



**Universidad
Católica de
Santa María**

**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica-Eléctrica**

**Propuesta de plan de mantenimiento integrador basado en las metodologías
RCM y Lean Maintenance y su aplicación a molinos de alta presión HPGR**

Tesis presentada por:

Lazo Tardillo, Alfredo Salvador

ORCID: 0009-0009-6036-5363

para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista

Asesor:

Dr. Valencia Salas, Mario José

ORCID: 0009-0009-3797-0020

Arequipa - Perú

2026

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA MECANICA-ELECTRICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 12 de Agosto del 2026

Dictamen: 016692-C-EPIMMEM-2026

Visto el borrador del expediente 016692, presentado por:

2018814161 - LAZO TARDILLO ALFREDO SALVADOR

Titulado:

**PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO INTEGRADOR BASADO EN LAS METODOLOGÍAS
RCM Y LEAN MAINTENANCE Y SU APLICACIÓN A MOLINOS DE ALTA PRESIÓN HPGR**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

**29667313 - ALCÁZAR ROJAS HERMANN ENRIQUE
DICTAMINADOR**



**29529560 - CACERES NUÑEZ AUGUSTO EMILIO CARLOS
DICTAMINADOR**



**46292714 - SILES NATES FERNANDO DAVID
DICTAMINADOR**



Propuesta de plan de mantenimiento integrador basado en las metodologías RCM y Lean Maintenance y su aplicación a molinos de alta presión HPGR

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

10%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	2%
	Trabajo del estudiante	
2	dspace.esPOCH.edu.ec	1%
	Fuente de Internet	
3	repositorio.usm.cl	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.ucsm.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	tesis.ucsm.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
6	dgsa.uaeh.edu.mx:8080	<1%
	Fuente de Internet	
7	repositorio.uncp.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	hdl.handle.net	<1%
	Fuente de Internet	
9	cybertesis.uni.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
10	idus.us.es	<1%
	Fuente de Internet	
11	repositorio.unsa.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
12	Submitted to Universidad Andrés Bello	<1%
	Trabajo del estudiante	
13	repositorio.upci.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
14	Submitted to Instituto Especializado de Estudios Superiores Loyola	<1%
	Trabajo del estudiante	

repositorio.uleam.edu.ec

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi madre, por enseñarme desde pequeño el valor de la responsabilidad y la importancia de concluir todo aquello que se empieza. Sus enseñanzas han sido la base de mi disciplina y compromiso.

A mi padre, por inculcarme la fortaleza y la perseverancia, recordándome siempre que nunca debo rendirme y que hay que luchar hasta quemar el último cartucho para alcanzar los objetivos.

A mi hermana, por estar siempre presente cuando más la necesité, brindándome su apoyo, compañía y confianza en cada etapa de este camino.

A mi Fla por su apoyo incondicional, su comprensión, su paciencia y la ayuda que me brindó durante el desarrollo de esta investigación. Gracias por acompañarme en este proceso, por creer en mí y por estar a mi lado en los momentos de mayor esfuerzo.



Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme la vida, la salud, la fortaleza y la sabiduría necesarias para superar cada desafío y permitirme culminar con éxito esta investigación.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi familia por su amor, apoyo incondicional, confianza y motivación constante, valores que han sido fundamentales en mi formación personal y profesional.

Asimismo, agradezco profundamente a todas las personas que, de una u otra manera, me brindaron su apoyo, orientación, palabras de aliento y confianza durante el desarrollo de esta investigación. Su respaldo y motivación fueron esenciales para alcanzar esta importante meta académica.

Finalmente, extiendo mi agradecimiento a mi asesor de tesis, a los docentes y a la Universidad Católica de Santa María, por los conocimientos impartidos y el acompañamiento brindado durante mi formación profesional y la elaboración del presente trabajo de investigación.



Resumen

La presente investigación propone un plan de mantenimiento para molinos de alta presión (HPGR) mediante la integración de las metodologías Reliability Centered Maintenance (RCM) y Lean Maintenance, con el propósito de fortalecer la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de estos equipos utilizados en la industria minera. La investigación surge ante la necesidad de contar con un esquema de mantenimiento específico que permita superar las limitaciones de los procedimientos convencionales, orientando las actividades hacia la prevención de fallas y la optimización de los recursos.

El desarrollo de la propuesta comprende la evaluación del estado actual del mantenimiento, el análisis de criticidad del equipo, la identificación de funciones, fallas funcionales, modos de falla y sus consecuencias mediante la metodología RCM, así como la incorporación de herramientas Lean enfocadas en la eliminación de desperdicios, la estandarización de procesos y la mejora continua. Asimismo, se plantea un conjunto de indicadores para el seguimiento del desempeño del plan y un cronograma referencial para su implementación.

Los resultados evidencian que la integración de ambas metodologías constituye una alternativa técnicamente viable para mejorar la gestión del mantenimiento de los HPGR, al facilitar una mejor planificación de las intervenciones, reducir los tiempos de reparación, optimizar el uso de los recursos disponibles y contribuir al incremento de la disponibilidad operativa del equipo. Finalmente, la propuesta puede servir como referencia para la implementación de estrategias similares en otros equipos de alta criticidad dentro del sector minero.

Palabras clave: Mantenimiento, Confiabilidad, molinos.

Abstract

This research presents an integrated maintenance plan for High Pressure Grinding Rolls (HPGR) by combining the principles of Reliability Centered Maintenance (RCM) and Lean Maintenance to enhance equipment reliability, availability, and maintainability in mining operations. The proposal addresses the need for a structured maintenance strategy capable of overcoming the limitations of conventional maintenance practices through a systematic approach focused on failure prevention and resource optimization.

The proposed methodology includes an assessment of the current maintenance process, equipment criticality analysis, identification of functions, functional failures, failure modes and their consequences using the RCM methodology, together with the application of Lean tools aimed at waste elimination, process standardization, and continuous improvement. In addition, performance indicators and an implementation schedule are established to support the execution and monitoring of the proposed maintenance plan.

The findings indicate that integrating both methodologies provides a technically feasible solution for improving HPGR maintenance management by supporting better maintenance planning, reducing repair times, optimizing resource utilization, and increasing equipment operational availability. Furthermore, the proposal can be adapted as a reference model for maintenance management in other critical mining assets.

Keywords: Maintenance, Reliability, mills.

Índice General

Dedicatoria	
Agradecimientos	
Resumen	
Abstract	
Introducción	1
CAPÍTULO I Planteamiento teórico de la investigación	2
1.1. Enunciado de la investigación.....	3
1.2. Descripción del Problema	3
1.2.1.Enunciado del problema	3
1.2.2.Formulación del problema.....	6
1.3. Interrogantes de la investigación.....	7
1.3.1.Interrogante principal.....	7
1.3.2.Interrogantes específicas.....	7
1.4. Área del conocimiento.....	7
1.5. Variables de la Investigación	8
1.5.1.Variable Independiente	8
1.5.2.Variable Dependiente	8
1.6. Justificación de la Investigación.....	8
1.6.1.Justificación por conveniencia.....	8
1.6.2.Justificación Social	9
1.6.3.Justificación Práctica	9
1.6.4.Justificación Teórica	9
1.6.5.Justificación Metodológica.....	9
1.7. Objetivos de la Investigación	10
1.7.1.Objetivo General.....	10
1.7.2.Objetivos Específicos	10
1.8. Alcances de la Investigación	10
1.9. Limitaciones de la Investigación.....	11
1.10. Antecedentes de la Investigación	11
CAPÍTULO II Marco Teórico.....	15
2.1. Concepto de Mantenimiento	16
2.2. Calidad en el Mantenimiento.	17
2.3. Evolución de las estrategias de mantenimiento.....	17

