abertura de malla, humedad y número de etapas de tamizado.
División	180 – 240 kg/h	Cambia según cantidad de repeticiones y granulometría final.
Sellado	150 – 210 kg/h	Fluctúa según formato de muestra, número de sellos y flujo de trabajo.

Fuente: Elaboración propia en base a información de la empresa.

A partir del diagrama general del laboratorio conminución en el cual se aprecian las distintas etapas operativas, se logra comprender como cada etapa posee equipos específicos con

funciones bien definidas dentro del proceso, a continuación en la **Tabla 1- 2**, se muestra cada activo con su respectivo nombre, código, y la etapa de proceso en la que participan, es clave entender el trabajo y la ubicación que tienen los activos para un posterior análisis de confiabilidad, además se muestra una imagen del molino de bolas en la **Figura 1-3**.

Tabla 1-2 Activos laboratorio conminución

N°	Equipo	Código	Etapa del proceso
1	Chancador de rodillos Elab Ltda	CHR-MET-LC-001	Chancado
2	Chancador de rodillos Elab Ltda	CHR-MET-LC-002	Chancado
3	Chancador primario Salas	CHA-MET-LC-002	Chancado
4	Chancador secundario Labtech Hebro	CHA-MET-LC-003	Chancado
5	Chancador secundario Labtech Hebro	CHA-MET-LC-004	Chancado
6	Molino bolas F.C.B. Ball Mill	MBOL-MET-LC-005	Molienda
7	Molino bolas F.C.B. Ball Mill	MBOL-MET-LC-004	Molienda
8	Molino de bolas Integrated Machinery	MSPI-MET-LC-004	Molienda
9	Molino de bolas Integrated Machinery	MSPI-MET-LC-005	Molienda
10	Molino test	MSPI-MET-LC-001	Molienda
11	Molino test	MSPI-MET-LC-002	Molienda
12	Molino test	MSPI-MET-LC-003	Molienda
13	Harnero Russel	HVR-MET-LC-001	Clasificación
14	Harnero vibratorio Sweco ZS24	HVR-MET-LC-002	Clasificación
15	Clasificador Gilson	HVG-MET-LC-001	Clasificación
16	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-005	Clasificación
17	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-006	Clasificación
18	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-007	Clasificación
19	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-008	Clasificación
20	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-009	Clasificación
21	Rotap WS. Tyler RX-29	ROT-MET-LC-010	Clasificación
22	Rotap WS. Tyler RX-29	ROT-MET-LC-015	Clasificación
23	Divisor rotatorio	DVR-MET-LC-001	División
24	Vibrador IKA VXR Basic	VIB-MET-LC-001	División
25	Vibrador IKA VXR Basic	VIB-MET-LC-002	División
26	Selladora	SELL-MET-LC-003	Sellado
27	Extractor de polvo Indufan TV-40	EXTR-MET-LC-001	Apoyo

Fuente: Elaboración propia en base a información de la empresa.



Figura 1-3 Imagen de Molino de Bolas en laboratorio de conminución

Fuente: Captura propia en laboratorio de conminución.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y ACTIVOS PRINCIPALES

El laboratorio de conminución cuenta con equipos mecánicos y eléctricos los cuales sirven para reducir, clasificar y acondicionar las muestras de minerales. Estos activos tienen como tarea reproducir a nivel de laboratorio, condiciones de chancado y molienda de los procesos industriales, la sala cuenta con equipos de chancado, molinos, harneros, clasificadores, vibradores, divisores y sistemas de apoyo tales como la extracción de polvo.

En la etapa de chancado se realiza la fragmentación inicial del mineral, para esto se cuenta con los chancadores primarios, secundarios y de rodillos, los cuales buscan reducir el tamaño de los minerales para luego pasar al proceso de molienda. Las capacidades van de 1 a 15 kg por ciclo, dependiendo de la dureza del mineral que se está chancando, estos activos usualmente sufren desgastes en sus superficies de contacto además de requerir un constante

ajuste de calibración, en línea con lo planteado por la norma SAE JA1011 (2011), respecto a la necesidad de aplicar estrategias de mantenimiento específicas para equipos sometidos a una alta exigencia durante la operación.

En la etapa de molienda están los molinos de bolas y test, los cuales son altamente exigidos mecánicamente, estos tienen como propósito reducir la granulometría del mineral para poder realizar la posterior categorización metalúrgica, debido a la continua operación que tienen, también sufren constantes desgastes.

Para el tamizado y la clasificación de los minerales se utilizan los harneros Russell, harneros vibratorios, equipos Rotap y clasificadores Gilson, los cuales permiten separar las fracciones granulométricas con el fin de asegurar un análisis posterior adecuado de las muestras, trabajan con vibración y mallas con aberturas normalizadas, el ciclo de operación oscila entre los 5 y 15 minutos por cada ensayo. Usualmente hay que reemplazar las mallas por desgaste además de verificar constantemente los sistemas vibratorios, tal como plantean Smith y Hawkins (2004), al destacar que las tareas de control rutinario son esenciales para evitar desviaciones en la calidad en los procesos.

En la etapa de división y homogenización se utilizan los divisores rotatorios y las selladoras, con el fin de separar el material en cantidades iguales para el análisis además de otorgar un adecuado sellado de las bolsas con muestras. También está el sistema de vibración IKA el cual compacta el mineral para distribuirlo de manera uniforme en los moldes.

Existe presencia en el laboratorio de un equipo auxiliar que tiene como fin apoyar el proceso, este es el extractor de polvo siendo de gran ayuda para tener las condiciones ambientales controladas evitando contaminación y cumpliendo con las normativas legales de

extracciones de polvo al ambiente. Todas estas etapas del proceso son claves para el trabajo que realiza el área de conminución.

1.3. PIRÁMIDE DE TAXONOMÍA DE EQUIPOS

Con el fin de ordenar y estructurar la información de mantenimiento, para luego facilitar el análisis correspondiente de confiabilidad, los activos del laboratorio de conminución se clasificaron según la norma ISO 14224:2016 de manera jerárquica. Esta norma propone nueve niveles que permiten organizar los activos desde una visión global como lo es la industria a la que pertenecen hasta los componentes individuales mantenibles.

La **Figura 1-4** muestra la pirámide de taxonomía correspondiente al laboratorio de conminución, se puede visualizar en los niveles intermedios los principales sistemas presentes en el área tales como chancado, molienda, clasificación y división, con sus respectivos activos. El análisis de esta pirámide además permite organizar la información operativa contando con una estructura normalizada que facilite el análisis de desempeño de los equipos y su confiabilidad.

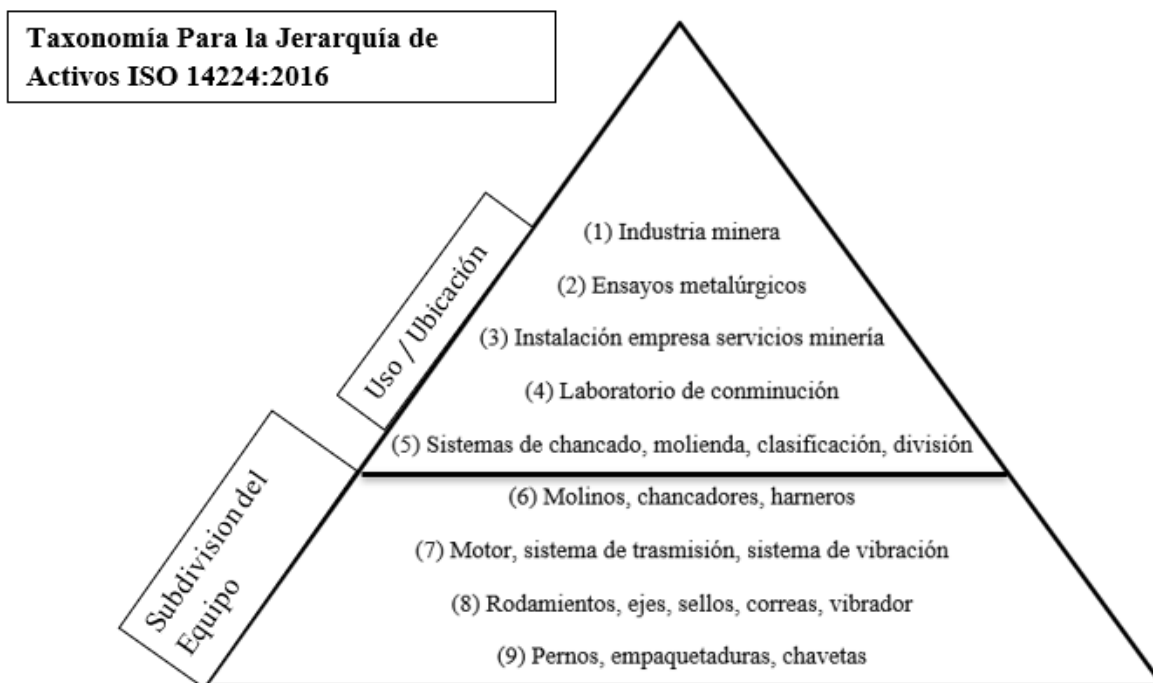


Figura 1-4 Pirámide de taxonomía de activos del Laboratorio de Conminución.

Fuente: Elaboración en base a norma ISO 14224:2016.

1.4. INDICADORES DEL LABORATORIO, DISPONIBILIDAD GENERAL Y CÁLCULO DE INDISPONIBILIDAD

Para el análisis se utilizan las planillas en Excel del laboratorio de conminución, basado en la plataforma de mantenimiento Fractal con información del historial de fallas del año 2024. A continuación se presenta la tabla con los datos de cada activo donde se puede visualizar que la frecuencia de falla fue mayor en los equipos de molienda y chancado, estos antecedentes sirven para un posterior análisis de confiabilidad, siendo parte de la base para el cálculo.

Se puede observar preliminarmente que según los datos obtenidos en la tabla, los equipos con alta criticidad vienen siendo los chancadores y los molinos puesto que toman más tiempo para reparar las fallas y la cantidad de falla es alta debido a la alta exigencia que presentan al

momento de operar, están sometidos a cargas constantemente y sus superficies de contacto con el mineral van sufriendo desgastes requiriendo de inspecciones y mantenimientos constantes, lo cual se alinea con lo planteado por Moubray (1997), quien indica que los activos críticos deben ser priorizados en la planificación del mantenimiento con el fin de garantizar disponibilidad y confiabilidad en el sistema. La **Tabla 1-3** muestra un resumen de los activos analizados del área y su comportamiento durante el año 2024.

Tabla 1-3 Principales indicadores de mantenimiento activos laboratorio conminución año 2024

N°	Activo	Código	Total OTs	Correctivas	Preventivas	MTBF (h)	MTRR (h)	Disponibilidad (%)
1	Chancador de rodillos Elab Ltda	CHR-MET-LC-001	9	7	2	160	14	91.9
2	Chancador de rodillos Elab Ltda	CHR-MET-LC-002	8	6	2	150	15	90.9
3	Chancador primario Salas	CHA-MET-LC-002	10	7	3	140	16	89.7
4	Chancador secundario Labtech Hebro	CHA-MET-LC-003	9	6	3	155	13	92.3
5	Chancador secundario Labtech Hebro	CHA-MET-LC-004	7	5	2	165	12	93.2
6	Molino bolas F.C.B. Ball Mill	MBOL-MET-LC-005	8	5	3	180	11	94.2
7	Molino bolas F.C.B. Ball Mill	MBOL-MET-LC-004	7	4	3	190	10	95.0
8	Molino de bolas Integrated Machinery	MSPI-MET-LC-004	6	4	2	200	9	95.7
9	Molino de bolas Integrated Machinery	MSPI-MET-LC-005	8	5	3	175	12	93.6
10	Molino test	MSPI-MET-LC-001	5	3	2	210	8	96.3
11	Molino test	MSPI-MET-LC-002	4	3	1	225	7	96.9
12	Molino test	MSPI-MET-LC-003	5	3	2	205	9	95.8
13	Harnero Russel	HVR-MET-LC-001	4	2	2	230	7	97.0
14	Harnero vibratorio Sweco ZS24	HVR-MET-LC-002	5	3	2	215	8	96.4
15	Clasificador Gilson	HVG-MET-LC-001	4	2	2	240	6	97.6
16	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-005	3	2	1	250	5	98.0
17	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-006	3	2	1	245	5	98.0
18	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-007	3	1	2	260	4	98.5
19	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-008	2	1	1	270	3	98.9
20	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-009	2	1	1	265	3	98.8
21	Rotap WS. Tyler RX-29	ROT-MET-LC-010	3	2	1	255	5	98.1
22	Rotap WS. Tyler RX-29	ROT-MET-LC-015	3	2	1	250	5	98.0
23	Divisor rotatorio	DVR-MET-LC-001	4	2	2	230	6	97.5
24	Vibrador IKA VXR Basic	VIB-MET-LC-001	3	2	1	240	5	97.9
25	Vibrador IKA VXR Basic	VIB-MET-LC-002	3	1	2	245	5	98.0
26	Selladora	SELL-MET-LC-003	3	1	2	260	4	98.5
27	Extractor de polvo Indufan TV-40	EXTR-MET-LC-001	2	1	1	275	3	98.9

Fuente: Elaboración propia en base a Excel con información de Fractal.

En relación con el MTBF, los equipos de chancado presentaron los valores más bajos, promediando 154 horas entre fallas, evidenciando una frecuencia alta de incidentes en la operación, por otra parte hay activos como los Rotap tuvieron MTBF superiores a 240 horas logrando una mayor continuidad operacional. Según la ISO 14224:2016, un valor bajo de MTBF se traduce en la necesidad de revisar la estrategia de mantenimiento empleada, ya que pueden

existir fallas de diseño o de instalación, rutinas de mantenimiento preventivo insuficientes o errores de operación.

Para el caso de los datos observados de MTTR, los chancadores tienen los valores más altos debido a su complejidad técnica en las intervenciones promediando 14 horas, por otra parte equipos como los vibradores IKA, los Rotap o los divisores presentan bajos MTTR. La norma UNE 66175:2003 destaca que este indicador es clave para evaluar la eficiencia del mantenimiento correctivo, y recomienda su seguimiento para una gestión oportuna.

En cuanto a la disponibilidad, el equipo que tuvo la menor disponibilidad fue el chancador primario con (89,7%) en el año 2024. Debido a que este equipo realiza la primera etapa del proceso en el laboratorio impacta también a los demás activos, generando una pérdida en la continuidad operacional. Por otra parte el extractor de polvo Indufan TV-40, tuvo una disponibilidad de (98,9%).

Debido a la naturaleza variable de las operaciones del laboratorio de conminución, en el cual se ejecutan distintos procesos y ensayos según los requerimientos específicos de cada cliente, no existe una secuencia fija ni un diagrama de flujo estandarizado de equipos. La configuración del sistema varía en función del tipo de muestra, el protocolo de ensayo y la disponibilidad operativa de los activos en cada jornada, para visualizar aquello se ha considerado como referencia una línea de trabajo representativa, correspondiente a la secuencia de activos más utilizada en el laboratorio de conminución. A continuación, en la **Figura 1-5** se presenta:

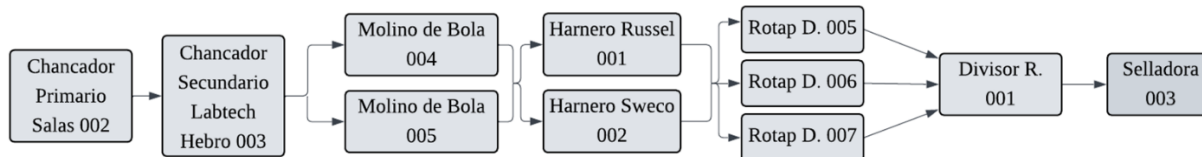


Figura 1-5 Configuración de activos más utilizada en el área de conminución.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de empresa.

1.6 INDICADORES TÉCNICOS DE MANTENIMIENTO

Los principales indicadores técnicos de mantenimiento que sirven para evaluar el desempeño y tomar decisiones son los siguientes, MTBF (Mean Time Between Failures), el cual corresponde al tiempo medio entre cada falla; según la norma ISO 14224 (2016), este indicador permite evaluar la confiabilidad de los activos a partir del promedio de horas entre cada fallo. Un valor bajo de MTBF, indica que el activo posee una alta frecuencia de fallas, MTTR (Mean Time To Repair), el cual indica el tiempo medio de reparación, para equipos más complejos se tiene un MTTR elevado puesto que involucra el desmontaje de componentes pesados, por lo que la tarea tarda más tiempo que un mantenimiento a un equipo pequeño.