2.4.	Concepto de Mantenimiento basado en la confiabilidad	18
2.4.1.	Evolución del RCM	18
2.4.2.	Las siete preguntas del RCM	20
2.4.3.	Diseño de un proyecto RCM	21
2.4.4.	Análisis de criticidad	24
2.4.5.	Análisis de fallas de los equipos	28
2.4.6.	Funciones	29
2.4.7.	Contexto Operacional	31
2.4.8.	Concepto de falla	31
2.4.9.	Tareas Preventivas	35
2.4.10.	Tareas Predictivas	36
2.4.11.	Tareas de búsqueda de fallas	37
2.4.12.	Diagrama de decisión RCM	38
2.4.13.	Beneficios del Mantenimiento basado en la confiabilidad	39
2.5.	Concepto Lean Maintenance	41
2.5.1.	Contexto histórico de Lean Maintenance	42
2.5.2.	Principios y filosofía del Lean Maintenance	43
2.5.3.	Técnicas Lean Maintenance	45
2.5.4.	Herramientas y metodología del Lean Maintenance	46
2.5.5.	El enfoque del Lean Maintenance	47
2.5.6.	Aplicaciones del Lean Maintenance	47
2.5.7.	Planificación del Proyecto Lean Maintenance	48
2.5.8.	El entorno Lean y la Calidad	48
2.5.9.	Mantenimiento basado en estrategias Lean	49
2.6.	Fundamentos de conminución de materiales	49
2.6.1.	Los equipos de conminución tradicionales	49
2.6.2.	Nuevas tecnologías en procesos de conminución	50
2.7.	Proceso de molienda	50
2.8.	Molino de Alta Presion (HPGR)	52
2.8.1.	Hooper de Alimentación	54
2.8.2.	Sistemas de los Molinos de Alta presión	54
2.8.3.	Unidad de Engrase	55
2.8.4.	Sistema Hidráulico	56
2.8.5.	Rodillo Fijo y Móvil	57

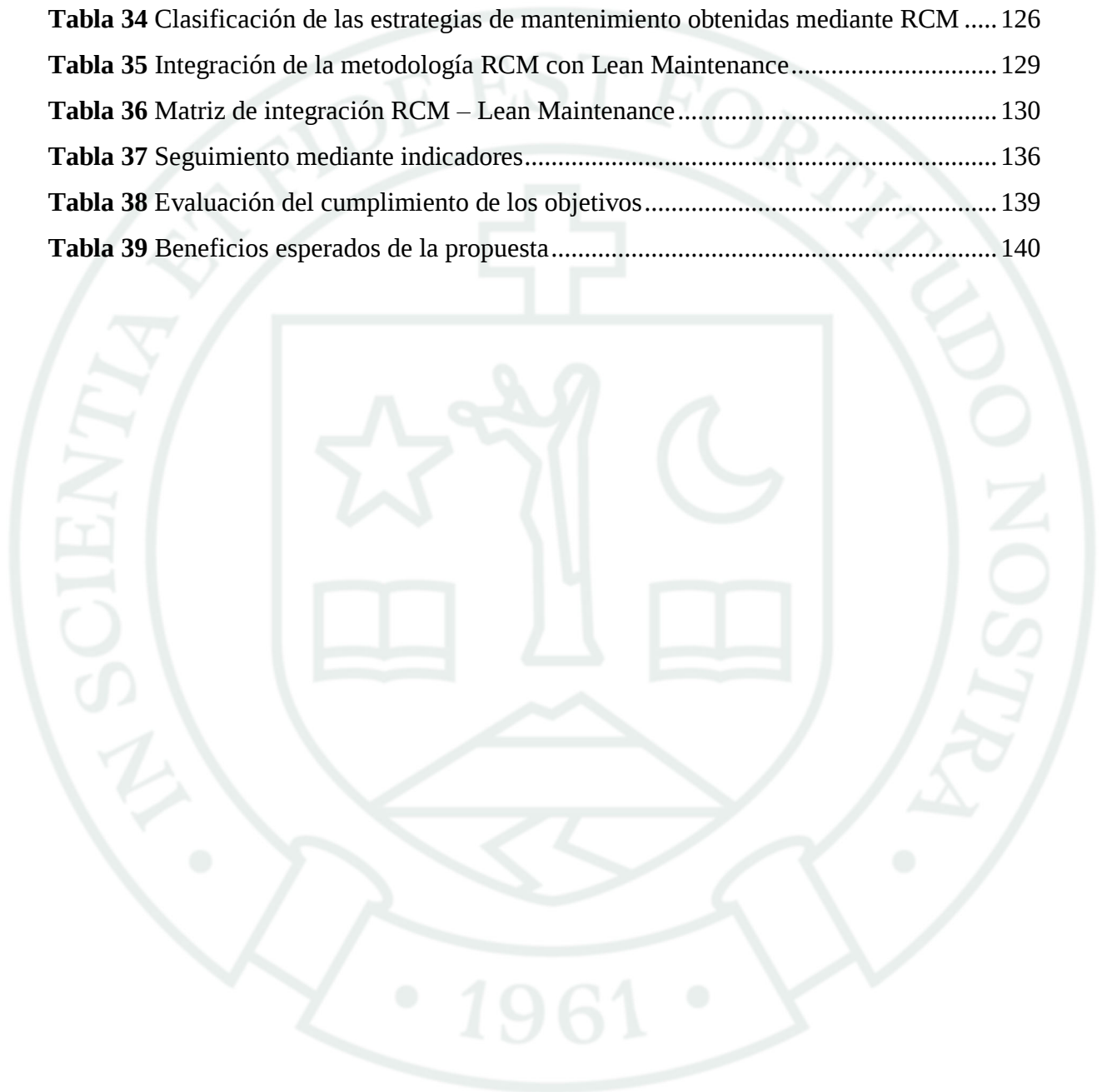
2.8.6.Caja de Transmisión	59
2.8.7.Principio de Funcionamiento.....	59
2.8.8.Ventajas y Desventajas del uso y aplicación de los molinos de alta presión - HPGR.....	60
2.8.9.Aplicación de los Molinos de Alta Presión - HPGR	61
2.8.10. Impacto ambiental de los HPGR	61
2.9. Bases Legales de la Investigación	61
2.9.1.SAE JA-1011 — Criterios de evaluación para procesos RCM	61
2.9.2.SAE JA-1012 — Guía de aplicación para RCM	62
2.9.3.ISO 14224 -Taxonomía y recolección de datos de confiabilidad y mantenimiento	62
2.9.4.ISO 55000 / ISO 55001 / ISO 55002 — Gestión de activos (Asset Management)	62
2.9.5.ISO 45001 — Seguridad y salud en el trabajo.....	63
2.9.6.ISO 9001 — Gestión de la calidad	63
2.9.7.ISO 20815 — Gestión de la producción y confiabilidad (petróleo y gas).....	63
2.9.8.UNE EN 16646 — Mantenimiento dentro de la gestión de activos físicos	63
CAPITULO III Implementación de la propuesta	65
3.1. Delimitación del sistema HPGR	66
3.2. Conformación del grupo de trabajo.....	67
3.3. Layout del equipo en planta	68
3.4. Determinación de criticidad mediante el método RBCA.....	70
3.4.1.Fundamentación del método.....	70
3.5. Aplicación del RCM.....	77
3.5.1.Contexto Operacional	77
3.6. Taxonomía del equipo.....	79
3.6.1.Tareas de mantenimiento obtenidas.....	79
3.7. Función primaria del HPGR.....	87
3.8. Funciones secundarias del HPGR	88
3.8.1.Función secundaria Ecología	88
3.8.2.Función secundaria Seguridad	88
3.8.3.Función secundaria Control.....	88
3.8.4.Función secundaria Apariencia.....	88
3.8.5.Función secundaria Protección	89

3.8.6.Función secundaria Eficiencia	89
3.9. Función primaria de los Sistema rodillo estructura.....	89
3.9.1.Función secundaria de los Sistema rodillo estructura Seguridad	89
3.9.2.Función secundaria de Sistema rodillo estructura Protección	89
3.9.3.Función secundaria de los Sistema rodillo estructura Eficiencia	89
3.9.4.Función primaria del Sistema Accionamiento y transmisión	90
3.10. Función secundaria del Sistema Accionamiento y transmisión Control.....	90
3.10.1. Función secundaria del Sistema Accionamiento y transmisión Seguridad	90
3.10.2. Función secundaria del Sistema Accionamiento y transmisión Eficiencia	90
3.11. Función primaria del Sistema Hidráulico de fuerza	90
3.12. Función secundaria del Sistema Hidráulico de fuerza Control	90
3.12.1. Función secundaria del Sistema Hidráulico de fuerza Seguridad	90
3.12.2. Función secundaria del Sistema Hidráulico de fuerza Protección	90
3.12.3. Función secundaria del Sistema Hidráulico de fuerza Eficiencia	90
3.13. Análisis de fallas total y parcial del equipo.....	91
3.14. Matriz RCM consolidada (EXCEL RCM).....	93
3.14.1. Tareas de mantenimiento obtenidas	101
3.14.2. Tareas de mantenimiento obtenidas	101
3.14.3. Metodología empleada	103
3.15. Resultados del análisis	103
3.16. Propuesta del plan de mantenimiento Integrador	121
CONCLUSIONES	141
RECOMENDACIONES	144
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146