Otro indicador clave dentro del análisis es la disponibilidad, la cual corresponde a un porcentaje de tiempo en que el activo este operativo respecto a un tiempo total definido. Está directamente relacionado con los indicadores MTBF y MTTR, por lo que se basa tanto en el tiempo de buen funcionamiento como también el tiempo que se tardan las acciones de mantenimiento. Una alta disponibilidad significa que se está logrando una planificación oportuna

además de una buena gestión de los recursos, buscando siempre la mínima ocurrencia de fallas imprevistas en los activos.

Por último visualizar el historial de fallas que tienen los activos también es determinante ya que se pueden ver patrones recurrentes, tendencias que tienen los activos a fallas además de ayudar a tomar decisiones con información actualizada y personalizada por cada uno de los equipos, logrando ver por ejemplo cual es la falla más recurrente. La norma UNE 66175 (2003) destaca la correcta gestión de esta información permitiendo gestionar los recursos y tiempos de mejor manera.

1.7 ANÁLISIS PRELIMINAR DE CRITICIDAD

A partir del análisis de los historiales de falla e indicadores otorgados por la plataforma Fractal, se puede establecer un diagnóstico preliminar de criticidad de los activos, siendo los chancadores y molinos los más críticos debido a su frecuencia de falla, tiempos de reparación prolongados, por otra parte los equipos en este laboratorio operan en un ambiente con presencia de polvo por ende deben contar con una adecuada lubricación para evitar un deterioro prematuro. A continuación se presenta la **Tabla 1-4**, la cual muestra las frecuencias de falla de los activos en el laboratorio de conminución.

Tabla 1-4 Frecuencias de fallas de los activos en el laboratorio de conminución.

Tipo de falla	Sistema afectado	Frecuencia (%)	Causa principal
Mecánica	Chancado	42%	Desgaste de placa de mandíbula
Eléctrica	Molienda	18%	Fallas en motor
Vibración / Desalineación	Clasificación	15%	Ejes desbalanceados, mallas con pérdida de tensión
Lubricación insuficiente	Todos	10%	Contaminación por polvo
Otras (sellos, aire, etc.)	General	15%	Varios

Fuente: Elaboración propia a partir de registros históricos de mantenimiento (2024).

El análisis de la distribución de las fallas muestra un porcentaje elevado (42%) correspondiente a incidentes en el sistema de chancado, este comportamiento se debe principalmente a la naturaleza del proceso ejecutado por los chancadores, siendo sometidos a esfuerzos mecánicos continuos, contactos directo con minerales abrasivos además de altos niveles de vibración, estas condiciones generan desgaste principalmente en las placas de mandíbula.

Para el caso de los sistemas eléctricos de molienda (18%) y los equipos de clasificación (15%), su incidencia sigue siendo significativa para el proceso, en los equipos de molienda las fallas se asocian a motores, elementos de control y conexiones, ya que se encuentran expuestos a variaciones de carga durante los procesos además de estar en ambientes con polvo. Además en los equipos de clasificación al estar con problemas de desalineación y pérdidas de tensión en las mallas, se afecta directamente la precisión del tamizado y la calidad de las muestras, concuerda con lo mencionado por Smith y Hawkins (2004), quienes señalan que las vibraciones y los desajustes que no se controlan de manera adecuada, reducen la confiabilidad y el rendimiento en los equipos.

1.8 ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE GESTIÓN EN FRACTAL

El mantenimiento de los equipos en la empresa se gestiona a través de la plataforma Fractal, la cual permite registrar, controlar y programar órdenes de trabajo correctivas y preventivas. Desde su implementación, esta herramienta ha facilitado la trazabilidad y la planificación de las tareas de mantenimiento, permitiendo visualizar la frecuencia de fallas de los activos, los tiempos requeridos para su reparación y la gestión del tiempo asociado a cada tarea ejecutada por el personal de mantenimiento.

A partir de la información registrada en Fractal, es posible identificar el comportamiento general de las intervenciones realizadas en el área de conminución. En particular, los sistemas de chancado y molienda concentran una parte relevante de las detenciones no programadas del laboratorio. Según los registros correspondientes al año 2024, se realizaron un total de 133 órdenes de trabajo, de las cuales 83 corresponden a mantenimientos correctivos y 50 a mantenimientos preventivos, lo que representa un 62% y un 38% del total de órdenes, respectivamente.

La información disponible en la plataforma permite disponer de antecedentes históricos asociados al desempeño de los equipos, tales como el historial de fallas, los tiempos promedio de reparación y la duración de las detenciones. Estos datos constituyen una base relevante para la caracterización del contexto operacional del área de mantenimiento y para el análisis posterior de indicadores de confiabilidad, tales como MTBF, MTTR y disponibilidad, los cuales son utilizados en evaluaciones más avanzadas de gestión del mantenimiento, de acuerdo con los principios descritos por Moubray (1997).

A continuación, se presentan los gráficos obtenidos a partir de los registros de Fractal. El **Gráfico 1-1** muestra la distribución de las órdenes de trabajo totales, el **Gráfico 1-2** corresponde a la distribución de las órdenes de trabajo correctivas por proceso y el **Gráfico 1-3** presenta la distribución de las órdenes de trabajo preventivas por proceso, permitiendo una visualización general del contexto operativo del área de conminución durante el período analizado.



Gráfico 1-1 Gráfico circular con información de cantidad de OTs.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Fractal.

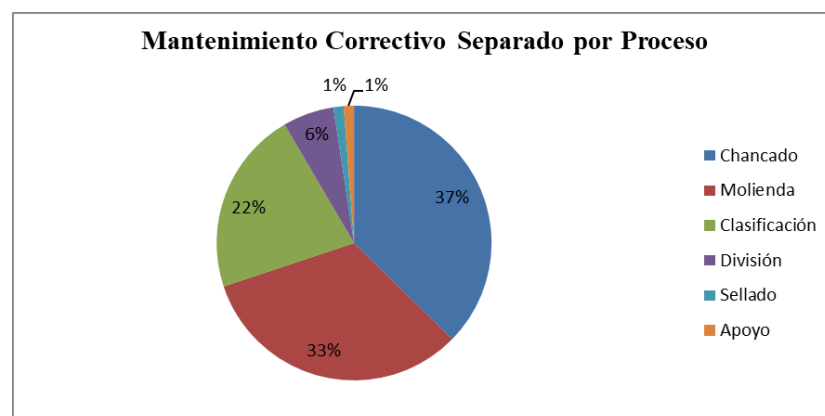


Gráfico 1-2 Gráfico circular con información de cantidad de OTs correctivas por proceso.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Fractal.

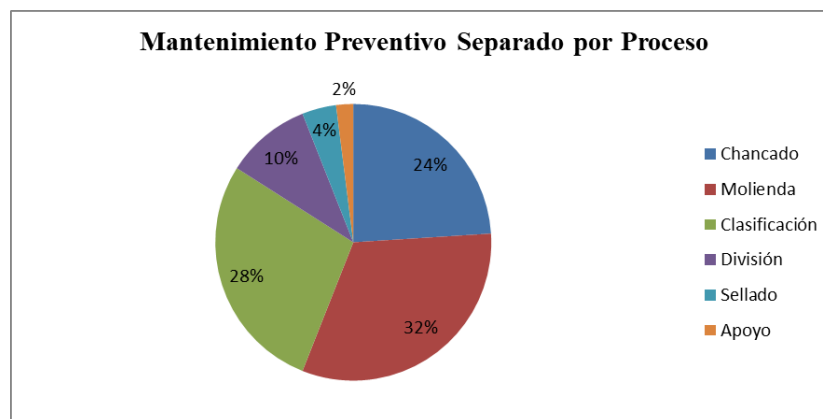


Gráfico 1-3 Gráfico circular con información de cantidad de OTs preventivas por proceso.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Fractal.

A pesar de que la gestión del mantenimiento se apoya en la plataforma Fractal para el registro y control de las actividades, no se evidencia la aplicación de un análisis formal de confiabilidad que permita evaluar de manera objetiva y sistemática el desempeño de los activos. Esta situación limita la capacidad de anticipar fallas, optimizar la planificación de intervenciones y transitar desde un enfoque predominantemente reactivo hacia uno proactivo basado en riesgo.

En consecuencia, se dificulta la definición de estrategias de mejora sustentadas en indicadores técnicos de desempeño, tales como la confiabilidad y la disponibilidad operacional. Tal como lo establece la ISO 55000 (2014), una gestión de activos eficaz debe adoptar una visión integral orientada a maximizar el valor a lo largo del ciclo de vida, siendo además un pilar fundamental para la toma de decisiones estratégicas.

CAPÍTULO 2: **ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD MEDIANTE EL
MÉTODO JACKKNIFE Y DESARROLLO DE LA
METODOLOGÍA RCM EN EL ACTIVO MÁS CRÍTICO
DEL ÁREA DE CONMINUCIÓN.**

2.1 ANÁLISIS DE CRITICIDAD MEDIANTE MÉTODO JACKKNIFE

El método Jackknife es una herramienta estadística que permite analizar la influencia de las variables de confiabilidad en el comportamiento de los equipos, en este caso se utiliza para evaluar cómo el tiempo medio de reparación (MTTR) y el número de fallas inciden en el desempeño de cada activo. A partir de estos resultados, el método permite valorar la importancia relativa de cada equipo y establecer cuáles son los activos más críticos del área de conminución, conforme a los lineamientos de la ISO 14224 (2016).

Se representa mediante un gráfico donde el eje X indica la cantidad de fallas y el eje Y el tiempo medio de reparación (MTTR) expresado en horas. En este plano se establece una línea de referencia de tiempo que permite identificar los equipos que superan los límites aceptables de indisponibilidad. Según su ubicación, los activos se clasifican en cuatro cuadrantes: Agudo, Crítico, Crónico y No prioritario. Los equipos en el cuadrante Crítico presentan simultáneamente alta frecuencia de fallas y elevados tiempos de reparación, siendo considerados los de mayor impacto operativo.

En base a la información recopilada desde el sistema Fractal, se elabora el conjunto de datos que permitió representar el comportamiento de los equipos mediante el análisis Jackknife. A continuación, se presenta la **Tabla 2-1**, que resume los indicadores de confiabilidad utilizados para la construcción del gráfico, seguida del **Gráfico 2-1**, donde se visualiza el gráfico Jackknife aplicado a los activos del laboratorio de conminución durante el año 2024.

Tabla 2-1 Resumen de los indicadores de confiabilidad utilizados para la construcción del grafico Jackknife.

N°	Activo	Código	Fallos/año	MTTR	EJE N	EJE MTTR
1	Chancador de rodillos Elab Ltda	CHR-MET-LC-001	7	14	3,07	7,78
2	Chancador de rodillos Elab Ltda	CHR-MET-LC-002	6	15	3,07	7,78
3	Chancador primario Salas	CHA-MET-LC-002	7	16	3,07	7,78
4	Chancador secundario Labtech Hebro	CHA-MET-LC-003	6	13	3,07	7,78
5	Chancador secundario Labtech Hebro	CHA-MET-LC-004	5	12	3,07	7,78
6	Molino bolas F.C.B. Ball Mill	MBOL-MET-LC-005	5	11	3,07	7,78
7	Molino bolas F.C.B. Ball Mill	MBOL-MET-LC-004	4	10	3,07	7,78
8	Molino de bolas Integrated Machinery	MSPI-MET-LC-004	4	9	3,07	7,78
9	Molino de bolas Integrated Machinery	MSPI-MET-LC-005	5	12	3,07	7,78
10	Molino test	MSPI-MET-LC-001	3	8	3,07	7,78
11	Molino test	MSPI-MET-LC-002	3	7	3,07	7,78
12	Molino test	MSPI-MET-LC-003	3	9	3,07	7,78
13	Harnero Russel	HVR-MET-LC-001	2	7	3,07	7,78
14	Harnero vibratorio Sweco ZS24	HVR-MET-LC-002	3	8	3,07	7,78
15	Clasificador Gilson	HVG-MET-LC-001	2	6	3,07	7,78
16	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-005	2	5	3,07	7,78
17	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-006	2	5	3,07	7,78
18	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-007	1	4	3,07	7,78
19	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-008	1	3	3,07	7,78
20	Rotap Duratap	ROT-MET-LC-009	1	3	3,07	7,78
21	Rotap WS. Tyler RX-29	ROT-MET-LC-010	2	5	3,07	7,78
22	Rotap WS. Tyler RX-29	ROT-MET-LC-015	2	5	3,07	7,78
23	Divisor rotatorio	DVR-MET-LC-001	2	6	3,07	7,78
24	Vibrador IKA VXR Basic	VIB-MET-LC-001	2	5	3,07	7,78
25	Vibrador IKA VXR Basic	VIB-MET-LC-002	1	5	3,07	7,78
26	Selladora	SELL-MET-LC-003	1	4	3,07	7,78
27	Extractor de polvo Indufan TV-40	EXTR-MET-LC-001	1	3	3,07	7,78

Fuente: Elaboración propia en base a información de Fractal.

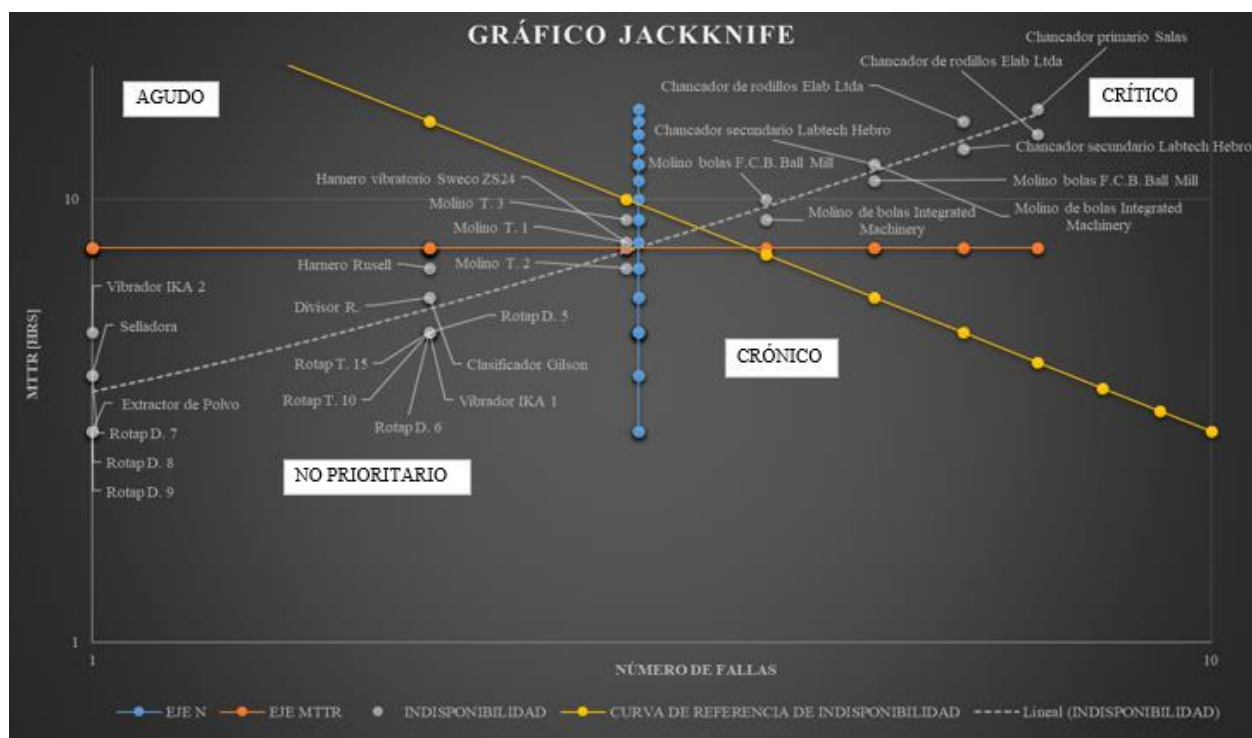


Gráfico 2-1 Gráfico Jackknife de MTTR y número de fallas.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Fractal.

De este análisis se identificaron nueve equipos con comportamiento crítico, presentados a continuación en la **Tabla 2-2**.

Tabla 2-2 Equipos con comportamiento crítico.

Nº	Activo	Código	Clasificación Jackknife
1	Chancador de rodillos Elab Ltda	CHR-MET-LC-001	Crítico
2	Chancador de rodillos Elab Ltda	CHR-MET-LC-002	Crítico
3	Chancador primario Salas	CHA-MET-LC-002	Crítico
4	Chancador secundario Labtech Hebro	CHA-MET-LC-003	Crítico
5	Chancador secundario Labtech Hebro	CHA-MET-LC-004	Crítico
6	Molino bolas F.C.B. Ball Mill	MBOL-MET-LC-005	Crítico
7	Molino bolas F.C.B. Ball Mill	MBOL-MET-LC-004	Crítico
8	Molino de bolas Integrated Machinery	MSPI-MET-LC-004	Crítico
9	Molino de bolas Integrated Machinery	MSPI-MET-LC-005	Crítico

Fuente: Elaboración propia en base a Excel con información de gráfico Jackknife.

Si bien se identificaron nueve equipos con comportamiento crítico dentro del laboratorio de conminución, para efectos del desarrollo del presente estudio el análisis se acota exclusivamente al activo más crítico identificado, correspondiente al Chancador Primario Salas (CHA-MET-LC-002), debido a su elevado impacto en la continuidad operacional del sistema, así como en su condición de equipo único y punto inicial del proceso de conminución. Los demás equipos críticos identificados forman parte del contexto operacional del caso de estudio y son considerados en la etapa de priorización, pero no son abordados en profundidad en el desarrollo metodológico posterior.

2.2 SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM

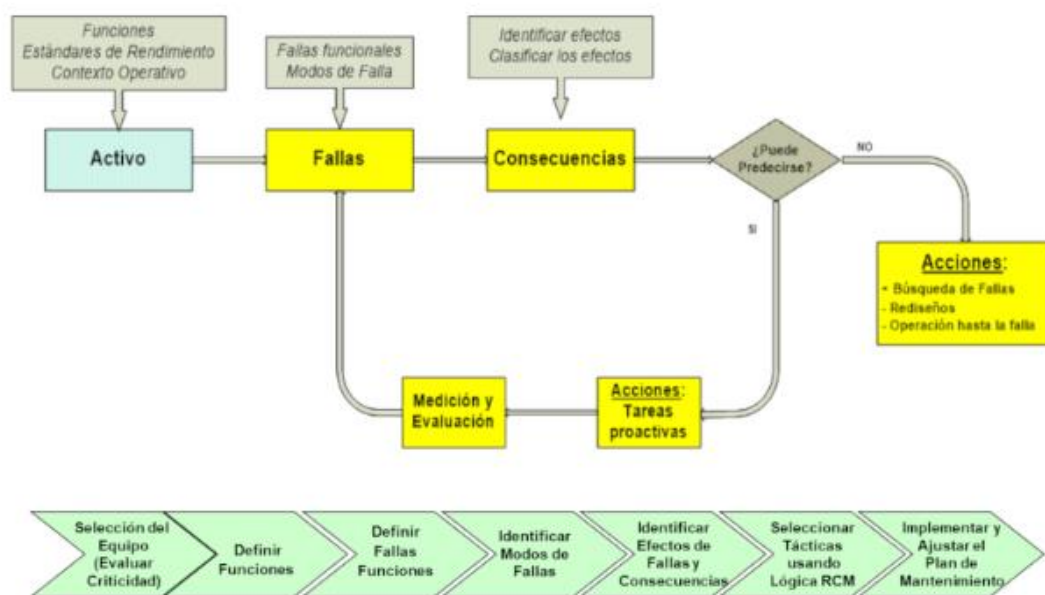


Figura 2-1 Esquema general del proceso lógico del RCM.

Fuente: Esquema basado en los requerimientos de la norma SAE JA1011 para procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).

Una vez determinada la criticidad de los equipos del laboratorio de conminución mediante el método Jack Knife, se define la metodología más adecuada para orientar la gestión del mantenimiento de los activos seleccionados como caso de estudio. Considerando las condiciones operativas del entorno, caracterizadas por cargas variables, elevados niveles de vibración, restricciones de tiempo y disponibilidad de recursos, se opta por la aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

La evolución del mantenimiento industrial ha transitado desde esquemas correctivos hacia modelos orientados a la excelencia operacional, donde la planificación, el análisis de datos y la gestión sistemática de activos constituyen pilares fundamentales para la sostenibilidad organizacional (Campbell, 1995). En este contexto, la metodología seleccionada se enmarca dentro de esta transición hacia prácticas maduras y estructuradas.

El RCM es una metodología reconocida internacionalmente que permite vincular las funciones de los activos con sus fallas funcionales, modos de falla y consecuencias, con el objetivo de definir estrategias de mantenimiento técnicamente justificadas y coherentes con el impacto real de las fallas en la operación, la seguridad y los costos. Su propósito fundamental es preservar la función del activo dentro de los parámetros de desempeño establecidos, priorizando la toma de decisiones basada en consecuencias más que en la simple ocurrencia de fallas (ISO 55000, 2014).

El enfoque tradicional del RCM, desarrollado por John Moubray (1997), se estructura a partir de siete preguntas fundamentales que guían el análisis funcional y técnico de los activos. Estas preguntas permiten comprender de manera sistemática qué se espera del equipo, cómo

puede fallar, cuáles son las causas y consecuencias de dichas fallas y qué acciones de mantenimiento resultan más adecuadas para gestionarlas. A continuación, se presentan las siete preguntas que conforman la base del análisis RCM:

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño del activo en su contexto operativo?
2. ¿De qué manera puede el activo dejar de cumplir su función?
3. ¿Qué causa cada modo de falla?
4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
5. ¿Qué consecuencias tiene cada falla sobre la operación, la seguridad o el medio ambiente?
6. ¿Qué tareas de mantenimiento pueden prevenir o mitigar la ocurrencia de la falla?
7. ¿Qué ocurre si no se realiza ninguna acción preventiva o predictiva?

El contexto operativo del chancador primario Salas ha sido previamente definido y caracterizado en el Capítulo 1, donde se describen el flujo de proceso del laboratorio de conminución, la interacción del equipo con los activos aguas arriba y aguas abajo, y las condiciones de operación bajo las cuales se desempeña el equipo, información que permite establecer con claridad qué se espera del equipo, en qué condiciones debe operar y cuáles son las consecuencias de su indisponibilidad sobre el sistema.

2.2.1 ETAPAS DE IMPLEMENTACIÓN DEL RCM

Si bien las siete preguntas del RCM, propuestas por Moubray, constituyen la base conceptual del análisis de confiabilidad, Smith y Hinchcliffe (2004) señalan que su aplicación efectiva en entornos industriales debe abordarse como un proyecto de ingeniería, estructurado en

una secuencia de etapas que permitan llevar el análisis técnico a la práctica operativa. De acuerdo con estos autores, el proceso de implementación del RCM se organiza en las siguientes cinco etapas principales:

1. Preparación: Orientada a la organización del proyecto RCM y a la conformación del equipo de trabajo.
2. Selección del sistema y recopilación de información: Enfocada en la definición del activo a analizar y la comprensión de su contexto operacional.
3. Análisis funcional y análisis de fallas: Se identifican las funciones del activo, las fallas funcionales, los modos de falla y sus efectos.
4. Selección de tareas de mantenimiento: Mediante la aplicación de la lógica de decisión del RCM para definir las acciones más adecuadas.
5. Implementación del plan de mantenimiento: Correspondiente a la estructuración y puesta en marcha de las tareas definidas.

En el contexto del presente trabajo, el alcance metodológico comprende el desarrollo de las etapas 1 a 4, culminando en la definición técnica de las tareas de mantenimiento recomendadas para el activo crítico analizado. La etapa 5, correspondiente a la implementación operativa del plan, se plantea como una instancia posterior de ejecución organizacional, quedando fuera del alcance directo de esta investigación.

2.2.2 FORMACIÓN DEL EQUIPO NATURAL DE TRABAJO

Como primer paso dentro de la fase inicial de implementación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), se establece la conformación del equipo natural de trabajo. Este equipo debe estar integrado por personal con distintas funciones dentro de la organización, que combine conocimiento técnico del activo, experiencia operativa y comprensión del proceso productivo, permitiendo desarrollar un análisis consistente y alineado con la realidad operacional.

De acuerdo con Moubray (1997), el análisis RCM debe ser desarrollado por un equipo multidisciplinario de tamaño acotado, de modo de asegurar una adecuada diversidad técnica sin afectar la eficiencia del proceso de análisis. En este contexto, se considera apropiado conformar un equipo de trabajo compuesto por cinco personas, lo que permite un equilibrio adecuado entre diversidad de criterios y eficiencia en la toma de decisiones, los cuales son:

1. Personal de operación, con conocimiento directo del funcionamiento real del equipo y sus condiciones de operación.
2. Personal de mantenimiento, de especialidad mecánica y/o eléctrica, con experiencia en las fallas, reparaciones y consecuencias asociadas al activo.
3. Ingeniero de procesos o planificación, con comprensión del rol del equipo dentro del sistema productivo y su impacto en los objetivos operacionales.
4. Programador o supervisor de mantenimiento, responsable de los planes preventivos existentes, presupuesto y acceso al historial de fallas del activo.
5. Facilitador del RCM, rol que debe ser desempeñado por un ingeniero con formación en mantenimiento industrial, encargado de conducir metodológicamente el análisis y asegurar la correcta aplicación de la lógica RCM.

Si bien la empresa cuenta con los recursos humanos necesarios para cubrir estos roles, actualmente no se dispone de especialistas externos permanentes. No obstante, su eventual

incorporación se considera de manera puntual y estratégica, en función de la criticidad de determinados modos de falla o de la complejidad técnica de las tareas de mantenimiento propuestas.

2.2.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO CHANCADOR PRIMARIO (SALAS)

El chancador primario tipo mandíbula es el equipo encargado de recibir la totalidad del material proveniente del proceso de muestreo, constituyéndose como el activo de mayor criticidad funcional dentro del laboratorio de conminución. Su principio de operación se basa en la reducción de tamaño por compresión: el material es atrapado entre una mandíbula fija y una mandíbula móvil, la cual ejecuta un movimiento oscilatorio generado por un eje excéntrico. Dicho movimiento es transmitido mediante un sistema de poleas y correas desde un motor eléctrico hacia el conjunto cinemático del equipo.

Desde el punto de vista constructivo y operacional, el chancador está compuesto por una tolva de alimentación, cámara de trituración con placas de desgaste (mandíbula fija y móvil), sistema de ajuste de la abertura de descarga para el control de la granulometría de salida, estructura base reforzada, sistema de transmisión y tablero de operación con dispositivos de seguridad. En el contexto del laboratorio, su desempeño se evalúa principalmente en términos de capacidad y continuidad operacional, registrando una capacidad de trabajo del orden de 200 a 350 kg/h, dependiendo del tipo de ensayo, dureza y granulometría del mineral alimentado.

El equipo puede aceptar material con un tamaño máximo de alimentación de hasta 10 pulgadas, efectuando una reducción primaria hasta un tamaño de producto controlado entre 3 y 6 pulgadas, adecuado para su posterior procesamiento en la etapa de chancado secundario. La cámara de trituración incorpora mandíbulas fabricadas en acero al manganeso y una estructura de

acero reforzado, lo que le otorga alta resistencia mecánica frente a cargas dinámicas y condiciones severas de operación.

En términos de seguridad y mantenibilidad, el diseño contempla protecciones mecánicas, cubierta de la tolva de alimentación y dispositivos de parada de emergencia, reduciendo la exposición del operador a riesgos mecánicos. Asimismo, dispone de placas de desgaste intercambiables y accesos directos tanto a la cámara de trituración como al sistema de transmisión, facilitando las labores de inspección, ajuste y reemplazo de componentes, lo que contribuye a intervenciones oportunas y a la continuidad del proceso.

Tabla 2-3 Especificaciones Chancador Primario Salas

Parámetro	Especificación
Tipo de equipo	Chancador primario tipo mandíbula
Principio de operación	Trituración por compresión (mandíbula fija y móvil)
Capacidad de procesamiento	200 – 350 kg/h
Boca de alimentación	12" × 24"
Tamaño máximo de alimentación	10"
Tamaño de producto	3" – 6" (ajustable por seteo)
Tipo de mandíbulas	Acero al manganeso
Configuración de mandíbulas	Intercambiables y reversibles
Sistema de transmisión	Poleas y correas hacia eje excéntrico
Motor	Eléctrico trifásico
Potencia del motor	10 HP
Tensión	380/660 V
Frecuencia	50 Hz
Número de fases	3 fases
Cajón receptor	20 litros
Peso total	2.800 kg
Altura	1.800 mm
Largo	1.500 mm
Ancho	1.200 mm
Elementos de seguridad	Protección mecánica, tapa de tolva, parada de emergencia.

Fuente: Elaboración propia en base a información de equipo.

2.2.4 FUNCIONES DEL EQUIPO

La metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) establece que la base de todo análisis de confiabilidad es la correcta definición de las funciones que debe cumplir el equipo dentro de su contexto operativo real. De acuerdo con Moubray (1997), antes de identificar fallas y modos de falla, es imprescindible establecer qué se espera que haga el activo, en qué condiciones y con qué estándares de desempeño.

A continuación, se definen las funciones del chancador, clasificadas en funciones operativas, funciones de soporte y funciones de protección, las cuales sirven como base para la posterior identificación de fallas funcionales y modos de falla:

Funciones operativas

F1. Reducir el tamaño del material proveniente del proceso de muestreo mediante trituración por compresión entre la mandíbula fija y la mandíbula móvil.

F2. Procesar de forma continua un caudal de material en el rango de 200 a 350 kg/h, sin generar interrupciones no programadas durante la operación.

F3. Entregar un producto con granulometría controlada, típicamente entre 3” a 6”, adecuado para alimentar al chancador secundario y a las etapas posteriores del proceso.

Funciones de soporte

F4. Recibir y conducir el material hacia la cámara de trituración de manera estable y segura, evitando derrames, rebotes o atascos en la zona de alimentación.

F5. Transmitir la potencia eléctrica y mecánica desde el motor hacia el eje excéntrico y las mandíbulas a través del sistema de poleas y correas, asegurando un funcionamiento continuo y eficiente.

Función de protección

F6. Detectar y limitar condiciones anormales de operación (sobrecargas, atascos o fallas eléctricas) mediante dispositivos de seguridad, tales como sistemas de parada de emergencia y protecciones eléctricas del motor, evitando daños al equipo y riesgos de seguridad al personal.

A continuación desde la **Figura 2-2** hasta la **Figura 2-8** se presentan fotografías del activo:



Figura 2-2 Fotografía de chancador primario Salas.

Fuente: Captura propia en laboratorio de conminución.



Figura 2-3 Fotografía de placa de motor chancador primario Salas.

Fuente: Captura propia en laboratorio de conminución.



Figura 2-4 Fotografía de placas de mandíbulas chancador primario Salas.

Fuente: Captura propia en laboratorio de conminución.



Figura 2-5 Fotografía de polea conducida de chancador primario Salas.

Fuente: Captura propia en laboratorio de conminución.



Figura 2-6 Fotografía de protección de seguridad chancador primario Salas.

Fuente: Captura propia en laboratorio de conminución.



Figura 2-7 Fotografía de vista trasera de chancador primario Salas.
Fuente: Captura propia en laboratorio de conminución.



Figura 2-8 Fotografía motor eléctrico de chancador primario Salas.
Fuente: Captura propia en laboratorio de conminución.

2.3 ANÁLISIS DEL MODO, EFECTO Y CRITICIDAD DE LA FALLA

El Análisis de Modo, Efecto y Criticidad de Falla (FMECA) es una técnica sistemática utilizada para identificar, analizar y evaluar los posibles modos de falla que pueden presentarse en un sistema, equipo o proceso, así como los efectos que dichas fallas generan sobre su desempeño y la criticidad asociada a cada una de ellas. Esta metodología permite comprender de manera estructurada cómo una falla puede afectar la operación normal del sistema y cuáles son sus consecuencias desde el punto de vista operacional, económico y de seguridad.