Índice de tablas

Tabla 1 Comportamientos de los modos de falla según su relación con la edad del equipo.....	19
Tabla 2 Tabla de las siete preguntas básicas del RCM	21
Tabla 3 Principios Fundamentales para un diseño de un proyecto de RCM.....	21
Tabla 4 Explica que la elaboración del RCM permite una reducción significativa de costos, mejora del servicio y calidad.....	24
Tabla 5 Principio campos aplicación del análisis de criticidad.....	26
Tabla 6 Pasos esenciales que conforman proceso de análisis criticidad	27
Tabla 7 Tabla explica las funciones primarias y secundarias	30
Tabla 8 Técnicas del Lean.....	45
Tabla 9 Evaluación de la probabilidad	72
Tabla 10 Evaluación de las consecuencias.....	73
Tabla 11 Matriz de riesgo.....	73
Tabla 12 Rangos	73
Tabla 13 Resultados de análisis de criticidad.....	76
Tabla 14 Cuadro del contexto operacional por factores del HPGR	78
Tabla 15 Cuadro de fallas totales y parciales del HPGR.....	91
Tabla 16 Cuadro de fallas totales y parciales de los sistemas rodillo-estructura del HPGR	92
Tabla 17 Cuadro de fallas totales y parciales de los sistemas accionamiento-transmisión del HPGR	92
Tabla 18 Cuadro de fallas totales y parciales de los sistemas hidráulico - fuerza del HPGR	92
Tabla 19 Matriz HPGR.....	93
Tabla 20 Matriz SIS rodillo estructura	97
Tabla 21 Matriz SIS accionamiento y transmisión	99
Tabla 22 Matriz SIS hidráulico de fuerza.....	100
Tabla 24 Tipo de tarea RCM.....	101
Tabla 25 Tipo de tarea.....	101
Tabla 26 Identificación de desperdicios	105
Tabla 27 Situación actual del cambio de rodillos del HPGR	112
Tabla 28 Clasificación SMED de actividades	113

Tabla 29 Escenario propuesto con aplicación SMED	114
Tabla 30 Comparación estimada del MTTR	115
Tabla 31 Matriz integradora de estrategias RCM y herramientas Lean Maintenance	116
Tabla 32 Indicadores de seguimiento propuestos.....	119
Tabla 33 Cronograma referencial de implementación	121
Tabla 34 Clasificación de las estrategias de mantenimiento obtenidas mediante RCM	126
Tabla 35 Integración de la metodología RCM con Lean Maintenance.....	129
Tabla 36 Matriz de integración RCM – Lean Maintenance.....	130
Tabla 37 Seguimiento mediante indicadores.....	136
Tabla 38 Evaluación del cumplimiento de los objetivos.....	139
Tabla 39 Beneficios esperados de la propuesta.....	140



Índice de figuras

Figura 1 Concepto Mantenimiento.....	17
Figura 2 Graficas de cambios de los puntos de vista sobre falla de equipos	19
Figura 3 Esquema representa el diagrama de decisión del RCM.....	23
Figura 4 Modelo Matriz de criticidad.	25
Figura 5 Modelo básico de análisis de criticidad.	25
Figura 6 Pirámide de Taxonomía.....	28
Figura 7 Tipos de funciones de un equipo	29
Figura 8 Grafica probabilidad de falla vs según el uso	32
Figura 9 Grafica probabilidad condicional de falla.....	33
Figura 10 Condiciones Monitoréables en tareas predictivas en el HPGR.	37
Figura 11 Diagrama de la evaluación de las consecuencias de falla.....	39
Figura 12 Diagrama de los principales pasos del RCM	41
Figura 13 Historia sobre Lean.....	43
Figura 14 Los 5 principios Lean	44
Figura 15 Ciclo de molienda general	51
Figura 16 High Pressure Grinding Roll (HPGR) en planta de procesamiento	52
Figura 17 Diagrama de flujo de proceso simplificado de una planta.....	53
Figura 18 Esquema de las partes del FEED HOPPER.....	54
Figura 19 Partes de la central de Engrase o lubricación	56
Figura 20 Sistema hidráulico el cual ejerce fuerza compresión a los rodillos	57
Figura 21 Función del Rodillo Móvil y fijo	58
Figura 22 Rodillo está recubierto por pasadores de Studs.	58
Figura 23 Caja Transmisión con reductores planetarios	59
Figura 24 Funcionamiento de la Prensa de Rodillos.....	60
Figura 25 Demostración del Layout donde se puede visualizar la ubicación del HPGR en planta.	69
Figura 26 Análisis Taxonómico realizado al equipo HPGR	80
Figura 27 Sistema de rodillo y estructura metálica	81
Figura 28 Sistema de accionamiento/transmisión.....	82
Figura 29 Sistema hidráulico de fuerza y control	83
Figura 30 Sistema de lubricación (rodillos, rodamientos, engranajes)	84
Figura 31 Sistema de enfriamiento (Lubricación e hidráulico).....	85

Figura 32 Sistema de alimentación y descarga	86
Figura 33 Pirámide jerárquica de taxonomía para la implementación del RCM para de HPGR.	87



Índice de anexos

Anexo 1 Sistema estructura rodillo	152
Anexo 2 Sistema hidráulico	153
Anexo 3 Sistema accionamiento transmisión	155
Anexo 4 Programa anual mantto.....	157
Anexo 5 Recursos y herramientas.....	157
Anexo 6 Matriz de repuestos críticos.....	157
Anexo 7 Indicadores KPI.....	158
Anexo 8 Formato de inspección.....	158
Anexo 9 Matriz de lubricación.....	158
Anexo 10 Procedimientos asociados.....	159
Anexo 11 Comparación entre la Matriz de Criticidad Convencional y el Análisis de Criticidad Basado en Riesgo (RBCA).....	160

Introducción

La minería constituye una de las actividades más representativas y estratégicas para la economía peruana, siendo el cobre uno de los recursos más demandados en los mercados internacionales. Como señala Latam FDI (2024), el sector minero aporta cerca del 10 % del PBI nacional y representa aproximadamente el 60 % del valor total de las exportaciones del país. En este contexto, los procesos de conminución y chancado adquieren una importancia decisiva, ya que determinan la eficiencia global de la cadena productiva.

Dentro de estas etapas, el *High Pressure Grinding Roll (HPGR)* se ha consolidado como un equipo de alta criticidad por su capacidad de mejorar la eficiencia energética y la liberación mineral. Según Schönert (1988), pionero en el estudio de esta tecnología, el HPGR logra una fragmentación más eficiente con un menor consumo energético frente a la molienda convencional. De manera complementaria, Global Mining Review (2019) menciona que los HPGR pueden generar ahorros energéticos de hasta un 35 % en comparación con los molinos SAG, lo que justifica su creciente adopción en la industria minera.

No obstante, el mantenimiento de este tipo de activos sigue representando un desafío para las empresas mineras y para aquellas organizaciones que brindan soporte técnico especializado. Como lo indica Moubray (1997), la falta de planes de mantenimiento estructurados afecta directamente la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, lo que repercute en los costos de operación y la competitividad del sector.

Ante esta problemática, la presente investigación plantea el diseño de un plan de mantenimiento para equipos HPGR basado en la integración de las metodologías Reliability Centered Maintenance (RCM) y Lean Maintenance. Dicho enfoque busca no solo atender las necesidades técnicas del activo, sino también promover la estandarización de procesos, la eliminación de desperdicios y la mejora continua.

Este trabajo se desarrolla en el marco de la formación académica en ingeniería, con el propósito de generar un aporte práctico y teórico que fortalezca la gestión del mantenimiento en el sector minero peruano.



CAPÍTULO I

Planteamiento teórico de la investigación

1.1. Enunciado de la investigación

Propuesta de un Plan de Mantenimiento integrador basado en las metodologías RCM y Lean Maintenance y su aplicación a molinos de alta presión HPGR

1.2. Descripción del Problema

1.2.1. Enunciado del problema

La industria minera global se encuentra en una fase de intensa transformación, impulsada por la creciente demanda de metales como el cobre. Según la IEA (2024), se prevé que la demanda mundial de cobre aumente significativamente en el escenario de transición energética, lo que está redefiniendo el panorama de producción minera.

Dicho mineral es la materia prima fundamental para las infraestructuras de energías renovable, electrónica avanzada, el electro movilidad, entre otros. Así mismo impulsa economías y redefine cadenas de suministro. En este entorno competitivo, las empresas mineras están condicionadas a maximizar su eficiencia y disponibilidad operativa. Sin embargo, a pesar de las inversiones en tecnología, la gestión del mantenimiento sigue siendo un punto crítico. La implementación de estrategias de mejora como Lean se enfrenta a desafíos intrínsecos; según Womack y Jones (2003) pioneros del pensamiento Lean, sostienen que el éxito de la estrategia requiere una transformación cultural profunda y no únicamente la aplicación de herramientas superficiales, lo que resalta por qué muchas iniciativas de mejora se detienen si no se adoptan integralmente.

La pérdida parcial o total de la función principal de los equipos en entornos industriales representa una amenaza significativa para la continuidad de la producción y la rentabilidad. Como enfatiza Moubray (1997), la falla inesperada de un activo no solo implica un costo de reparación, sino también pérdidas asociadas a la detención de la producción, lo que afecta directamente la cadena de suministro. La planificación del mantenimiento preventivo y predictivo que busca anticipar estos eventos, gana relevancia para minimizar el tiempo de inactividad, garantizando la fiabilidad de los procesos (Alsyouf, 2007). En economías emergentes de América Latina, el imperativo de optimizar los indicadores de productividad y disponibilidad ha impulsado la adopción de diversas filosofías de mantenimiento (Pinz et al., 2013). Sin embargo, la brecha entre la teoría y la práctica sigue siendo un desafío, especialmente en sectores de alta complejidad tecnológica.

La postura del Perú como un líder mundial en la producción de cobre lo ubica en el epicentro de esta dinámica global. Según se muestra en el informe planteado por Perú's Mining & Metals Investment Guide 2025/2026 (2025) , el sector minero posee el 8.5% del producto bruto interno del país mientras que las exportaciones de los minerales representan el 64 % del total de todas las exportaciones, considerando además que al año 2024 el Perú tenía aproximadamente el 12% de las reservas mundiales de cobre. La contribución del sector minero es vital para la economía nacional, dentro de las operaciones mineras los procesos de conminución y chancado son etapas iniciales y decisivas; cualquier acción o proceso ineficiente repercute en toda la cadena productiva. Específicamente, el High Pressure Grinding Roll (HPGR) es un equipo esencial y crítico en estas etapas, su rendimiento impacta directamente la capacidad de procesamiento y el costo total de la mina.

La organización objeto de estudio, se posiciona como un actor clave en la industria minera peruana, especializada en la fabricación y soporte de equipos de molienda, particularmente el HPGR. Su visión es clara: asegurar la máxima disponibilidad y confiabilidad de estos equipos.

El HPGR, debido a su rol crítico en la línea de conminución y chancado, es un activo que requiere aplicársele estrategias y tareas de mantenimiento excepcional. La presencia de una falla imprevista en un equipo HPGR no solo detiene la producción, sino que genera costos de inactividad exorbitantes y compromete sus funciones principales, secundarias y la entrega del producto deseado. Lo que se busca es ofrecer un mantenimiento que minimice drásticamente los tiempos de inactividad, asegurando que cada HPGR retorne a la operación con un rendimiento óptimo y una fiabilidad garantizada. Esto no es solo un objetivo técnico, sino una promesa de valor que refuerza la competitividad de las operaciones mineras de nuestros clientes.

La problemática reside en la ausencia de un plan de mantenimiento estructurado y detallado para el equipo HPGR. Actualmente las operaciones de mantenimiento se rigen principalmente por procedimientos genéricos proporcionados por el fabricante únicamente. Si bien dichos documentos son útiles como guía inicial, son insuficientes para abordar la complejidad inherente a un equipo de la magnitud y criticidad del HPGR y así mismo para satisfacer las exigencias específicas del entorno minero productivo. Esta dependencia de directrices estandarizadas limita severamente la capacidad para prevenir los modos de falla, optimizar los tiempos de reparación y garantizar una calidad de mantenimiento consistente y superior. Asimismo, factores negativos como los

tiempos muertos (downtime) durante los procesos de mantenimiento y reparación que impactan negativamente en la eficiencia interna de la organización y en la agilidad de respuesta hacia el cliente. Esto se traduce en una calidad de mantenimiento inconsistente, que en ocasiones no logra maximizar la disponibilidad ni la confiabilidad a largo plazo de los equipos una vez que son reinstalados en las operaciones mineras.

A dicha problemática se suma la ausencia de una metodología sistemática para la identificación de las causas raíz de las fallas y para la implementación de un ciclo de mejora continua efectivo y de calidad en los procesos, lo que impide la optimización integral de los recursos.

Adicionalmente, los procesos operativos se dan bajo presión de los ajustados cronogramas y los estrictos tiempos de reparación exigidos por los clientes mineros. Los que a su vez enfrentan márgenes operativos muy estrechos y asumen altos costos por cada hora de inactividad. La exigencia de sincronizar los tiempos de reparación con los períodos de operación de las plantas añade una capa significativa de complejidad y desafío.

Ante este escenario crítico, la presente propuesta de investigación se enfoca en la propuesta de un plan de mantenimiento para el equipo HPGR, fundamentado en los principios del RCM (Reliability Centered Maintenance) y Lean Maintenance. Esta propuesta busca ser una respuesta directa y estratégica a la actual deficiencia en la planificación del mantenimiento. Es fundamental destacar que la aplicación de ambas metodologías y el desarrollo del plan se centrarán exclusivamente para el equipo HPGR, con el objetivo de optimizar cada fase del proceso de mantenimiento. Esta optimización se concibe para operar en paralelo, ya que mientras el equipo principal se realiza el mantenimiento, un equipo de repuesto (spare) cumple con su ciclo de vida útil de operación en la línea de producción de la mina, asegurando la continuidad operativa del cliente.

La adopción de RCM permitirá focalizar los esfuerzos en identificar los modos de falla más críticos del HPGR, racionalizando las tareas y el uso de recursos de manera inteligente y eficiente. Complementariamente, la implementación de Lean Maintenance, que incluirá la aplicación de herramientas como las 5S, la estandarización de procesos y la eliminación sistemática de desperdicios, se traducirá en una reducción sustancial de los tiempos muertos. Esto no solo optimizará los flujos de trabajo internos, sino que garantizará la entrega de un mantenimiento de alta calidad que maximice la

disponibilidad y confiabilidad de dichos equipos críticos, asegurando que estén listos para operar con la máxima eficiencia cuando el cliente lo requiera.

En virtud a lo expuesto anteriormente y considerando lo propuesto por Bermúdez & Rodríguez (2012) quienes sostienen que todo problema para facilitar su análisis y solución debe ser:

- Medible: Que permita evaluar sus modificaciones
- Solucionable: Que ofrezca posibilidades de poder intervenir para eliminar las causas de su origen
- Flexible: Que no se encuentre definido por la ausencia de una solución
- Plausible: Que facilite la viabilidad de las intervenciones para su solución

En tal sentido, el presente trabajo de investigación se considera medible ya que permite evaluar al problema y sus modificaciones, es solucionable porque a partir de la propuesta de un plan de mantenimiento integral para el equipo HPGR basado en las Estrategias RCM y Lean Maintenance dará solución a las necesidades y requerimientos del entorno que lo demanda, es flexible porque el concepto del Mantenimiento RCM y Lean Maintenance de los equipos HPGR es considerado en diversas materias de estudio en ingeniería, ingeniería de mantenimiento, gestión de mantenimiento y confiabilidad, lo que permitirá su demostración, es plausible porque se propondrá un plan de mantenimiento integral basado en la interacción de dos estrategias de mantenimiento antes mencionadas, lo cual complementa el estudio tradicional del mantenimiento considerando para ello las investigaciones, teorías y la práctica que la implica.

1.2.2. Formulación del problema

En virtud a lo anteriormente descrito, el presente trabajo se orienta a la propuesta de un plan de mantenimiento que integra dos metodologías el RCM y el Lean Maintenance los cuales serán aplicados a molinos de alta presión HPGR, el estudio por lo tanto busca responder la siguiente interrogante:

¿Será posible realizar la propuesta de un Plan de Mantenimiento integrador basado en las metodologías RCM y Lean Maintenance para su aplicación a molinos de alta presión HPGR?

1.3. Interrogantes de la investigación

1.3.1. Interrogante principal

¿Será posible realizar la propuesta de un Plan de Mantenimiento integrador basado en las metodologías RCM y Lean Maintenance para su aplicación a molinos de alta presión HPGR?

1.3.2. Interrogantes específicas

¿Cuál es el estado actual de la actividad de mantenimiento aplicada al equipo HPGR, considerando las fallas recurrentes, los tiempos de inactividad y las oportunidades de mejora identificadas?

¿Cuál es el grado de criticidad de los molinos de alta presión HPGR dentro de la cadena productiva??

¿Cuáles son las funciones primarias y secundarias, los modos de falla y los efectos de falla del molino HPGR, determinados mediante el análisis de los Modos de Falla y Efectos como metodología colaborativa de apoyo a la estrategia RCM?