El desarrollo del FMECA considera una secuencia ordenada de etapas que incluye la identificación de los modos de falla, el análisis de sus efectos y la evaluación de su criticidad, lo que facilita la priorización de acciones de mantenimiento correctivo o preventivo orientadas a reducir el riesgo operativo. Debido a su enfoque preventivo y a su capacidad para anticipar fallas antes de que ocurran, el FMECA es ampliamente utilizado en la industria, especialmente en sistemas donde la confiabilidad y la seguridad operacional son factores críticos para la continuidad del proceso productivo (Moubray, 1997).

Fallas funcionales

Las fallas funcionales, también denominadas estados de falla, representan la incapacidad de un activo para cumplir una o más de sus funciones dentro de los parámetros de desempeño establecidos. Estas fallas constituyen un elemento fundamental dentro del análisis RCM, ya que permiten identificar todos los estados no deseados que puede experimentar un sistema durante su operación normal.

La correcta identificación de las fallas funcionales se facilita una vez que las funciones del activo han sido claramente definidas, ya que estas fallas se expresan como la pérdida total o parcial de dichas funciones. Reconocer y analizar las fallas funcionales resulta esencial para comprender las debilidades del sistema, evaluar los riesgos asociados y definir estrategias de mantenimiento orientadas a la mejora continua del desempeño y la confiabilidad operacional (SAE JA1011).

Modos de falla

Un modo de falla corresponde a la causa específica por la cual un equipo o sistema puede llegar a presentar una falla funcional. Cada falla funcional puede estar asociada a uno o varios modos de falla, los cuales deben ser identificados y analizados de forma exhaustiva durante el desarrollo del análisis RCM.

La identificación de los modos de falla requiere un enfoque detallado orientado a reconocer las causas raíz que originan la falla, ya sea por desgaste, errores operacionales, deficiencias de diseño, condiciones ambientales u otros factores. Este nivel de desagregación permite comprender con mayor precisión por qué ocurre la falla y facilita la definición de acciones de mantenimiento adecuadas para prevenir, detectar o mitigar sus efectos sobre el sistema (SAE JA1011).

Efectos de falla

Los efectos de falla describen las consecuencias inmediatas y finales que se generan a partir de la ocurrencia de un modo de falla. Estos efectos pueden manifestarse de distintas formas y niveles de severidad, impactando aspectos como la seguridad de las personas, la disponibilidad

del equipo, la calidad del proceso, los costos de operación y los tiempos de detención no programada.

El análisis de los efectos de falla puede realizarse tanto a nivel local, considerando el impacto directo sobre el componente afectado, como a nivel global, evaluando las consecuencias sobre el sistema completo o el proceso productivo. Esta evaluación permite dimensionar la importancia de cada modo de falla y constituye una base fundamental para la posterior determinación de la criticidad y la priorización de acciones dentro del análisis FMECA (SAE JA1011).

2.3.1 FALLAS FUNCIONALES

Tabla 2-4 Fallas funcionales del chancador primario Salas

Ítem	Subsistema	Función	Falla funcional
1	Mandíbula móvil	Reducir material con tamaño máximo de 10" a un producto entre 3" y 6" mediante movimiento oscilatorio a 1440 RPM.	1.1 Incapacidad para triturar por pérdida de movimiento/recorrido
2	Mandíbula fija	Mantener la superficie de compresión necesaria para permitir una reducción eficiente dentro del rango de 3" – 6".	2.2 Incapacidad para triturar adecuadamente por pérdida de geometría, soporte o superficie efectiva de trituración.
3	Eje excéntrico	Generar el movimiento excéntrico continuo a 1440 RPM para accionar la mandíbula móvil.	3.1 Pérdida de transmisión del movimiento excéntrico

4	Volante	Aportar inercia al sistema para estabilizar el giro del eje a 1440 RPM durante la operación.	4.1 Vibraciones excesivas o pérdida de estabilidad del giro
5	Sistema de transmisión por correas-poleas	Transmitir la potencia de 10 HP desde el motor hacia el eje excéntrico sin pérdida de energía ni patinaje.	5.1 Pérdida de transmisión de potencia (patinaje, corte o transmisión irregular)
6	Motor eléctrico	Entregar 10 HP de potencia a 380 V y 50 Hz, con corriente nominal de 15,6 A en operación normal.	6.1 Detención del equipo o pérdida de potencia
7	Rodamientos	Permitir el giro del eje excéntrico a 1440 RPM soportando cargas dinámicas generadas por una capacidad de 200–350 kg/h.	7.1 Aumento de fricción, temperatura o bloqueo
8	Sistema de lubricación (mangueras/puntos)	Proveer lubricación continua a componentes móviles para mantener operación estable bajo carga de trituración de hasta 10" de alimentación.	8.1 Lubricación insuficiente o nula
9	Estructura	Soportar el peso total del equipo (2.800 kg) y las cargas dinámicas asociadas a una capacidad de 200–350 kg/h.	9.1 Pérdida de integridad o rigidez estructural
10	Tolva / chute de descarga	Permitir el flujo continuo de material triturado de 3" – 6" hacia el cajón receptor de 20 litros.	10.1 Atoros, derrames o alimentación irregular
11	Protecciones		

		Proteger al operador mediante resguardos mecánicos y parada de emergencia durante operación eléctrica a 380 V.	11.1 Exposición de partes móviles (riesgo de atrapamiento)
12	Sistema eléctrico de mando y protección	Controlar el arranque y parada del motor trifásico de 10 HP y proteger el sistema ante sobrecorrientes superiores a 15,6 A.	12.1 Pérdida de control eléctrico o disparos intempestivos

Fuente: Elaboración propia en base a FMECA.

2.3.2 MODOS DE FALLA

Tabla 2-5 Modos de falla del chancador primario Salas

Falla funcional	Modo de falla
1.1 Incapacidad para triturar por pérdida de movimiento/recorrido	1.1.1 Placa de móvil fisurada.
	1.1.2 Placa de mandíbula móvil desgastada en zona de contacto.
	1.1.3 Conjunto de fijación suelto.
	1.1.4 Mandíbula móvil desalineada.
	1.1.5 Soportes/placas de sujeción fisurados.
2.2 Incapacidad para triturar adecuadamente por pérdida de geometría, soporte o superficie efectiva de trituración.	2.1.1 Placa fija con desgaste irregular.
	2.1.2 Placa fija desplazada de posición.
	2.1.3 Soporte de la mandíbula fija fisurado en zona de anclaje
	2.1.4 Acumulación de material detrás de la placa fija.
	2.1.5 Pernos de fijación de placa fija sueltos.
3.1 Pérdida de transmisión del movimiento excéntrico	3.1.1 Eje excéntrico desgastado en apoyos.
	3.1.2 Eje excéntrico doblado.
	3.1.3 Eje excéntrico fisurado.
	3.1.4 Chaveta/acople cortado.

	3.1.5 Excentricidad fuera de tolerancia.
4.1 Vibraciones excesivas o pérdida de estabilidad del giro	4.1.1 Volante desbalanceado.
	4.1.2 Volante fisurado en zona de cubo.
	4.1.3 Pernos del volante aflojados.
	4.1.4 Cubo del volante desgastado.
	4.1.5 Llave/chaveta del volante cortada.
5.1 Pérdida de transmisión de potencia (patinaje, corte o transmisión irregular)	5.1.1 Desgaste y envejecimiento de correas.
	5.1.2 Desalineación correa–polea.
	5.1.3 Tensión incorrecta de correas.
	5.1.4 Pérdida de perfil funcional del canal de la polea.
	5.1.5 Aflojamiento/daño en fijación de polea
6.1 Detención del equipo o pérdida de potencia	6.1.1 Bobinado quemado.
	6.1.2 Motor sobrecalentado.
	6.1.3 Rodamientos del motor gripados.
	6.1.4 Aislamiento eléctrico degradado.
	6.1.5 Eje del motor desalineado con la transmisión.
7.1 Aumento de fricción, temperatura o bloqueo	7.1.1 Rodamiento desgastado.
	7.1.2 Rodamiento contaminado.
	7.1.3 Rodamiento gripado.
	7.1.4 Jaula fracturada.
	7.1.5 Ajuste incorrecto (holgura).
8.1 Lubricación insuficiente o nula	8.1.1 Manguera de lubricación obstruida.
	8.1.2 Manguera de lubricación rota.
	8.1.3 Conexión suelta (fuga de grasa/aceite).
	8.1.4 Punto de engrase tapado (grasera dañada).
	8.1.5 Lubricante incorrecto (viscosidad/tipo).
9.1 Pérdida de integridad o rigidez estructural	9.1.1 Estructura fisurada.
	9.1.2 Pernos estructurales aflojados.
	9.1.3 Soldaduras trizadas en zonas de esfuerzo.
	9.1.4 Placas de apoyo deformadas.
	9.1.5 Base desnivelada.
10.1 Atoros, derrames o alimentación irregular	10.1.1 Tolva deformada.
	10.1.2 Acumulación excesiva de material fino (atasco).
	10.1.3 Desgaste interno acelerado (placas gastadas).
	10.1.4 Unión/abrazaderas aflojadas.
	10.1.5 Chute fisurado por vibración y golpe.
11.1 Exposición de partes móviles (riesgo de atrapamiento)	11.1.1 Protección deformada.
	11.1.2 Fijaciones sueltas (pernos/abrazaderas faltantes).
	11.1.3 Malla/rejilla rota o cortada.

	11.1.4 Protección removida.
	11.1.5 Puerta sin seguro (apertura accidental).
12.1 Pérdida de control eléctrico o disparos intempestivos	12.1.1 Cableado dañado (cortado/pelado).
	12.1.2 Contactores pegados.
	12.1.3 Relé térmico mal calibrado (disparos falsos).
	12.1.4 Fusible fundido.
	12.1.5 Parada de emergencia defectuosa.

Fuente: Elaboración propia en base a FMECA.

2.3.3 NÚMERO DE PRIORIDAD DE RIESGO

El Número de Prioridad de Riesgo (NPR) constituye un indicador cuantitativo utilizado para ordenar y jerarquizar los modos de falla en función de su impacto potencial sobre el desempeño del activo. Su determinación considera de manera integrada la probabilidad de ocurrencia (P_o) del modo de falla, la severidad de las consecuencias (S_o) asociadas a la pérdida de la función y la probabilidad de detección (P_d) previa a la ocurrencia de la falla funcional, la combinación de estos factores permite diferenciar aquellos modos de falla que representan un mayor riesgo para la operación.

La asignación de valores a cada uno de estos factores se realiza siguiendo la escala propuesta por la norma SAE J1739, la cual establece rangos discretos entre 1 y 10 para representar distintos niveles de riesgo. El producto de estas variables permite obtener el NPR, facilitando la comparación objetiva entre modos de falla y la selección de aquellos más críticos para su posterior análisis y definición de estrategias de mantenimiento orientadas a mejorar la confiabilidad, disponibilidad y continuidad operacional del sistema (SAE J1739).

$$NPR = P_o \times S_o \times P_d$$

Fórmula 2-1 Número de prioridad de riesgo

Fuente: Elaboración propia, basada en la norma SAE J1739.

Probabilidad de Ocurrencia (Po)

La probabilidad de ocurrencia (Po) corresponde a la estimación de la frecuencia con la que un determinado modo de falla puede presentarse durante la operación normal del activo, conforme a la norma SAE J1739, este parámetro se evalúa mediante una escala de 1 a 10, donde los valores más bajos representan eventos poco probables y los valores más altos indican una alta recurrencia esperada. La asignación de Po se fundamenta en el análisis del historial de fallas, la experiencia operacional, la confiabilidad de los componentes involucrados y las condiciones de operación del proceso, considerando además la posible influencia de eventos aleatorios que puedan gatillar la ocurrencia del modo de falla (SAE J1739).

Tabla 2-6 Criterio sugerido para Probabilidad de ocurrencia

Probabilidad de falla	Posible tasa de falla	Ranking
Muy alta: La falla es casi inevitable	≥ 1 en 2	10
	1 en 3	9
Alta: Generalmente asociadas a procesos similares o procesos previos, que presentan fallas con frecuencia	1 en 8	8
	1 en 20	7
Moderada: Generalmente asociadas a procesos similares o procesos previos que experimentan fallas ocasionales, pero no en mayores proporciones	1 en 80	6
	1 en 400	5
	1 en 2.000	4
Bajas: Fallas aisladas asociadas con procesos similares	1 en 15.000	3
Muy baja: Solo fallas aisladas asociadas con procesos casi idénticos	1 en 150.000	2
Remota: La falla es poco probable. No se repiten las fallas de procesos casi idénticos	≤ 1 en 1.500.000	1

Fuente: Norma SAE J1739

Severidad de la Consecuencia (So)

La severidad de la consecuencia (So) corresponde a la magnitud del impacto que genera un modo de falla una vez que este se materializa, de acuerdo con los lineamientos de la norma SAE J1739, este factor se evalúa mediante una escala de 1 a 10, donde los valores más bajos representan consecuencias menores y los valores más altos corresponden a efectos de alta gravedad. La asignación de So considera el impacto potencial del modo de falla sobre la seguridad

del personal, la salud ocupacional, el medio ambiente, los costos operacionales y el cumplimiento de requisitos legales y normativos, permitiendo identificar aquellos modos de falla cuyas consecuencias resultan más críticas para la operación del sistema (SAE J1739).

Tabla 2-7 Criterio sugerido para Severidad de la consecuencia.

Severidad	Criterios	Clasificación
Ninguna	No hay efecto discernible	1
Muy menor	Ajuste y terminado/chirrido y traqueteo. El ítem no cumple. Defecto observado por clientes perceptivos (menos del 25 %)	2
Menor	Ajuste y terminado/chirrido y traqueteo. El ítem no cumple. Defecto observado por el 50 % de los clientes	3
Muy baja	Ajuste y terminado/chirrido y traqueteo. El ítem no cumple. Defecto observado por la mayoría de clientes (más del 75 %)	4
Baja	Vehículo/ítem operable pero ítem(es) de confort/conveniencia operable(s) a un nivel de desempeño reducido. Cliente un poco insatisfecho.	5
Moderada	Vehículo/ítem operable pero ítem(es) de confort/conveniencia inoperable(s). Cliente insatisfecho.	6
Alta	Vehículo/ítem operable pero a un nivel de desempeño reducido. Cliente muy insatisfecho.	7
Muy alta	Vehículo/ítem inoperable (pérdida de la función primaria).	8
Peligrosa con advertencia	Clasificación de severidad muy alta cuando un modo de falla potencial afecta la operación segura del vehículo y/o implica no conformidad con las reglamentaciones gubernamentales con advertencia.	9
Peligrosa sin advertencia	Clasificación de severidad muy alta cuando un modo de falla potencial afecta la operación segura del vehículo y/o implica no conformidad con las reglamentaciones gubernamentales sin advertencia.	10
NOTA Tomado de SAE J 1739.		

Fuente: Norma SAE J1739

Probabilidad de Detección del Modo de Falla (Pd)

La probabilidad de detección (Pd) representa la capacidad del sistema de mantenimiento para identificar un modo de falla antes de que este derive en una falla funcional, conforme a la norma SAE J1739, este parámetro se valora mediante una escala de 1 a 10, donde los valores más bajos indican una alta probabilidad de detección temprana y los valores más altos reflejan una baja capacidad de detección. La asignación del valor de Pd considera factores tales como la efectividad de los mecanismos de control existentes, la frecuencia y calidad de las inspecciones, el nivel de monitoreo de condición implementado y la posibilidad de errores humanos durante las actividades de detección, permitiendo evaluar el grado de exposición del activo frente a fallas no detectadas oportunamente (SAE J1739).

Tabla 2-8 Criterio sugerido para Probabilidad de detección.