¿Cómo puede diseñarse un Plan de Mantenimiento Integrador basado en las metodologías RCM y Lean Maintenance para el equipo HPGR, que permita optimizar los recursos, eliminar desperdicios, mejorar la eficiencia operativa y contribuir a la sostenibilidad organizacional?

¿Cuál es la diferencia económica entre el estado actual del plan de mantenimiento de los molinos HPGR y la propuesta de Plan de Mantenimiento Integrador basada en las metodologías RCM y Lean Maintenance?

1.4. Área del conocimiento

Según el estándar en el área de conocimiento de ciencia y tecnología de la OCDE, la presente tesis forma parte de:

- Área: Ingeniería y Tecnología
- Subárea: Ingeniería Mecánica
- Línea: Gestión del Mantenimiento
- Planificación las tareas de mantenimiento, así como el perfeccionamiento de los indicadores de calidad, disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad de los molinos de alta presión HPGR.

1.5. Variables de la Investigación

1.5.1. Variable Independiente

Factores determinantes en la optimización de la planificación de tareas de mantenimiento, así como en la mejora de los indicadores de confiabilidad, calidad, mantenibilidad, eficiencia y disponibilidad de los molinos de alta presión HPGR.

1.5.2. Variable Dependiente

Propuesta de plan de mantenimiento integrador basado en las metodologías RCM y Lean Maintenance.

1.6. Justificación de la Investigación

Bermúdez y Rodríguez (2012), sostienen que la justificación del problema enuncia el por qué y para qué de la investigación. En otras palabras, precisa el por qué es relevante resolver el problema de la investigación e igualmente el propósito o para que se debe adelantar el proyecto de investigación enmarcando el impacto y efectos que la solución del problema traerá para un área geográfica o sector productivo.

La justificación puede darse desde distintas ópticas, la justificación por conveniencia la que sostiene si estudio es conveniente de realizar y se sustenta en las interrogantes: ¿Para qué sirve o servirá la investigación?, la justificación teórica es la que constituye las razones que argumenta el deseo de verificar, rechazar o aportar aspectos teóricos referidos al objeto de investigación. La Justificación social, que indica la importancia que tiene el estudio en la sociedad, sustenta quienes serán los beneficiarios de los hallazgos obtenidos. Por su parte la Justificación práctica que permite saber si el estudio tendrá implicancias prácticas es decir si resuelve un problema práctico, su planteamiento contribuye a la solución del problema de la investigación o por lo menos indicará las estrategias cuya aplicación permitirá dar solución al problema. Justificación metodológica la cual contempla las razones que sustentan un aporte por la utilización o creación de instrumentos y modelos de investigación, finalmente la justificación práctica la cual constituye el aporte del beneficio.

Por lo tanto, el problema relacionado a la investigación propuesta se justifica en cinco niveles:

1.6.1. Justificación por conveniencia

El presente estudio posee una relevancia destacada, puesto que aborda una problemática crítica dentro del sector minero peruano: la ausencia de un plan de

mantenimiento especializado para los equipos HPGR. Dado que estos equipos son fundamentales en las etapas de conminución y chancado, contar con una propuesta que mejore la disponibilidad y confiabilidad de los mismos resulta altamente beneficioso para la organización objeto de estudio y para el sector en general. Además, al integrar metodologías reconocidas como RCM y Lean Maintenance, se ofrece un enfoque moderno y aplicable que puede servir como modelo de referencia para otras empresas del rubro.

1.6.2. Justificación Social

La minería constituye una de las principales actividades económicas del Perú y genera empleo directo e indirecto en diversas regiones del país. Mejorar la gestión del mantenimiento de equipos críticos como el HPGR contribuye a garantizar la continuidad de la producción y, por ende, la estabilidad laboral de cientos de trabajadores que dependen de la cadena de valor minera. Asimismo, una gestión eficiente de los activos reduce los riesgos de fallas catastróficas que podrían afectar la seguridad del personal y el entorno, aportando de este modo a la responsabilidad social empresarial.

1.6.3. Justificación Práctica

Desde una perspectiva práctica, la propuesta permitirá contar con un plan de mantenimiento específico para el HPGR, aplicable para la empresa. El estudio se convertirá en una herramienta operativa para técnicos y supervisores, facilitando la estandarización de tareas, la reducción de tiempos muertos y la mejora de la calidad en cada intervención. Asimismo, servirá como base para optimizar la planificación de recursos y la programación de actividades, impactando directamente en la eficiencia operativa.

1.6.4. Justificación Teórica

En el plano académico, la investigación aporta a la consolidación del conocimiento en torno a la aplicación combinada de las metodologías RCM y Lean Maintenance en equipos de alta criticidad. Si bien existen estudios que han abordado cada estrategia de manera individual, la integración de ambas en un plan de mantenimiento para HPGR constituye un aporte innovador que contribuye al desarrollo teórico de la ingeniería de mantenimiento y confiabilidad. Este enfoque permitirá validar, contrastar o enriquecer los marcos conceptuales ya existentes en la literatura especializada.

1.6.5. Justificación Metodológica

La investigación también se justifica por su aporte metodológico, ya que plantea la aplicación de un enfoque mixto (cualitativo–cuantitativo) que combina análisis de

criticidad, identificación de modos de falla y aplicación de herramientas Lean en un contexto real. Este esquema metodológico no solo asegura la pertinencia de los resultados para la empresa objeto de estudio, sino que también puede replicarse y adaptarse en otras organizaciones industriales. De esta manera, se contribuye al desarrollo de metodologías prácticas para el diseño y validación de planes de mantenimiento en el ámbito minero.

1.7. Objetivos de la Investigación

1.7.1. Objetivo General

Proponer un Plan de Mantenimiento integrador basado en las metodologías RCM y Lean Maintenance y su aplicación a molinos de alta presión HPGR

1.7.2. Objetivos Específicos

- Evaluar el estado actual de la actividad de mantenimiento aplicado al equipo HPGR, identificando fallas recurrentes, tiempos de inactividad y oportunidades de mejora.
- Realizar el análisis de criticidad para validar el grado de importancia de los molinos de alta presión dentro de la cadena productiva.
- Aplicar el análisis de los Modos de falla y efecto como metodología colaborativa a la estrategia RCM para conocer la función primaria, funciones secundarias, los modos y efectos de falla del Molino HPGR.
- Diseñar una propuesta de Plan de Mantenimiento Integrador basado en las metodologías RCM y Lean Maintenance para el equipo HPGR, integrando las estrategias de mantenimiento determinadas mediante RCM con los principios y herramientas de Lean Maintenance, orientada a la optimización de recursos, eliminación de desperdicios, mejora de la eficiencia operativa y sostenibilidad organizacional.
- Realizar un análisis económico comparativo entre el estado actual del plan de mantenimiento de los Molinos HPGR y la propuesta a desarrollar.

1.8. Alcances de la Investigación

La investigación analiza el mantenimiento de un equipo High Pressure Grinding Roll (HPGR) de la empresa objeto de estudio, considerando sus condiciones técnicas y operacionales. Se evalúan las fallas, modos de falla y criticidad de sus principales sistemas, aplicando RCM para definir tareas de mantenimiento e incorporando

herramientas de Lean Maintenance para optimizar recursos y reducir los tiempos de intervención.

Por lo expuesto, los alcances del presente estudio incluyen:

- **Ámbito técnico:** Se efectuará el diagnóstico del sistema de mantenimiento actual del HPGR, identificación de fallas recurrentes y modos críticos de falla, y formulación de un plan de mantenimiento integrador basado en RCM y Lean Maintenance.

- **Ámbito metodológico:** La recolección de datos se efectuará mediante entrevistas a supervisores y técnicos, pudiendo incluir jefes o gerentes, así como observación participante en procesos de mantenimiento.

- **Ámbito temporal:** La investigación tendrá una duración estimada de 12 a 18 meses, considerando diagnóstico, diseño, validación y retroalimentación del plan propuesto.

- **Resultados esperados:** Se dará la entrega de un plan de mantenimiento especializado para HPGR que incremente su disponibilidad y confiabilidad, con posibilidad de adaptación a otros equipos similares.

1.9. Limitaciones de la Investigación

Las limitaciones del presente estudio incluyen:

Cobertura de equipos: Se intervendrá un solo equipo HPGR, por lo que la replicabilidad de los resultados a otros modelos debe ser evaluada posteriormente.

Dependencia de información interna: los registros históricos de fallas y reparaciones dependen de la calidad y precisión de los datos provistos por la empresa.

- **Acceso a documentación técnica:** Algunas especificaciones del fabricante pueden ser de carácter reservado, limitando la profundidad de ciertos análisis.

- **Disponibilidad de personal clave:** La participación de jefes y supervisores en entrevistas dependerá de su disponibilidad de tiempo.

- **Restricciones operativas:** Los cronogramas de trabajo y las exigencias de los clientes pueden impedir la observación de todos los procesos en tiempo real.

1.10. Antecedentes de la Investigación

Geisbush y Ariaratnam (2023) revisan el estado actual del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), destacando que, aunque esta metodología se originó en la

industria aeronáutica, su aplicación en sectores como la minería representa una oportunidad para mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos críticos.

Asimismo, Jafarpisheh, Karbasian y Asadpour (2021) proponen un enfoque híbrido de RCM apoyado en técnicas multicriterio, que permite priorizar de manera más precisa las fallas críticas en máquinas de transporte minero. Dicho método demuestra ser eficaz para optimizar la asignación de recursos en entornos de alta exigencia operativa.

De igual forma, un estudio publicado en DOAJ (s.f.) evidencia que la implementación del RCM en una planta ferrocromica permitió establecer un plan de mantenimiento preventivo más eficiente, reduciendo la frecuencia de fallas y mejorando la disponibilidad operativa de los equipos.

Por otro lado, Suthep y Kullawong (2015) combinaron la metodología RCM con una planificación sistemática de mantenimiento en plantas de cromado, logrando disminuir los tiempos de inactividad y aumentar la disponibilidad. Estos resultados reflejan la efectividad del enfoque basado en confiabilidad dentro de entornos industriales complejos.

A su vez, Martínez-Monseco (2020) analizó la optimización del mantenimiento en una planta hidroeléctrica, concluyendo que la aplicación de metodologías centradas en la confiabilidad permite definir intervalos de intervención más adecuados y mejorar la eficiencia global de los sistemas. Posteriormente, el mismo autor (2021) aplicó RCM y FMECA en el diseño de un plan de mantenimiento para turbinas hidroeléctricas, demostrando que la integración de ambas herramientas incrementa la planificación y la confiabilidad operacional de los equipos críticos.

En cuanto al ámbito de los molinos de alta presión, Rashidi, Rajamani y Fuerstenau (2017) realizaron una revisión sobre los modelos de comportamiento de los HPGR, resaltando su relevancia en el procesamiento de minerales y señalando los factores que influyen en su confiabilidad y desempeño operativo. Finalmente, Kazerani Nejad y Sam (2016) discuten las principales limitaciones de estos equipos, entre ellas el desgaste acelerado de componentes y los altos requerimientos de mantenimiento, lo que refuerza la necesidad de implementar planes integradores como el propuesto en la presente investigación. Según Quispe (2019), la aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en una planta concentradora permitió identificar funciones críticas y optimizar los intervalos de mantenimiento. El estudio evidenció que el uso del RCM reduce significativamente las fallas imprevistas. Este antecedente respalda la relevancia de aplicar el RCM en equipos mineros de alta criticidad como los HPGR.

En torno al conjunto de estrategias Lean asociadas a mantenimiento, Huamán (2020), realizó una investigación relacionada a la implementación de herramientas Lean en un taller metalmecánico generó una disminución de desperdicios y tiempos de espera en más de un 20 %. Dicho resultado muestra que la filosofía Lean, aunque más usada en manufactura, puede adaptarse al mantenimiento. Este enfoque es coherente con la propuesta del presente trabajo.

Ramírez (2021) se evaluó la gestión del mantenimiento de molinos de rodillos a presión en una empresa minera. El autor concluyó que la falta de planes estructurados ocasionaba tiempos de parada prolongados. Este hallazgo coincide con la problemática planteada, reforzando la necesidad de una propuesta específica para los HPGR.

De acuerdo con Gómez (2018), la implementación de indicadores de disponibilidad y mantenibilidad en equipos de chancado permitió cuantificar mejoras en la eficiencia operativa. Como dice el autor, “lo que no se mide, no se mejora”. Por ello, en la presente investigación los KPI tendrán un papel clave en la validación del plan de mantenimiento.

Según Fernández (2017), la integración de metodologías de confiabilidad y herramientas Lean en una planta cementera logró una reducción sustancial en los costos de mantenimiento. Esto demuestra que la combinación de estrategias no solo es viable, sino beneficiosa. Dicho antecedente guarda estrecha relación con la integración RCM–Lean propuesta en este estudio.

En un artículo publicado por Alsyouf (2007), se destaca que los costos ocultos de una falla de mantenimiento superan ampliamente los de la reparación directa, al incluir pérdidas por tiempo de inactividad y baja productividad. Este planteamiento refuerza la importancia de contar con planes que aseguren continuidad operativa en equipos de gran impacto como los HPGR.

Como sostienen Womack y Jones (2003), la filosofía Lean aplicada al mantenimiento busca la eliminación de desperdicios, incrementando la eficiencia y calidad de los procesos. Este antecedente fundamenta el uso de Lean Maintenance como parte del modelo propuesto en la presente investigación. Según Morrell, Shi y Tavares (2015), la confiabilidad operacional en molienda depende no solo del diseño del equipo, sino también de la estrategia de mantenimiento adoptada. Este aporte teórico coincide con la premisa de que la disponibilidad de los HPGR puede incrementarse a través de planes de mantenimiento integradores.

De acuerdo con Santos Casilla (2022), el análisis de modos y efectos de falla (AMEF) resultó fundamental para identificar fallas funcionales y establecer acciones preventivas, evitando paradas no programadas y pérdidas de producción. Este antecedente fundamenta el uso del AMEF como herramienta clave dentro del plan de mantenimiento integrador para los molinos HPGR.

Huamán Vergara (2024) destaca que la implementación del modelo propuesto generó un incremento significativo en la disponibilidad de las chancadoras, al reducir los tiempos de reparación y aumentar la confiabilidad operacional. Este antecedente confirma que los enfoques preventivos constituyen un eje fundamental en el diseño de planes de mantenimiento orientados a equipos de conminución de alta criticidad.





CAPÍTULO II

Marco Teórico

2.1. Concepto de Mantenimiento

El mantenimiento, entendido como una disciplina tanto técnica como de gestión, abarca el conjunto de actividades destinadas a conservar o restablecer las condiciones operativas de un activo, asegurando que cumpla la función para la cual fue diseñado. A lo largo de su evolución histórica, este concepto ha pasado de ser considerado una labor meramente correctiva a consolidarse como un proceso estratégico que impacta directamente en la productividad, la seguridad y la competitividad industrial. Según Kelly (2006) y Moubray (1997), el mantenimiento moderno se fundamenta en la confiabilidad y la gestión de riesgos, orientando sus acciones hacia la prevención y la optimización de los recursos, más que a la simple reparación de fallas.

De acuerdo con normas internacionales como la UNE-EN 13306:2018, el mantenimiento se define como la combinación de acciones técnicas, administrativas y de gestión encaminadas a mantener o restituir un bien en un estado en el que pueda desarrollar la función requerida. Esta definición resalta que no solo se trata de reparar, sino también de planificar, supervisar, evaluar y mejorar continuamente.

Autores como Moubray (1997) sostienen que el mantenimiento moderno debe orientarse a asegurar la confiabilidad de los equipos, considerando no solo las fallas físicas, sino también las consecuencias económicas, ambientales y de seguridad que estas pueden generar. En este sentido, el mantenimiento se integra como un factor clave dentro de la gestión empresarial, pues contribuye a maximizar la disponibilidad de los activos y a reducir los costos asociados al ciclo de vida de los mismos.

El mantenimiento ocupa un papel esencial dentro del sector minero, debido a la criticidad de los equipos que participan en la cadena de valor. Las interrupciones no planificadas pueden generar pérdidas económicas significativas y riesgos operativos.

Como señalan Dhillon (2006) y Smith (2017), la gestión moderna del mantenimiento en minería se ha transformado en un proceso estructurado y predictivo, orientado no solo a garantizar la continuidad de las operaciones, sino también a fortalecer la competitividad organizacional.

Este enfoque evidencia que el mantenimiento ha dejado de ser una actividad meramente técnica para convertirse en un sistema integral que combina ingeniería, gestión y cultura corporativa. Así, su propósito principal es asegurar la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia de los activos a lo largo del tiempo, tal como destacan Kelly (2006) y Moubray (1997).

En la Figura 1 representa un ejemplo del mantenimiento en general

Figura 1

Concepto Mantenimiento



Nota. La Figura muestra el mantenimiento correctivo. Fuente: <https://deconceptos.com/>.