Detección	Criterios: Probabilidad de detección de un modo de falla	Ranking
Casi imposible	No existen controles disponibles para detectar el modo de falla	10
Muy remota	Muy remota probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	9
Remota	Remota probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	8
Muy baja	Muy baja probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	7
Baja	Baja probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	6
Moderada	Moderada probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	5
Moderadamente alta	Moderadamente alta probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	4
Alta	Alta probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	3
Muy alta	Muy alta probabilidad de que los controles actuales puedan detectar el modo de falla	2
Casi cierta	Los actuales controles son casi ciertos para detectar el modo de falla. Detección confiable	1

Fuente: Norma SAE J1739

A continuación en la **Tabla 2-9** se presenta los NPR para cada uno de los modos de falla:**Tabla 2-9** NPR para cada modo de Falla

Modo de falla	Po	So	Pd	NPR
1.1.1 Placa de móvil fisurada.	4	9	6	216
1.1.2 Placa de mandíbula móvil desgastada en zona de contacto.	5	8	5	200
1.1.3 Conjunto de fijación suelto.	5	9	6	270
1.1.4 Mandíbula móvil desalineada.	4	8	6	192
1.1.5 Soportes/placas de sujeción fisurados.	4	9	6	216
2.1.1 Placa fija con desgaste irregular.	7	5	5	175
2.1.2 Placa fija desplazada de posición.	9	4	6	216
2.1.3 Soporte de la mandíbula fija fisurado en zona de anclaje	9	4	6	216
2.1.4 Acumulación de material detrás de la placa fija.	6	5	5	150
2.1.5 Pernos de fijación de placa fija sueltos.	4	5	5	100
3.1.1 Eje excéntrico desgastado en apoyos.	5	9	6	270
3.1.2 Eje excéntrico doblado.	3	8	6	144

3.1.3 Eje excéntrico fisurado.	3	9	7	189
3.1.4 Chaveta/acople cortado.	4	8	5	160
3.1.5 Excentricidad fuera de tolerancia.	5	9	6	270
4.1.1 Volante desbalanceado.	4	8	6	192
4.1.2 Volante fisurado en zona de cubo.	3	9	6	162
4.1.3 Pernos del volante aflojados.	4	8	5	160
4.1.4 Cubo del volante desgastado.	3	7	6	126
4.1.5 Llave/chaveta del volante cortada.	4	8	5	160
5.1.1 Desgaste y envejecimiento de correas.	6	6	4	144
5.1.2 Desalineación correa-polea.	7	5	6	210
5.1.3 Tensión incorrecta de correas.	6	5	4	120
5.1.4 Pérdida de perfil funcional del canal de la polea.	5	4	5	100
5.1.5 Aflojamiento/daño en fijación de polea	7	3	6	126
6.1.1 Bobinado quemado.	3	9	7	189
6.1.2 Motor sobrecalentado.	4	7	4	112
6.1.3 Rodamientos del motor gripados.	3	8	6	144
6.1.4 Aislamiento eléctrico degradado.	3	9	6	162
6.1.5 Eje del motor desalineado con la transmisión.	4	7	5	140
7.1.1 Rodamiento desgastado.	5	8	5	200
7.1.2 Rodamiento contaminado.	5	9	6	270
7.1.3 Rodamiento gripado.	4	8	6	192
7.1.4 Jaula fracturada.	3	8	6	144
7.1.5 Ajuste incorrecto (holgura).	4	7	5	140
8.1.1 Manguera de lubricación obstruida.	5	9	6	270
8.1.2 Manguera de lubricación rota.	4	8	4	128
8.1.3 Conexión suelta (fuga de grasa/aceite).	4	8	5	160
8.1.4 Punto de engrase tapado (grasera dañada).	4	7	5	140
8.1.5 Lubricante incorrecto (viscosidad/tipo).	4	8	5	160
9.1.1 Estructura fisurada.	3	9	6	162
9.1.2 Pernos estructurales aflojados.	5	9	6	270
9.1.3 Soldaduras trizadas en zonas de esfuerzo.	4	8	6	192
9.1.4 Placas de apoyo deformadas.	3	7	5	105
9.1.5 Base desnivelada.	3	7	5	105
10.1.1 Tolva deformada.	3	6	4	72
10.1.2 Acumulación excesiva de material fino (atasco).	4	6	4	96
10.1.3 Desgaste interno acelerado (placas gastadas).	4	6	4	96
10.1.4 Unión/abrazaderas aflojadas.	3	6	4	72
10.1.5 Chute fisurado por vibración y golpe.	3	6	5	90
11.1.1 Protección deformada.	3	9	5	135

11.1.2 Fijaciones sueltas (pernos/abrazaderas faltantes).	4	9	5	180
11.1.3 Malla/rejilla rota o cortada.	3	9	5	135
11.1.4 Protección removida.	3	9	6	162
11.1.5 Puerta sin seguro (apertura accidental).	3	9	6	162
12.1.1 Cableado dañado (cortado/pelado).	3	8	5	120
12.1.2 Contactores pegados.	3	8	6	144
12.1.3 Relé térmico mal calibrado (disparos falsos).	3	6	5	90
12.1.4 Fusible fundido.	3	6	4	72
12.1.5 Parada de emergencia defectuosa.	3	9	6	162

Fuente: Elaboración propia en base a cálculo de número de prioridad de riesgo.

A partir de la evaluación del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) y de la jerarquización de los modos de falla asociados al Chancador Primario Salas, se seleccionaron aquellos modos de falla que presentan el mayor nivel de criticidad y que, por tanto, concentran el mayor impacto potencial sobre la confiabilidad, la disponibilidad y la continuidad operacional del activo, identificándose un total de doce modos de falla críticos que constituyen la base para el desarrollo del análisis posterior y la definición de las estrategias de mantenimiento propuestas.

Se estableció como criterio de selección un NPR mayor o igual a 200, valor que corresponde a un umbral de riesgo elevado ampliamente utilizado en análisis FMEA, ya que se asocia a combinaciones significativas de probabilidad de ocurrencia, severidad de las consecuencias y baja capacidad de detección. La literatura técnica y las mejores prácticas en gestión de activos respaldan que, a partir de este nivel de NPR, los modos de falla deben ser priorizados y gestionados mediante acciones específicas de control y mitigación del riesgo (SAE J1739; AIAG, 2008; Moubray, 1997).

Los modos de falla críticos identificados corresponden a:

1.1.1 Placa de mandíbula móvil fisurada.

1.1.2 Placa de mandíbula móvil desgastada en la zona de contacto por abrasión.

- 1.1.3 Conjunto de fijación suelto.
- 1.1.5 Soportes de sujeción fisurados.
- 2.1.2 Placa fija desplazada de posición.
- 2.1.3 Soporte de la mandíbula fija fisurado en la zona de anclaje.
- 3.1.1 Lubricación insuficiente en el sistema del eje excéntrico.
- 3.1.5 Excentricidad fuera de tolerancia.
- 7.1.1 Rodamiento desgastado.
- 7.1.2 Rodamiento contaminado.
- 8.1.1 Manguera de lubricación obstruida.
- 9.1.2 Pernos estructurales aflojados.

La tabla con los rangos NPR utilizados se presenta a continuación.

Tabla 2-10 Rangos NPR utilizados.

Rango NPR	Nivel de criticidad
$NPR < 50$	Bajo
$50 \leq NPR < 100$	Medio
$100 \leq NPR < 200$	Alto
$NPR \geq 200$	Crítico

Fuente: Elaboración propia conforme a la metodología FMECA.

2.3.4 EFECTOS DE FALLA

Con el fin de enfocar el análisis en los eventos que generan mayor impacto técnico y operacional, la evaluación detallada de los efectos de falla se desarrollará únicamente para aquellos modos de falla clasificados como críticos, según el valor del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) obtenido en el análisis FMECA. Esta decisión permite concentrar el estudio en los escenarios con mayor severidad, mayor probabilidad de ocurrencia y menor capacidad de detección, de esta manera, se mantiene la rigurosidad técnica del análisis, orientando las

conclusiones hacia los factores que realmente influyen en el desempeño y disponibilidad del activo crítico.

Tabla 2-11 Efectos de falla para modos de falla críticos.

Falla funcional	Modo de falla	Efecto de falla
1.1 Incapacidad para triturar por pérdida de movimiento/recorrido	1.1.1 Placa de mandíbula móvil fisurada	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: Se generan ruidos/vibraciones anormales y pérdida de eficiencia de trituración. La fisura progresa por fatiga hasta comprometer la integridad de la placa, pudiendo producir desprendimientos internos y detención no planificada. Se afecta la capacidad y la granulometría, requiriendo inspección visual frecuente y eventual reemplazo.
	1.1.2 Placa de mandíbula móvil desgastada en zona de contacto.	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La pérdida de perfil reduce el área efectiva de trituración, disminuye la capacidad y altera la granulometría del producto. Se

		<p>incrementa el tiempo de proceso y la probabilidad de atascos por geometría inadecuada. El desgaste es progresivo y lleva a un punto donde el cambio de placa es necesario para recuperar desempeño.</p>
	<p>1.1.3 Conjunto de fijación suelto.</p>	<p>Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: Sí (potencial). Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: Se generan holguras que provocan golpes, vibración elevada y pérdida de rigidez en el conjunto mandíbula–soportes. La condición acelera el desgaste de componentes asociados y puede derivar en desalineación o daño estructural. Si progresa, aumenta la probabilidad de detención correctiva por inestabilidad mecánica, por lo que el control de apriete resulta crítico.</p>

	1.1.5 Soportes de sujeción fisurados.	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: Sí (potencial). Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: Disminuye la capacidad del soporte para absorber cargas dinámicas, generando desalineación progresiva y vibración severa. La fisura puede evolucionar a falla completa del soporte, provocando pérdida de estabilidad del conjunto y detención no planificada. Requiere detección temprana por inspección visual para evitar daño secundario.
2.1 Incapacidad para triturar adecuadamente por pérdida de geometría, soporte o superficie efectiva de trituración.	2.1.2 Placa fija desplazada de posición.	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: Se altera el “gap” y la geometría de trituración, afectando directamente la capacidad y el tamaño del producto. Puede producir atascos por mala descarga, vibración anormal y aumento de recirculación/tiempo de proceso. Se requiere verificación

		<p>periódica del asentamiento y sujeción para mantener estabilidad operacional.</p>
	<p>2.1.3 Soporte de la mandíbula fija fisurado en zona de anclaje.</p>	<p>Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: Sí (potencial). Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: Se pierde rigidez en el anclaje de la mandíbula fija, generando desalineación del conjunto, vibración alta y reducción de eficiencia. La progresión de la fisura puede comprometer la sujeción estructural, aumentando la probabilidad de daño adicional y detención correctiva. Exige inspección y reparación o refuerzo en etapas tempranas.</p>

3.1 Pérdida de transmisión del movimiento excéntrico	3.1.1 Lubricación insuficiente en el sistema del eje excéntrico.	Evidente/no evidente: No evidente sin medición; se manifiesta por síntomas. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: El movimiento oscilatorio se desvía de la condición de diseño, generando vibración característica, pérdida de estabilidad y disminución de desempeño de trituración. Aumenta el daño por cargas dinámicas sobre rodamientos, eje, volante y estructura. Su detección confiable requiere monitoreo de vibración/condición y corrección del desalineamiento o ajuste mecánico.
	3.1.5 Excentricidad fuera de tolerancia.	Evidente/no evidente: No evidente en etapa temprana; detectable por condición. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: Aumenta gradualmente el juego interno, la vibración y la temperatura. La fricción elevada reduce eficiencia y puede evolucionar a gripado,

		<p>provocando detención no planificada y daño secundario en eje y alojamientos.</p> <p>El control por vibraciones/temperatura permite intervenir antes de la falla catastrófica.</p>
7.1 Aumento de fricción, temperatura o bloqueo	7.1.1 Rodamiento desgastado.	<p>Evidente/no evidente: No evidente en etapa temprana; detectable por condición. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: Aumenta gradualmente el juego interno, la vibración y la temperatura. La fricción elevada reduce eficiencia y puede evolucionar a gripado, provocando detención no planificada y daño secundario en eje y alojamientos. El control por vibraciones/temperatura permite intervenir antes de la falla catastrófica.</p>
	7.1.2 Rodamiento contaminado.	<p>Evidente/no evidente: No evidente; detectable por condición. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto</p>

		<p>de falla: Partículas o contaminación degradan superficies de rodadura y lubricante, acelerando el desgaste y elevando la temperatura. Se incrementa la vibración y la probabilidad de falla prematura (jaula dañada o gripado). La detección requiere análisis de vibraciones/temperatura y acciones correctivas sobre sellos/lubricación.</p>
8.1 Lubricación insuficiente o nula	8.1.1 Manguera de lubricación obstruida.	<p>Evidente/no evidente: No evidente (hasta que aparecen síntomas). Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: Se reduce o interrumpe el flujo de lubricante hacia puntos críticos, provocando lubricación insuficiente y aumento rápido de fricción/temperatura. Esto acelera desgaste de rodamientos/eje y eleva el riesgo de detención por daño mecánico. Requiere verificación periódica del flujo para asegurar suministro continuo.</p>

9.1 Pérdida de integridad o rigidez estructural	9.1.2 Pernos estructurales aflojados.	Evidente/no evidente: No evidente al inicio; luego evidente por vibración. Afecta SHA: Sí (potencial). Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La pérdida de apriete reduce la rigidez estructural y aumenta vibraciones, lo que afecta alineación del conjunto y acelera daño en componentes mecánicos. Si progresa, puede derivar en deformaciones, fisuras o inestabilidad del equipo. Requiere control de apriete y, cuando corresponde, reemplazo programado de elementos críticos para asegurar integridad.
---	---------------------------------------	--

Fuente: Elaboración propia en base a FMECA.

2.3.5 HOJAS DE DECISIONES

Una vez identificados y priorizados los modos de falla críticos mediante el análisis del Número de Prioridad de Riesgo (NPR), se procede a la aplicación de la hoja de decisión RCM, herramienta que permite definir de manera sistemática las estrategias de mantenimiento más adecuadas para cada caso. En esta etapa se evalúan las consecuencias operacionales, de

seguridad y económicas asociadas a cada modo de falla, junto con la posibilidad de su detección anticipada.

A partir de este análisis, se determina si resulta técnica y económicamente conveniente aplicar tareas de mantenimiento basadas en condición, intervenciones preventivas programadas, acciones de rediseño o, cuando corresponda, permitir la operación hasta la falla. De esta forma, la hoja de decisión constituye el vínculo entre la criticidad identificada y la definición concreta del plan de mantenimiento, asegurando coherencia entre el nivel de riesgo y la estrategia adoptada.

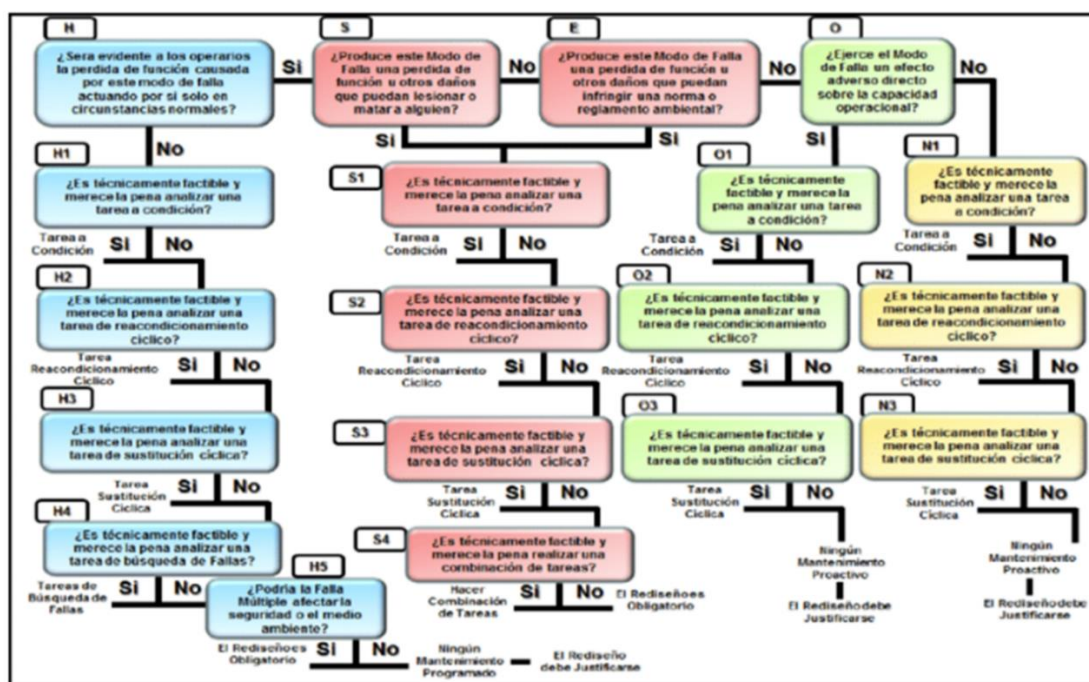


Figura 2-9 Hoja de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).

Fuente: Adaptado de Moubray (1997), en concordancia con los criterios establecidos en SAE JA1011

En esta herramienta, las columnas H, S, E y O representan respectivamente las consecuencias asociadas a fallas ocultas, seguridad del personal, impacto medioambiental y efectos operacionales, permitiendo clasificar el tipo de impacto que genera cada modo de falla dentro del contexto real de operación del activo. Para cada una de estas categorías, la hoja de decisión establece una secuencia lógica de preguntas que orienta el análisis hacia la definición de una acción concreta.

Para cada categoría de consecuencia, la hoja de decisión permite evaluar si es técnica y económicamente viable aplicar una tarea proactiva, diferenciando mediante su codificación entre tareas basadas en condición, tareas de reacondicionamiento cíclico y tareas de sustitución cíclica, asegurando que la estrategia seleccionada sea coherente con el comportamiento del modo de falla y con el nivel de riesgo que este representa.

En aquellos casos donde el análisis conduce a las posiciones H4, H5 o S4, la lógica de la hoja indica que no es posible asignar una tarea proactiva técnicamente viable y justificable para controlar el modo de falla. En estas situaciones no se establece mantenimiento preventivo o basado en condición, debiendo evaluarse alternativas como la justificación de un rediseño, la implementación de controles adicionales o la aceptación del riesgo bajo determinadas condiciones operacionales.

La columna correspondiente a la tarea de mantenimiento resume el resultado del proceso de decisión, especificando el tipo de intervención que debe aplicarse para cada modo de falla, lo

que permite traducir el análisis en acciones concretas para el área de mantenimiento. Esta información facilita la planificación, la asignación de recursos y la ejecución consistente de las estrategias definidas para preservar la función del activo.

Finalmente, la hoja de decisión establece una secuencia lógica que parte desde la identificación del tipo de consecuencia y avanza según las respuestas afirmativas o negativas hasta definir una estrategia específica, ya sea de carácter proactivo, preventivo o correctivo. Este procedimiento sistemático asegura coherencia entre el riesgo identificado y la acción adoptada, manteniendo trazabilidad en las decisiones tomadas durante la aplicación del RCM (Moubray, 1997; SAE JA1011).

A continuación desde la **Tabla 2-12** hasta la **Tabla 2-17** se presenta la hoja de decisiones obtenida para este análisis realizado por cada subsistema:

Tabla 2-12 Hoja de decisión subsistema Mandíbula Movil.

HOJA DE DECISIÓN RCM		SISTEMA/ACTIVO: Chancador Primario Salas											SISTEMA N°:1	FACILITADOR:	FECHA:	HOJA N°:1
		SUB-SISTEMA/COMPONENTE: Mandíbula móvil											SUB-SISTEMA N°:1	AUDITOR:	FECHA:	DE:
REFERENCIA DE INFORMACIÓN			EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS				H1	H2	H3	TAREAS"A FALTA DE"			TAREAS PROPUESTAS	FRECUENCIA INICIAL	A REALIZAR POR	
							S1	S2	S3							
							O1	O2	O3							
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
Reducir material con tamaño máximo de 10" a un producto entre 3" y 6" mediante movimiento oscilatorio a 1440 RPM.	1.1 Incapacidad para triturar por pérdida de movimiento/recorrido	1.1.1 Placa de mandíbula móvil fisurada	S	N	N	S	S						Tarea a condición: Inspección visual de la placa de mandíbula móvil para detectar fisuras, deformaciones y ruidos anómalos.	Senanal	Técnico Mantenimiento Mecánico	
		1.1.2 Placa de mandíbula móvil desgastada en zona de contacto.	S	N	N	S	N	N	S				Tarea Sustitución Ciclica: Cambio de placa de chancado de la mandíbula móvil para mantener la capacidad de proceso y la granulometría del producto.	Mensual	Técnico Mantenimiento Mecánico	
		1.1.3 Conjunto de fijación suelto.	S	S			S						Tarea a condición: Verificación del estado de apriete del conjunto de fijación de la mandíbula móvil para prevenir holguras estructurales durante la operación.	Mensual	Técnico Mantenimiento Mecánico	
		1.1.5 Soportes de sujeción fisurados.	S	S			S						Tarea a condición: Inspección visual de soportes de sujeción para detectar fisuras y pérdida de integridad estructural.	Mensual	Técnico Mantenimiento Mecánico	

Fuente: Elaboración propia en base a hoja de decisiones.

Tabla 2-13 Hoja de decisión subsistema Mandíbula Fija.

HOJA DE DECISIÓN RCM			SISTEMA/ACTIVO: Chancador Primario Salas										SISTEMA N°:1	FACILITADOR:	FECHA:	HOJA N°:1		
			SUB-SISTEMA/COMPONENTE: Mandíbula fija										SUB-SISTEMA N°:1	AUDITOR:	FECHA:	DE:		
REFERENCIA DE INFORMACIÓN			EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS				H1	H2	H3	TAREAS "A FALTA DE"				TAREAS PROPUESTAS	FRECUENCIA INICIAL	A REALIZAR POR		
F	FF	MF	H	S	E	O	S1	S2	S3	O1	O2	O3	H4				H5	S4
							N1	N2	N3									
Mantener la superficie de compresión necesaria para permitir una reducción eficiente dentro del rango de 3" – 6".	2.1 Incapacidad para triturar adecuadamente por pérdida de geometría, soporte o superficie efectiva de trituración.	2.1.2 Placa fija desplazada de posición.	S	N	N	S	S									Tarea a condición: Verificación de la posición y correcto asentamiento de la placa fija para asegurar la estabilidad del proceso de trituración.	Mensual	Técnico Mantenimiento Mecánico
		2.1.3 Soporte de la mandíbula fija fisurado en zona de anclaje.	S	S			S									Tarea a condición: Inspección visual del soporte de la mandíbula fija en la zona de anclaje, orientada a detectar fisuras visibles, deformaciones, corrosión o pérdida de integridad estructural.	Mensual	Técnico Mantenimiento Mecánico

Fuente: Elaboración propia en base a hoja de decisiones.

Tabla 2-14 Hoja de decisión subsistema Excéntrico.

HOJA DE DECISIÓN RCM			SISTEMA/ACTIVO: Chancador Primario Salas							SISTEMA N°:1	FACILITADOR:	FECHA:	HOJA N°:1		
			SUB-SISTEMA/COMPONENTE: Eje Excéntrico							SUB-SISTEMA N°:1	AUDITOR:	FECHA:	DE:		
REFERENCIA DE INFORMACIÓN			EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS				H1	H2	H3	TAREAS"A FALTA DE"			TAREAS PROPUESTAS	FRECUENCIA INICIAL	A REALIZAR POR
F	FF	MF	H	S	E	O	S1	S2	S3	H4	H5	S4			
							O1	O2	O3						
							N1	N2	N3						
Generar el movimiento excéntrico continuo a 1440 RPM para accionar la mandíbula móvil.	3.1 Pérdida de transmisión del movimiento excéntrico	3.1.1 Lubricación insuficiente en el sistema del eje excéntrico.	S	S			S						Tarea a condición: Verificación del suministro de lubricación al sistema del eje excéntrico para asegurar la correcta entrega de lubricante a los puntos críticos.	Semanal	Técnico Mantenimiento Mecánico
		3.1.5 Excentricidad fuera de tolerancia.	S	N	N	S	S							Tarea a condición: Monitoreo de vibraciones del conjunto del eje excéntrico para detectar desviaciones asociadas a excentricidad fuera de tolerancia.	Mensual

Fuente: Elaboración propia en base a hoja de decisiones.

Tabla 2-15 Hoja de decisión subsistema Rodamientos.

HOJA DE DECISIÓN RCM			SISTEMA/ACTIVO: Chancador Primario Salas										SISTEMA N°:1	FACILITADOR:	FECHA:	HOJA N°:1			
			SUB-SISTEMA/COMPONENTE: Rodamientos										SUB-SISTEMA N°:1	AUDITOR:	FECHA:	DE:			
REFERENCIA DE INFORMACIÓN			EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS				H1	H2	H3	TAREAS"A FALTA DE"			TAREAS PROPUESTAS		RECUENCIA INICIAL	A REALIZAR POR			
F	FF	MF	H	S	E	O	S1	S2	S3	O1	O2	O3	H4	H5	S4				
							N1	N2	N3										
Permitir el giro del eje excéntrico a 1440 RPM soportando cargas dinámicas generadas por una capacidad de 200–350 kg/h.	7.1 Aumento de fricción, temperatura o bloqueo	7.1.1 Rodamiento desgastado.	S	N	N	S	S										Tarea a condición: Monitoreo del estado del rodamiento mediante análisis de vibraciones y control de temperatura para detectar desgaste progresivo.	Mensual	Especialista de Monitoreo de Condición (Externo).
		7.1.2 Rodamiento contaminado.	S	N	N	S	S											Tarea a condición: Verificación del estado del rodamiento mediante análisis de vibraciones y control de temperatura para detectar efectos de contaminación interna.	Mensual

Fuente: Elaboración propia en base a hoja de decisiones.

Tabla 2-16 Hoja de decisión subsistema Sistema de lubricación.

HOJA DE DECISIÓN RCM			SISTEMA/ACTIVO: Chancador Primario Salas										SISTEMA N°:1	FACILITADOR:	FECHA:	HOJA N°:1		
			SUB-SISTEMA/COMPONENTE: Sistema de lubricación										SUB-SISTEMA N°:1	AUDITOR:	FECHA:	DE:		
REFERENCIA DE INFORMACIÓN			EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS				H1	H2	H3	TAREAS "A FALTA DE"			TAREAS PROPUESTAS	FRECUENCIA INICIAL	A REALIZAR POR			
F	FF	MF	H	S	E	O	S1	S2	S3	O1	O2	O3				H4	H5	S4
Proveer lubricación continua a componentes móviles para mantener operación estable bajo carga de trituración de hasta 10" de alimentación.	8.1 Lubricación insuficiente o nula	8.1.1 Manguera de lubricación obstruida.	S	N	N	S	S									Tarea a condición: Verificación del flujo de lubricante en la manguera de lubricación para asegurar el suministro adecuado a los puntos críticos del equipo.	Semanal	Técnico Mantenimiento Mecánico

Fuente: Elaboración propia en base a hoja de decisiones.

Tabla 2-17 Hoja de decisión subsistema Estructura.

HOJA DE DECISIÓN RCM			SISTEMA/ACTIVO: Chancador Primario Salas							SISTEMA N°:1	FACILITADOR:	FECHA:	HOJA N°:1		
			SUB-SISTEMA/COMPONENTE: Estructura							SUB-SISTEMA N°:1	AUDITOR:	FECHA:	DE:		
REFERENCIA DE INFORMACIÓN			EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS				H1	H2	H3	TAREAS "A FALTA DE"			TAREAS PROPUESTAS	FRECUENCIA INICIAL	A REALIZAR POR
F	FF	MF	H	S	E	O	S1	S2	S3	H4	H5	S4			
							O1	O2	O3						
Soportar el peso total del equipo (2.800 kg) y las cargas dinámicas asociadas a una capacidad de 200–350 kg/h.	9.1 Pérdida de integridad o rigidez estructural	9.1.2 Pernos estructurales aflojados.	S	S			N	N	S				Sustitución cíclica: Reemplazo programado de pernos estructurales críticos para asegurar la integridad y estabilidad del conjunto estructural del equipo.	Semestral	Técnico Mantenimiento Mecánico

Fuente: Elaboración propia en base a hoja de decisiones.

2.4 PROPUESTA DE PLANES DE MANTENIMIENTO BASADOS EN RCM

Una vez aplicada la metodología RCM conforme a Moubray y recorrido el árbol lógico de decisiones para cada modo de falla crítico del chancador primario Salas, se procede a la definición de los planes de mantenimiento asociados. Estas tareas no se establecen de manera arbitraria, sino que derivan directamente del análisis funcional, del FMECA y de la evaluación de las consecuencias identificadas, quedando cada actividad explícitamente vinculada a un modo de falla específico y a su impacto sobre el desempeño y la disponibilidad del equipo.

Planes de mantenimiento a condición

Para los modos de falla asociados a desgaste progresivo, pérdida de ajuste y degradación estructural observable, se definieron tareas de mantenimiento a condición orientadas a detectar fallas potenciales antes de que evolucionen hacia una falla funcional. Estas actividades incluyen inspecciones visuales sistemáticas, verificaciones de apriete y controles operacionales periódicos, permitiendo intervenir de forma anticipada sin afectar la continuidad operacional, en coherencia con los principios del RCM II donde se prioriza la detección temprana siempre que exista una relación clara entre el síntoma observable y el modo de falla analizado (Moubray, 1997).

Planes de mantenimiento por sustitución cíclica

En el caso de componentes sometidos a desgaste inevitable por abrasión, como las placas de chancado, se establecieron tareas de sustitución cíclica fundamentadas en la dificultad técnica de determinar con precisión el punto exacto de falla mediante inspección directa. Dado que el desgaste ocurre de manera acumulativa y depende de las características del material procesado, la sustitución programada permite mantener la capacidad de proceso del chancador y asegurar la estabilidad granulométrica del producto dentro de los estándares definidos en su contexto operacional.

Planes de mantenimiento mediante monitoreo de condición

Para los modos de falla vinculados al sistema de transmisión excéntrica y a los elementos rotativos críticos, se definieron tareas basadas en monitoreo de condición mediante termografía infrarroja y análisis de vibraciones, técnicas que permiten detectar desbalances, excentricidades, desgaste de rodamientos y deficiencias de lubricación a partir de variaciones anómalas en los niveles vibratorios y térmicos sin necesidad de intervenir directamente el equipo. En particular, el análisis de vibraciones es reconocido como una herramienta efectiva para la detección temprana de fallas en máquinas rotativas (Mobley, 2002), por lo que, considerando que el taller de mantenimiento no dispone de personal certificado ni de equipamiento especializado, se establece que estas tareas sean ejecutadas por un especialista externo en monitoreo de condición conforme a las buenas prácticas indicadas en la ISO 18436-1.

Síntesis del plan de mantenimiento RCM

Las tareas definidas configuran un plan de mantenimiento estructurado, en el cual cada intervención se encuentra claramente tipificada, con una periodicidad coherente con el comportamiento del modo de falla y con responsabilidades técnicas previamente establecidas. Esta estructuración permite ordenar las acciones sobre el activo crítico bajo criterios de análisis funcional y consecuencia, evitando decisiones improvisadas y asegurando coherencia entre diagnóstico y ejecución.

En este sentido, la planificación desarrollada refleja la evolución del mantenimiento hacia esquemas más sistemáticos y organizados, donde la toma de decisiones se sustenta en información técnica y análisis formal de fallas (Pistarelli, 2010). La integración del método Jackknife para la determinación de criticidad y del FMECA para la evaluación de modos de falla permite consolidar un marco de intervención consistente con prácticas modernas de gestión.

De esta manera, el plan RCM propuesto establece una base técnica sólida para evaluar su impacto sobre el desempeño operacional del activo. En particular, permitirá analizar en el Capítulo 3 la variación en los indicadores de disponibilidad del equipo, así como los costos asociados a su operación y el impacto económico para la empresa derivado de la reducción del riesgo.

CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA METODOLOGÍA RCM

3.1 IMPACTO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DEL EQUIPO

Con el fin de evaluar el impacto de la aplicación de RCM sobre la disponibilidad del activo, los parámetros asociados al Tiempo Total de Reparación (TTR), la frecuencia de fallas (FF) y el tiempo promedio de reparación por modo de falla (TTR_i) serán analizados y comparados en escenarios previos y posteriores a la implementación de la metodología, además la variación de estos indicadores permite estimar de forma directa los cambios en la indisponibilidad anual del equipo, y también su efecto en la disponibilidad operacional del sistema seleccionado como caso de estudio. De acuerdo con Moubray (1997), el RCM orienta la selección de tareas de mantenimiento hacia la reducción de las consecuencias de las fallas y la mejora de la mantenibilidad, lo que se traduce en incrementos medibles de disponibilidad sin requerir modificaciones físicas del activo.

$$TTR = \sum_{i=1}^n (FF_i * TTR \text{ por falla}_i)$$

Fórmula 3-1 Tiempo total de reparación.