2.2. Calidad en el Mantenimiento.

La calidad en el mantenimiento se refiere al cumplimiento de estándares y buenas prácticas que aseguran que los equipos mantengan su disponibilidad y confiabilidad en el tiempo. No se limita a reparar fallas, sino que implica planificar, ejecutar y controlar las actividades de manera que generen valor y reduzcan pérdidas.

De acuerdo con la ISO 9001:2015, la calidad se sustenta en la estandarización de procesos, el control de indicadores y la mejora continua. Aplicada al mantenimiento, significa contar con procedimientos claros, registros confiables y resultados medibles que permitan evaluar la efectividad de cada intervención.

En minería, la calidad en el mantenimiento es crítica debido al alto costo de las paradas no programadas. Un sistema de mantenimiento bien gestionado contribuye a minimizar fallas, optimizar recursos y garantizar la seguridad, fortaleciendo la competitividad de la organización.

En síntesis, la calidad en mantenimiento actúa como el vínculo entre la gestión técnica y los objetivos estratégicos de la empresa, asegurando equipos confiables, eficientes y disponibles. Tal como sostienen Smith (2017) y Ben-Daya (2009), un mantenimiento de calidad no solo busca evitar fallas, sino también agregar valor mediante la mejora continua de los procesos y la optimización del ciclo de vida de los activos.

2.3. Evolución de las estrategias de mantenimiento

La gestión del mantenimiento ha tenido una evolución sustancial: en sus comienzos era una labor prácticamente reactiva, orientada únicamente a reparar fallas, pero progresó hasta

transformarse en un proceso estratégico alineado con los objetivos operativos de las organizaciones. Según Gackowiec (2019), esta transformación refleja el paso de un mantenimiento correctivo hacia el preventivo, y más adelante hacia un mantenimiento basado en condición y predictivo, adaptando su enfoque a los retos de las industrias modernas.

Esta transformación ha permitido integrar herramientas tecnológicas y enfoques de gestión que mejoran la eficiencia, la confiabilidad y la sostenibilidad de los activos.

En la misma línea, Rakyta et al. (2024) destacan que la incorporación de sistemas digitales y analíticos ha impulsado el mantenimiento predictivo, permitiendo a las empresas anticipar fallas y optimizar el uso de recursos.

En síntesis, la evolución de las estrategias de mantenimiento refleja un cambio de paradigma: de una visión centrada en la reparación hacia un modelo de gestión integral que combina tecnología, confiabilidad y toma de decisiones basada en datos.

2.4. Concepto de Mantenimiento basado en la confiabilidad

El Mantenimiento basado en la confiabilidad busca preservar las funciones de los activos a través de un proceso estructurado que incluye la identificación de funciones, modos de falla, efectos, consecuencias y tareas óptimas para mitigarlas (Moubray, 1997). Su aplicación en minería permite focalizar recursos en componentes críticos, incrementando la disponibilidad y reduciendo costos.

2.4.1. Evolución del RCM

A lo largo de su desarrollo, la estrategia del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) ha incorporado valiosos aportes provenientes de la estadística y de la ingeniería de confiabilidad, permitiendo optimizar la planificación y ejecución de las acciones de mantenimiento.

De acuerdo con lo que plantean diversos expertos en ingeniería de mantenimiento, la metodología del RCM surge como respuesta a la creciente complejidad y criticidad de los activos industriales: inicialmente, las prácticas de mantenimiento se basaban casi exclusivamente en intervenciones reactivas y en programas temporales de revisión, pero con el tiempo se ha ido desplazando hacia un enfoque centrado en la función del equipo, en el riesgo que representa su falla y en su ciclo de vida operativo (cf. ReliabilityWeb, 2007).

Por ejemplo, en el artículo “An Introduction to RCM” se explica que en sus comienzos el mantenimiento se limitaba a tareas básicas de limpieza y lubricación, luego avanzó hacia programas de revisión periódica en la segunda generación, y finalmente la tercera generación

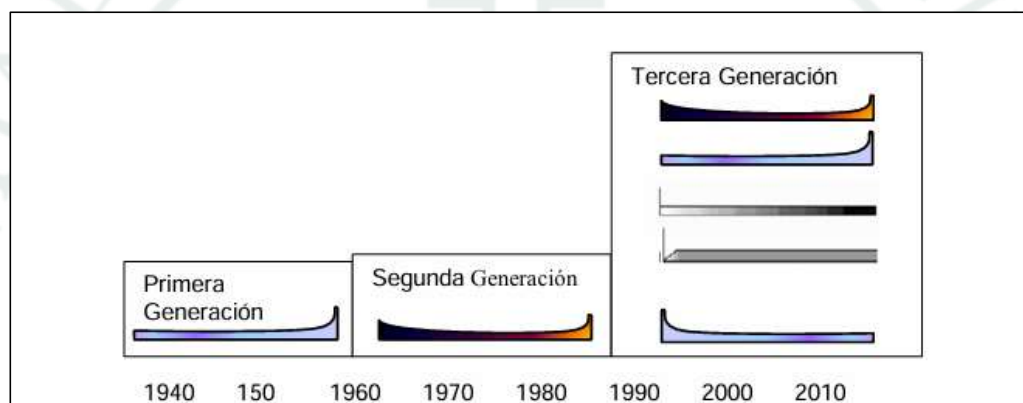
incorpora análisis de condición, confiabilidad y decisión basada en riesgo para definir qué, cuándo y cómo mantener (ReliabilityWeb, 2007).

Este recorrido muestra claramente que el mantenimiento ha dejado de ser simplemente la actividad de “intervenir cuando falla” para convertirse en un proceso estructurado que prioriza la preservación de funciones críticas, la optimización del costo de ciclo de vida y la alineación con los objetivos estratégicos de la empresa.

En la Figura 2 se observa las gráficas de los cambios de los puntos de vista de falla en los equipos

Figura 2

Gráficas de cambios de los puntos de vista sobre falla de equipos



Nota. La Figura 2 muestra el cambio sobre las fallas en equipos. Tomado de: Mantenimiento basado en la confiabilidad “MOUBRAY” John .

En la Tabla 1 se muestran cada uno de los comportamientos de los modos de fallas

Tabla 1

Comportamientos de los modos de falla según su relación con la edad del equipo

Tipo de curva	Descripción
Modelo A 	Corresponde a la conocida “curva de la bañera”, donde inicialmente se presenta una alta frecuencia de fallas (mortalidad infantil), seguida de un periodo de estabilidad y, finalmente, un aumento debido al desgaste del equipo.
Modelo B 	Representa una probabilidad de falla casi constante o ligeramente ascendente que culmina en una etapa de desgaste progresivo.
Modelo C	Indica una probabilidad de falla que tiende a incrementarse levemente con el tiempo, sin una fase de desgaste claramente identificable.

	
Modelo D 	Evidencia una baja probabilidad de falla inicial que se incrementa rápidamente hasta estabilizarse en un nivel constante, generalmente cuando el componente comienza a envejecer.
Modelo E 	Refleja una probabilidad de falla constante a lo largo de toda la vida útil del equipo, es decir, fallas completamente aleatorias.
Modelo F 	Comienza con una mortalidad infantil elevada que disminuye paulatinamente hasta alcanzar una tasa de fallas estable o de crecimiento lento.

Nota. Este cuadro muestra los diferentes comportamientos de los modos de falla según su relación con la edad del equipo. Tomado de: Elaboración propia a partir de Moubray (1997).

2.4.2. Las siete preguntas del RCM

De acuerdo con la norma SAE JA-1011 (1999), todo proceso de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) debe desarrollarse asegurando que se respondan, en un orden específico, siete preguntas fundamentales.

Buscan comprender de manera integral el comportamiento del activo dentro de su entorno operativo. En primer lugar, se debe definir qué funciones y niveles de desempeño se esperan del equipo en su contexto actual. Luego, identificar de qué formas puede fallar al cumplir dichas funciones y cuáles son las causas que originan cada una de esas fallas.

Posteriormente, es necesario determinar qué sucede cuando la falla ocurre y cuáles son las consecuencias que dicha falla produce sobre la operación o la seguridad. A partir de este análisis, se establecen las tareas necesarias para anticipar o prevenir la ocurrencia de cada falla, definiendo los intervalos o frecuencias de dichas tareas. Finalmente, si no existe una acción proactiva viable, la metodología debe precisar qué medidas o decisiones predeterminadas deben adoptarse para mitigar el riesgo o controlar los efectos del evento.