Donde:

- TTR: Tiempo Total de Reparación anual del activo [h/año], correspondiente a la suma de las horas dedicadas a la atención de fallas durante el período analizado.
- FF_i : Frecuencia anual de ocurrencia del modo de falla i [eventos/año], determinada a partir de registros históricos o estimaciones técnicas fundamentadas en el análisis FMEA.

- TTR_i: Tiempo promedio de reparación asociado al modo de falla *i* [h/evento], que considera las actividades de diagnóstico, intervención técnica y puesta en servicio.
- *i*: Índice que representa cada uno de los modos de falla identificados en el FMEA.
- *n*: Número total de modos de falla considerados en el análisis.

En la **Tabla 3-1** se presentan los resultados correspondientes al escenario base, previo a la aplicación de la metodología RCM, donde se cuantifican la frecuencia de ocurrencia y los tiempos de reparación asociados a los modos de falla críticos identificados para el Chancador Primario Salas. Los resultados evidencian una alta recurrencia de fallas y un Tiempo Total de Reparación anual significativo, los cuales impactan directamente en la disponibilidad operacional del sistema, estos valores constituyen la línea base de comparación para evaluar posteriormente el efecto de la implementación del RCM.

Tabla 3-1 TPRR de Chancador Primario Salas previo a aplicación de RCM.

1.1.2 Placa mandíbula móvil desgastada por abrasión	2	20	40
1.1.3 Conjunto de fijación suelto	3	10	30
1.1.5 Soportes de sujeción fisurados	1	18	18
1.2.2 Placa fija desplazada de posición	2	12	24
1.2.3 Soporte mandíbula fija fisurado en anclaje	1	28	28
3.1.1 Lubricación insuficiente en eje excéntrico	4	8	32
3.1.5 Excentricidad fuera de tolerancia	1	24	24
7.1.1 Rodamiento desgastado	2	18	36
7.1.2 Rodamiento contaminado	3	14	42
8.1.1 Manguera de lubricación obstruida	3	8	24
9.1.2 Pernos estructurales aflojados	2	9	18
TOTAL	26		364 h/año

Fuente: Elaboración propia a partir de información del activo crítico.

En la **Tabla 3-2** se presentan los resultados correspondientes al escenario posterior a la aplicación de la metodología RCM, donde se logra reducir la recurrencia de fallas y optimizar los tiempos de intervención, transformando parte de las fallas correctivas no planificadas en actividades planificadas, gestionadas mediante tareas a condición y mantenimiento programado, como resultado, se observa una disminución del Tiempo Total de Reparación anual, en comparación con el escenario base.

Tabla 3-2 TPRR de Chancador Primario Salas al aplicar RCM.

Modo de falla crítico	FF con RCM (eventos/año)	TPRR con RCM (h/evento)	TPRR anual con RCM (h/año)
1.1.1 Placa de mandíbula móvil fisurada	1	17	17
1.1.2 Placa mandíbula móvil desgastada por abrasión	1	14	14
1.1.3 Conjunto de fijación suelto	1	7	7
1.1.5 Soportes de sujeción fisurados	1	13	13
1.2.2 Placa fija desplazada de posición	1	8	8
1.2.3 Soporte mandíbula fija fisurado en anclaje	1	20	20
3.1.1 Lubricación insuficiente en eje excéntrico	2	6	12
3.1.5 Excentricidad fuera de tolerancia	1	17	17
7.1.1 Rodamiento desgastado	1	13	13
7.1.2 Rodamiento contaminado	1	10	10
8.1.1 Manguera de lubricación obstruida	1	6	6
9.1.2 Pernos estructurales aflojados	1	6	6
TOTAL	13		143 h/año

Fuente: Elaboración propia a partir de aplicación de RCM al activo crítico.

La disminución del TPRR anual observada tras la aplicación del RCM se sustenta en la incorporación de tareas de mantenimiento basado en condición y en una mayor planificación de las intervenciones. Según Moubray (1997), este enfoque permite detectar las fallas potenciales dentro del intervalo P–F, gestionando la intervención antes de la pérdida de la función, en este sentido, la literatura reporta reducciones conservadoras del orden de 20% a 50% en la frecuencia de fallas asociadas a procesos de degradación progresiva, así como disminuciones del 10% al 30% en los tiempos de reparación por evento, atribuibles a la detección temprana, la eliminación del diagnóstico en el periodo posterior a la falla y la mejora en la preparación de recursos (Jardine et al., 2006; Mobley, 2002).

Adicionalmente, la mitigación de fallas iniciales contribuye a evitar daños secundarios de mayor severidad en el equipo, lo que explica que la reducción global del TPRR anual obtenida se mantenga dentro de rangos conservadores, sin implicar supuestos optimistas ni la eliminación total de las fallas físicas del activo, favoreciendo una operación más estable del sistema y una mejor coordinación con los equipos aguas abajo del proceso.

Con el fin de evaluar el impacto de la aplicación de la metodología de (RCM) sobre el desempeño operacional del Chancador Primario Salas, se procede al cálculo de la disponibilidad del activo, considerando como variable el Tiempo Total de Reparación (TTR) anual previamente estimado para los escenarios sin RCM y con RCM.

La disponibilidad operacional del equipo se calcula a partir de la relación entre el tiempo total considerado para el análisis y el tiempo en que el activo permanece indisponible debido a actividades de mantenimiento correctivo y planificado asociadas a los modos de falla críticos identificados. En este contexto, la disponibilidad se define como la fracción del tiempo en que el activo se encuentra en condiciones de cumplir su función requerida dentro del sistema productivo.

Para el presente análisis, se adopta como base de cálculo 8.520 h/año, dado que el Chancador Primario Salas es gestionado como un activo crítico disponible bajo operación continua, independientemente de la carga efectiva de operación. Este enfoque permite evaluar de manera consistente el impacto de las detenciones, tanto planificadas como no planificadas, sobre la disponibilidad.

La expresión utilizada para el cálculo de la disponibilidad del activo se presenta en la **Fórmula 3-2:**

$$A = \left(\frac{TTO - TTR}{TTO} \right) * 100$$

Fórmula 3-2 Disponibilidad en Base a TTO y TTR.

Donde:

A: Disponibilidad operacional del activo [%].

TTO: Tiempo Total Operacional en horas

TTR: Tiempo Total de Reparación anual del activo [h/año], correspondiente a la suma de las horas dedicadas a la atención de fallas y actividades de mantenimiento asociadas a los modos de falla críticos analizados.

Tabla 3-3 Variación de disponibilidad en activo crítico.

Escenario	Indisponibilidad anual (h/año)	Disponibilidad (%)
Situación base 2024 (sin RCM)	902	89,70%
Escenario con RCM	681	92,23%
Variación	-221 h/año	2,53%

Fuente: Elaboración propia a partir de aplicación de RCM al activo crítico.

Los resultados obtenidos evidencian que la aplicación del RCM permite reducir la indisponibilidad anual del activo crítico en 221 h/año, lo que se traduce en un incremento de la disponibilidad desde 89,7% a 92,23%, equivalente a una mejora absoluta de 2,53 puntos porcentuales. Este aumento, representa un impacto relevante en el desempeño operacional del equipo, considerando su carácter crítico dentro del laboratorio de conminución.

Diversos estudios han demostrado que existe una relación directa entre la estrategia de mantenimiento adoptada y el desempeño global de la organización, impactando tanto en la

disponibilidad como en los resultados económicos del sistema productivo (Swanson, 2001). En este contexto, la mejora observada en la disponibilidad del activo crítico refuerza la coherencia técnica del plan propuesto.

3.2 EVALUACIÓN DEL IMPACTO ECONÓMICO DEL RCM MEDIANTE ANÁLISIS DE RIESGO

El análisis económico se basa en la comparación del riesgo económico anual del activo antes y después de la implementación del RCM, para este caso el riesgo se entiende como el costo económico esperado asociado a la ocurrencia de los modos de falla, considerando su frecuencia y las consecuencias operacionales y de seguridad. Este enfoque permite evaluar el impacto del RCM desde una perspectiva de gestión de riesgo (Moubray, 1997).

En la **Tabla 3-4** se presenta el resumen del análisis de riesgo económico correspondiente al escenario previo a la implementación del RCM, donde se cuantifica el riesgo anual del activo en su condición actual. Esta tabla incluye la frecuencia de ocurrencia de los modos de falla, los tiempos promedio de reparación y las consecuencias económicas asociadas, constituyendo la línea base necesaria para la posterior comparación.

Tabla 3-4 Cálculo escenario de riesgo anual previo a la aplicación de RCM.

Modo de falla crítico	FF (eventos/año)	Efecto Falla	TPRR por evento (h/evento)	Imp. Prod. \$/h	Costo directo por falla (CLP / evento)	Impacto SHA (\$/falla)	Riesgo \$/año
1.1.1 Placa de mandíbula móvil fisurada	2	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: Se generan ruidos y vibraciones anormales y pérdida de eficiencia de trituración. La fisura progresa por fatiga hasta comprometer la integridad de la placa, pudiendo producir desprendimientos internos y detención no planificada. Se afecta la capacidad y la granulometría, requiriendo inspección visual frecuente y eventual reemplazo.	24	\$ 200.000	\$ 520.000		\$10.640.000
1.1.2 Placa mandíbula móvil desgastada por abrasión	2	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: El desgaste por abrasión reduce progresivamente la eficiencia del proceso de trituración y altera la granulometría del producto. La condición no genera riesgo directo, pero provoca pérdida de capacidad y requiere sustitución periódica para mantener el desempeño operacional.	20	\$ 200.000	\$ 470.000		\$ 8.940.000
1.1.3 Conjunto de fijación suelto	3	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: Sí. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La pérdida de apriete genera holguras estructurales y vibraciones anormales durante la operación. La condición puede evolucionar hacia el desprendimiento de componentes, generando detención no planificada y riesgo de atrapamiento o golpe para el personal.	10	\$ 200.000	\$ 85.000	\$ 1.200.000	\$ 9.855.000
1.1.5 Soportes de sujeción fisurados	1	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: Sí. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La fisuración de los soportes compromete la integridad estructural del conjunto, incrementando vibraciones y esfuerzos no deseados. La progresión del daño puede provocar colapso parcial, detención del equipo y riesgo grave para la seguridad del personal.	18	\$ 200.000	\$ 280.000	\$ 2.000.000	\$ 5.880.000
1.2.2 Placa fija desplazada de posición	2	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: El desplazamiento de la placa fija altera la geometría de la cámara de trituración, afectando la estabilidad del proceso y la granulometría del producto. Se reduce la eficiencia del equipo, requiriendo verificación y correcto asentamiento del componente.	12	\$ 200.000	\$ 160.000		\$ 5.120.000
1.2.3 Soporte mandíbula fija fisurado en anclaje	1	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: Sí. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La fisura en la zona de anclaje reduce la capacidad estructural del soporte, generando vibraciones y pérdida de estabilidad. Existe riesgo de desprendimiento del conjunto, detención no planificada y daño severo con potencial impacto a personas.	28	\$ 200.000	\$ 420.000	\$ 2.500.000	\$ 8.520.000
3.1.1 Lubricación insuficiente en eje excéntrico	4	Evidente/no evidente: No evidente. Afecta SHA: Sí. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La lubricación insuficiente incrementa la fricción y temperatura del eje excéntrico, acelerando el desgaste de componentes críticos. La condición puede evolucionar hacia fallas mecánicas severas, con riesgo de detención súbita y daño al equipo.	8	\$ 200.000	\$ 110.000	\$ 1.000.000	\$10.840.000
3.1.5 Excentricidad fuera de tolerancia	1	Evidente/no evidente: No evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La excentricidad fuera de tolerancia genera vibraciones anormales y esfuerzos dinámicos elevados en el conjunto del eje. Se acelera el desgaste de componentes y se compromete la estabilidad del equipo, requiriendo monitoreo de condición.	24	\$ 200.000	\$ 650.000		\$ 5.450.000
7.1.1 Rodamiento desgastado	2	Evidente/no evidente: No evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: El desgaste progresivo del rodamiento incrementa vibraciones y temperatura, reduciendo la confiabilidad del equipo. Si no se detecta oportunamente, puede derivar en una falla funcional con detención no planificada.	18	\$ 200.000	\$ 380.000		\$ 7.960.000
7.1.2 Rodamiento contaminado	3	Evidente/no evidente: No evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La contaminación interna del rodamiento acelera el desgaste y reduce su vida útil. Se incrementan vibraciones y pérdidas de eficiencia, afectando la continuidad operacional del equipo.	14	\$ 200.000	\$ 210.000		\$ 9.030.000
8.1.1 Manguera de lubricación obstruida	3	Evidente/no evidente: No evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La obstrucción de la manguera impide el suministro adecuado de lubricante a los puntos críticos. Se genera lubricación deficiente, acelerando el desgaste de componentes y reduciendo la confiabilidad del sistema.	8	\$ 200.000	\$ 140.000		\$ 5.220.000
9.1.2 Pernos estructurales aflojados	2	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: Sí. Efectos Operacionales: No. Efecto de falla: El aflojamiento de pernos estructurales provoca pérdida de rigidez y estabilidad del conjunto. Existe riesgo de desprendimiento de componentes durante la operación o mantención, representando un peligro directo para el personal.	9	\$ 200.000	\$ 95.000	\$1.500.000	\$ 6.790.000
TOTAL	26						\$94.245.000

Fuente: Elaboración propia a partir de aplicación de RCM al activo crítico.

Se obtiene que el riesgo económico anual del chancador primario Salas en su condición previa es de \$94.245.000 CLP/año. A continuación en la **Tabla 3-5** se presenta el análisis correspondiente al escenario con RCM aplicado, donde se evalúa el riesgo residual.

Tabla 3-5 Cálculo de escenario de riesgo anual con RCM.

Modo de falla crítico	FF (eventos/año)	Efecto Falla	TPRR por evento (h/evento)	Imp. Prod. \$/h	Costo directo por falla (CLP / evento)	Impacto SHA (\$/falla)	Riesgo \$/año
1.1.1 Placa de mandíbula móvil fisurada	1	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: Se generan ruidos y vibraciones anormales y pérdida de eficiencia de trituración. La fisura progresa por fatiga hasta comprometer la integridad de la placa, pudiendo producir desprendimientos internos y detención no planificada. Se afecta la capacidad y la granulometría, requiriendo inspección visual frecuente y eventual reemplazo.	17	\$ 200.000	\$ 520.000		\$ 3.920.000
1.1.2 Placa mandíbula móvil desgastada por abrasión	1	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: El desgaste por abrasión reduce progresivamente la eficiencia del proceso de trituración y altera la granulometría del producto. La condición no genera riesgo directo, pero provoca pérdida de capacidad y requiere sustitución periódica para mantener el desempeño operacional.	14	\$ 200.000	\$ 470.000		\$ 3.270.000
1.1.3 Conjunto de fijación suelto	1	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: Sí. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La pérdida de apriete genera holguras estructurales y vibraciones anormales durante la operación. La condición puede evolucionar hacia el desprendimiento de componentes, generando detención no planificada y riesgo de atrapamiento o golpe para el personal.	7	\$ 200.000	\$ 85.000	\$ 1.200.000	\$ 2.685.000
1.1.5 Soportes de sujeción fisurados	1	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: Sí. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La fisuración de los soportes compromete la integridad estructural del conjunto, incrementando vibraciones y esfuerzos no deseados. La progresión del daño puede provocar colapso parcial, detención del equipo y riesgo grave para la seguridad del personal.	13	\$ 200.000	\$ 280.000	\$ 2.000.000	\$ 4.880.000
1.2.2 Placa fija desplazada de posición	1	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: El desplazamiento de la placa fija altera la geometría de la cámara de trituración, afectando la estabilidad del proceso y la granulometría del producto. Se reduce la eficiencia del equipo, requiriendo verificación y correcto asentamiento del componente.	8	\$ 200.000	\$ 160.000		\$ 1.760.000
1.2.3 Soporte mandíbula fija fisurado en anclaje	1	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: Sí. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La fisura en la zona de anclaje reduce la capacidad estructural del soporte, generando vibraciones y pérdida de estabilidad. Existe riesgo de desprendimiento del conjunto, detención no planificada y daño severo con potencial impacto a personas.	20	\$ 200.000	\$ 420.000	\$ 2.500.000	\$ 6.920.000
3.1.1 Lubricación insuficiente en eje excéntrico	2	Evidente/no evidente: No evidente. Afecta SHA: Sí. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La lubricación insuficiente incrementa la fricción y temperatura del eje excéntrico, acelerando el desgaste de componentes críticos. La condición puede evolucionar hacia fallas mecánicas severas, con riesgo de detención súbita y daño al equipo.	6	\$ 200.000	\$ 110.000	\$ 1.000.000	\$ 4.620.000
3.1.5 Excentricidad fuera de tolerancia	1	Evidente/no evidente: No evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La excentricidad fuera de tolerancia genera vibraciones anormales y esfuerzos dinámicos elevados en el conjunto del eje. Se acelera el desgaste de componentes y se compromete la estabilidad del equipo, requiriendo monitoreo de condición.	17	\$ 200.000	\$ 650.000		\$ 4.050.000
7.1.1 Rodamiento desgastado	1	Evidente/no evidente: No evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: El desgaste progresivo del rodamiento incrementa vibraciones y temperatura, reduciendo la confiabilidad del equipo. Si no se detecta oportunamente, puede derivar en una falla funcional con detención no planificada.	13	\$ 200.000	\$ 380.000		\$ 2.980.000
7.1.2 Rodamiento contaminado	1	Evidente/no evidente: No evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La contaminación interna del rodamiento acelera el desgaste y reduce su vida útil. Se incrementan vibraciones y pérdidas de eficiencia, afectando la continuidad operacional del equipo.	10	\$ 200.000	\$ 210.000		\$ 2.210.000
8.1.1 Manguera de lubricación obstruida	1	Evidente/no evidente: No evidente. Afecta SHA: No. Efectos Operacionales: Sí. Efecto de falla: La obstrucción de la manguera impide el suministro adecuado de lubricante a los puntos críticos. Se genera lubricación deficiente, acelerando el desgaste de componentes y reduciendo la confiabilidad del sistema.	6	\$ 200.000	\$ 140.000		\$ 1.340.000
9.1.2 Pernos estructurales aflojados	1	Evidente/no evidente: Evidente. Afecta SHA: Sí. Efectos Operacionales: No. Efecto de falla: El aflojamiento de pernos estructurales provoca pérdida de rigidez y estabilidad del conjunto. Existe riesgo de desprendimiento de componentes durante la operación o mantención, representando un peligro directo para el personal.	6	\$ 200.000	\$ 95.000	\$ 1.500.000	\$ 2.795.000
TOTAL	13						\$41.430.000

Fuente: Elaboración propia a partir de aplicación de RCM al activo crítico.

Se puede observar que el riesgo anual asociado al equipo, luego de la implementación de la metodología RCM, disminuye a \$41.430.000 CLP/año, evidenciando una reducción significativa respecto al escenario base. Esta disminución no responde únicamente a una baja directa en la probabilidad de ocurrencia de los modos de falla más críticos, sino a una gestión más estructurada y anticipada de las intervenciones, lo que permite controlar las consecuencias antes de que evolucionen hacia detenciones no programadas de alto impacto.

No obstante, esta mejora en el perfil de riesgo conlleva costos asociados a la ejecución del plan RCM, correspondientes a inspecciones periódicas, monitoreo de condición, reemplazos programados y servicios especializados. En la **Tabla 3-6** se presentan los costos anuales derivados de la implementación del plan propuesto, los cuales deben analizarse en conjunto con la reducción del riesgo para evaluar la conveniencia técnica y económica de la estrategia implementada.

Tabla 3-6 Costos asociados a la aplicación de RCM al activo crítico.

Modo de falla (MF)	Frecuencia	N° personas	HH ejecución (por evento)	Tarifa HH (\$/HH)	Tarifa especialidad (externo)	Insumos/Materiales (\$ por evento)	PTTO anual por MF (\$/año)
1.1.1 Placa mandíbula móvil fisurada (inspección)	Semanal (52)	1	0,5	\$ 7.000		\$ 5.990	\$ 493.480
1.1.2 Placa mandíbula móvil desgastada (cambio)	Mensual (12)	2	2,5	\$ 7.000		\$ 359.990	\$ 4.739.880
1.1.3 Conjunto fijación suelto (apriete)	Mensual (12)	1	1	\$ 7.000		\$ 10.000	\$ 204.000
1.1.5 Soportes/placas sujeción fisurados (inspección)	Mensual (12)	1	1	\$ 7.000		\$ 15.000	\$ 264.000
1.2.2 Placa fija desplazada (verificación/aseptamiento)	Mensual (12)	1	1	\$ 7.000		\$ 20.000	\$ 324.000
1.2.3 Soporte mandíbula fija fisurado (inspección)	Mensual (12)	1	1	\$ 7.000		\$ 15.000	\$ 264.000
3.1.1 Lubricación insuficiente eje excéntrico (verif.)	Semanal (52)	1	0,5	\$ 7.000		\$ 7.000	\$ 546.000
3.1.5 Excentricidad fuera tolerancia (vibraciones)	Mensual (12)	0	0		\$ 220.000	\$ -	\$ 2.640.000
7.1.1 Rodamiento desgastado (condición)	Mensual (12)	0	0		\$ 220.000	\$ -	\$ 2.640.000
7.1.2 Rodamiento contaminado (condición)	Mensual (12)	0	0		\$ 220.000	\$ -	\$ 2.640.000
8.1.1 Manguera lubricación obstruida (verif. flujo)	Semanal (52)	1	0,5	\$ 7.000		\$ 20.000	\$ 1.222.000
9.1.2 Pernos estructurales aflojados (reemplazo)	Semestral (2)	2	2	\$ 7.000		\$ 249.990	\$ 555.980
TOTAL COSTO PLAN RCM							\$ 16.533.340

Fuente: Elaboración propia a partir de aplicación de RCM al activo crítico.

Para cuantificar el beneficio económico asociado a la aplicación del RCM, se utiliza la expresión presentada en la **Fórmula 3-3**, la cual permite estimar el ahorro bruto por reducción de riesgo. Dicha expresión se define como la diferencia entre el riesgo económico anual del

escenario sin RCM y el riesgo económico anual en el escenario con RCM, posteriormente en la Fórmula 3-4 se calcula el ahorro neto por reducción de riesgo incorporando además el costo anual de implementar la metodología:

El ahorro bruto por reducción de riesgo se presenta a continuación:

$$\textit{Ahorro Bruto por Reducción de Riesgo} = \textit{Riesgo sin RCM} - \textit{Riesgo con RCM}$$

$$\textit{Ahorro Bruto por Reducción de Riesgo} = \$94,245,000 - \$41,430,000$$

$$\textit{Ahorro Bruto por Reducción de Riesgo} = \$ 52,815,000.$$

Fórmula 3-3 Ahorro bruto mediante comparación de riesgo.

A continuación se presenta el ahorro neto en el cual se considera el costo de implementación del plan RCM.

$$\textit{Ahorro Neto por Reducción de Riesgo} = \textit{Ahorro Bruto} - \textit{Costo Plan RCM}$$

$$\textit{Ahorro Neto por Reducción de Riesgo} = \$52,815,000 - \$16,533,340$$

$$\textit{Ahorro Neto por Reducción de Riesgo} = \$ 36,281,660.$$

Fórmula 3-4 Ahorro neto mediante comparación de riesgo.

Como resultado de la comparación entre ambos escenarios, el análisis evidencia una reducción significativa del riesgo económico anual, obteniendo un ahorro potencial neto de \$36.281.660 CLP/año. Este resultado demuestra que la aplicación del RCM no solo contribuye a mejorar la confiabilidad y disponibilidad del chancador primario Salas, sino que además constituye una decisión técnicamente sólida y económicamente justificable.

El análisis realizado se sustenta en una aproximación sistemática de gestión del riesgo, en coherencia con los lineamientos establecidos por la norma ISO 31000, que define el riesgo como el efecto de la incertidumbre sobre los objetivos organizacionales (International Organization for Standardization [ISO], 2018). Bajo esta perspectiva, la reducción del riesgo anual proyectado no solo representa una mejora técnica en el desempeño del activo, sino también una contribución directa a los objetivos estratégicos del laboratorio. Además, cuando el mantenimiento se gestiona considerando simultáneamente desempeño, costo y riesgo, deja de ser una función meramente operativa para transformarse en un factor determinante de competitividad organizacional (Pistarelli, 2013), evidenciando que la metodología aplicada genera valor tanto técnico como económico.

3.4 RETORNO SOBRE LA INVERSIÓN (ROI) Y PERÍODO DE RECUPERACIÓN (PAYBACK)

La evaluación económica de la propuesta basada en la aplicación de la metodología RCM se complementa mediante el cálculo del Retorno sobre la Inversión (ROI) y del período de recuperación de la inversión (Payback). Estos indicadores permiten determinar, respectivamente, la rentabilidad relativa del proyecto y el tiempo requerido para recuperar los recursos invertidos, siendo ampliamente utilizados en la evaluación de iniciativas de mantenimiento y confiabilidad.

El ROI se calcula a partir de la relación entre el beneficio económico generado por la reducción del riesgo anual y la inversión asociada a la implementación del plan RCM. Para el presente estudio, el beneficio bruto asciende a \$52.815.000 CLP/año, correspondiente a la diferencia entre el costo de riesgo sin RCM (\$94.245.000 CLP/año) y el costo de riesgo con RCM (\$41.430.000 CLP/año).

Al descontar la inversión anual requerida para la ejecución del plan RCM, equivalente a \$16.533.340 CLP/año, se obtiene un beneficio económico neto de \$36.281.660 CLP/año.

La expresión utilizada para el cálculo del ROI se presenta en la **Fórmula 3-5**:

$$ROI = \frac{\text{Beneficio} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}} \times 100$$

$$ROI = \frac{\$52,815,000 - \$16,533,340}{\$16,533,340} \times 100$$

$$ROI = 219\%$$

Fórmula 3-5 Cálculo de Retorno Sobre La Inversión (ROI)

Reemplazando los valores obtenidos, se obtiene un ROI aproximado de 219%, lo que indica que, por cada peso invertido en la implementación del plan RCM, el laboratorio no solo recupera la inversión inicial, sino que además genera un retorno adicional equivalente a 2,19 veces el capital invertido durante el primer año de operación. Este resultado evidencia un impacto económico altamente favorable, asociado principalmente a la significativa reducción del riesgo anual y a la mejora en la gestión de la disponibilidad del activo crítico. De manera complementaria, el período de recuperación de la inversión (Payback) se calcula como el tiempo requerido para que los beneficios económicos acumulados igualen la inversión inicial realizada. La expresión utilizada para su cálculo se presenta en la **Fórmula 3-6**

$$\text{Payback} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Beneficio anual}} \times 12$$

$$\textit{Payback} = \frac{\$16,533,340}{\$36,218,660} \times 12$$

$$\textit{ROI} = 5,5 \text{ meses}$$

Fórmula 3-6 Periodo de Recuperación de la inversión.

Aplicando los valores del presente estudio, se obtiene un Payback de aproximadamente 5,5 meses, lo que implica que la inversión asociada a la implementación del plan RCM se recupera dentro del mismo año operativo. Este período de recuperación reducido evidencia que los beneficios económicos derivados de la disminución del riesgo y de la mejora en la disponibilidad del activo comienzan a materializarse en el corto plazo.

Estos resultados se sitúan dentro de los rangos considerados altamente favorables para proyectos de mantenimiento basado en confiabilidad. De acuerdo con Mobley (2002), las iniciativas orientadas a la confiabilidad se consideran especialmente atractivas cuando presentan retornos superiores al 50% y períodos de recuperación acotados. En el caso analizado, el ROI de 219% supera ampliamente dicho umbral, situación que se explica por el contexto inicial del activo, caracterizado por un alto nivel de intervenciones reactivas y un costo significativo de indisponibilidad. Considerando además que el chancador primario corresponde a un activo crítico y único dentro del proceso, la reducción estructurada de fallas genera un impacto económico elevado, evidenciando que la inversión no solo se recupera dentro del primer año de operación, sino que además produce un beneficio sustancial sobre el capital invertido.

En este contexto, los indicadores obtenidos confirman que la aplicación del RCM en el activo crítico analizado constituye una inversión económicamente sólida y de bajo riesgo relativo, dado su corto período de recuperación de 5,5 meses. Asimismo, los resultados se

alinean con las mejores prácticas reportadas en la literatura especializada, demostrando que la gestión estructurada de los modos de falla críticos impacta directamente en la reducción del riesgo operacional y en la sostenibilidad económica del proceso.

Desde una perspectiva estratégica, la gestión del mantenimiento debe integrarse como una dimensión clave dentro de la toma de decisiones organizacional, alineando confiabilidad, costo y desempeño operativo (Tsang, 2002). En este sentido, la aplicación del RCM en el activo crítico no solo responde a una mejora técnica puntual, sino que se enmarca en una visión integral de gestión de activos orientada a la creación de valor.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo permitió cumplir el objetivo general al proponer una metodología estructurada para la identificación y gestión del activo más crítico del área de conminución, integrando el análisis del contexto operacional, la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos. A partir de los indicadores obtenidos desde el sistema Fracttal y mediante la aplicación del método Jackknife, se determinó que el Chancador Primario Salas concentraba el mayor impacto sobre la continuidad del proceso, razón por la cual se definió su selección como activo prioritario para la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).

La implementación del plan de mantenimiento basado en RCM permitió evaluar comparativamente el desempeño del activo antes y después de su aplicación, evidenciando un aumento de 2,4 puntos porcentuales en la disponibilidad operativa y una mejora sostenida en los indicadores de confiabilidad. Desde la perspectiva económica, la estimación realizada indicó un ahorro potencial de \$36.281.660 CLP anuales, junto con un retorno sobre la inversión de 219% y un período de recuperación de 5,5 meses, resultados que validan la conveniencia técnica y financiera de la propuesta y demuestran el impacto directo de la reducción del riesgo sobre la sostenibilidad operacional.

Como principal aprendizaje, se evidencia que la gestión del mantenimiento basada en confiabilidad y riesgo permite priorizar recursos de manera objetiva, reducir la exposición a fallas críticas y generar valor operacional medible. No obstante, se recomienda extender progresivamente la metodología a otros equipos críticos del área y fortalecer el monitoreo continuo de indicadores para consolidar una gestión de activos más madura, robusta y sostenible en el tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

Asociación Española de Normalización. (2003). UNE 66175:2003: Guía para la implantación de sistemas de indicadores. AENOR.

Automotive Industry Action Group. (2008). FMEA Reference Manual, 4th Edition. AIAG.

Campbell, J. D. (1995). Maintenance excellence: Optimizing equipment life-cycle decisions. Marcel Dekker.

Crespo Márquez, A. (2007). Gestión del mantenimiento industrial. Díaz de Santos.

International Organization for Standardization. (2012). ISO 18436-1: Condition monitoring and diagnostics of machines — Requirements for qualification and assessment of personnel — Part 1: Requirements for assessment bodies and the assessment process. ISO.

International Organization for Standardization. (2014). ISO 55000:2014 Asset management — Overview, principles and terminology. ISO.

International Organization for Standardization. (2015). ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements. ISO.

International Organization for Standardization. (2016). ISO 14224:2016 Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. ISO.

International Organization for Standardization. (2018). ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines. ISO.

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.04.005>

Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Moubray, J. (1997). *RCM II: Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Pistarelli, A. J. (2010). *Manual de mantenimiento: Ingeniería, gestión y organización* (1^a ed.). Buenos Aires.

Pistarelli, J. C. (2013). *Gestión moderna del mantenimiento*. Alfaomega.

SAE International. (2009). *SAE J1739: Potential failure mode and effects analysis in design (DFMEA), process (PFMEA), and machinery (MFMEA)*. SAE International.

SAE International. (2011). *SAE JA1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes*. SAE.

Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2004). *RCM—Gateway to world class maintenance*. Elsevier.

Smith, R., & Hawkins, B. (2004). *Lean maintenance*. Elsevier Butterworth-Heinemann.

Swanson, L. (2001). Linking maintenance strategies to performance. *International Journal of Production Economics*, 70(3), 237–244.

Tsang, A. H. C. (2002). Strategic dimensions of maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(1), 7–39.