En la Tabla 2 se muestra las siete preguntas básicas del RCM

Tabla 2*Tabla de las siete preguntas básicas del RCM*

Categoría	Pregunta Básica del RCM
Establece Objetivos, Define el Problema y Recoge la Información Básica	¿Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operacional presente (funciones)?
	¿De qué maneras puede fallar al cumplir sus funciones (fallas funcionales)?
	¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?
	¿Qué pasa cuando ocurre cada falla funcional (efectos de falla)?
Consecuencias de las Fallas	¿De qué manera afecta cada falla (consecuencias de falla)?
Estrategias de Mantenimiento	¿Qué se debe hacer para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas, intervalos de tareas)?
	¿Qué se debe hacer si una tarea proactiva que conviene no está disponible (acciones predeterminadas)?

Nota. Esta tabla muestra las siete preguntas básicas del RCM. Fuente: “Aplicación del Mantenimiento Centrado En la Confiabilidad RCM en Motores Detroit 16v-149ti en Codelco División Andina”

2.4.3. Diseño de un proyecto RCM

La tabla 3 presenta los principios fundamentales que deben considerarse en el diseño de un proyecto de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), orientado a lograr la optimización de las actividades de mantenimiento.

Tabla 3*Principios Fundamentales para un diseño de un proyecto de RCM*

N.º	Requisitos
1	La prioridad principal debe centrarse en garantizar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, asegurando que puedan cumplir su función de manera continua y eficiente.
2	El enfoque del mantenimiento debe dirigirse a las funciones críticas que cumplen los activos dentro del proceso productivo, más que a la simple conservación de los equipos.
3	Todo plan de mantenimiento debe estar sustentado en un análisis formal de confiabilidad, que permita comprobar su efectividad y su coherencia con los objetivos operativos.
4	El proceso de análisis debe desarrollarse con un enfoque sistémico y metódico, abarcando tanto la extensión del sistema como la profundidad técnica de cada componente.

Nota. Este cuadro muestra los principios fundamentales para un diseño de un proyecto RCM. Tomado de: “Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial”. GARCÍA Palencia, Oliverio.

Una etapa clave dentro de la aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) consiste en la selección adecuada de las tareas y actividades que se ejecutarán. Para facilitar esta decisión, se emplean diagramas o esquemas que resumen de manera lógica el proceso de análisis. Dichos esquemas, conocidos como Diagramas de Decisión, tienen como propósito definir el tipo de tarea más apropiada para cada modo de falla identificado.

La elección depende de varios factores, como la evidencia de la falla para el personal operativo, su impacto sobre la seguridad o el medio ambiente, y la existencia de una variable que permita monitorear su condición.

Cada una de estas condiciones conduce a una serie de preguntas que orientan la selección de la tarea de mantenimiento más conveniente.

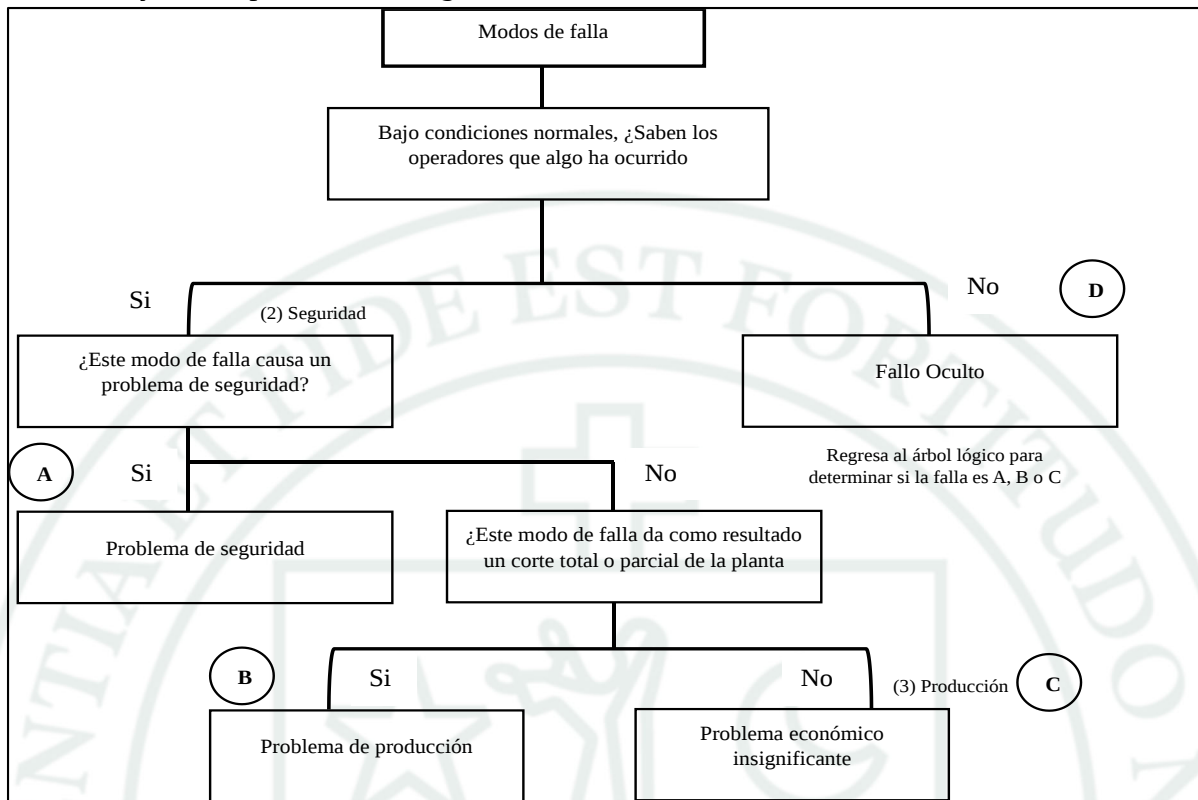
En los casos en que no resulte viable implementar acciones de tipo preventivo o predictivo, el procedimiento contempla la posibilidad de rediseñar el componente o sistema afectado con el fin de eliminar la causa raíz del problema.

Finalmente, una vez determinadas las tareas, se elabora un informe técnico donde se detallan los resultados obtenidos, los beneficios esperados y las actividades específicas que se desarrollarán.

En la Figura 3 se muestra el Diagrama de Decisión RCM, el cual resume gráficamente los pasos del proceso de selección de tareas y las decisiones asociadas a cada etapa.

Figura 3

Esquema representa el diagrama de decisión del RCM



Nota. Esta Figura 3 muestra el diagrama de decisión del RCM. Tomado de: "RCM GATEWAY TO WORLD CLASS MAINTENANCE", 2004

Así mismo la tabla 4 muestra los principales beneficios que se alcanzan con la implementación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), destacándose especialmente los resultados cuantificables relacionados con la mejora en los niveles de disponibilidad de los equipos.

Tabla 4

Explica que la elaboración del RCM permite una reducción significativa de costos, mejora del servicio y calidad.

Costes	Servicio	Calidad	Tiempo	Riesgos
Reducir los niveles y costos del mantenimiento preventivo (10–40%)	Conocer mejor los requerimientos del cliente y del servicio.	Incrementar la disponibilidad de los equipos al optimizar el mantenimiento preventivo y reducir el correctivo.	Disminuir los tiempos de parada programados.	Mejorar la seguridad e integridad del entorno laboral.
Definir directrices y objetivos concretos para reemplazar mantenimientos rutinarios por predictivos	Establecer estándares de calidad de servicio consensuados.	Eliminar fallos crónicos que afectan la producción.	Ampliar los intervalos entre paradas mediante seguimiento predictivo.	Detectar y analizar fallos ocultos para prevenir su repetición.
Reducir los niveles de mantenimiento contratado y sus costos	Minimizar averías con incidencia directa en el servicio.	Fortalecer la cultura de mantenimiento y mejora continua.	Reducir los tiempos de reparación gracias al conocimiento del sistema.	Disminuir la probabilidad de fallas múltiples.
Reducir las paradas productivas mediante reingeniería	Optimizar la comunicación entre mantenimiento y producción.	Documentar y auditar las mejoras implementadas.	Reducir el tiempo medio de reparación (MTTR).	Minimizar los riesgos asociados a tareas rutinarias.

Nota. Este cuadro muestra la importancia aplicación del RCM que mejora costos, servicio y calidad del equipo. Fuente: Elaboración propia con base en Kelly (2006) y Smith (2017).

2.4.4. Análisis de criticidad

Dentro del enfoque del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), el análisis de criticidad constituye una etapa esencial destinada a priorizar los equipos, sistemas o componentes según la magnitud de sus posibles consecuencias ante una falla. Como señalan Geisbush y Ariaratnam (2023), la priorización de modos de falla y sus efectos al interior del RCM permite enfocar los recursos de mantenimiento hacia aquellos activos con mayor impacto potencial en producción, seguridad o ambiente. Posteriormente, esta jerarquización del riesgo facilita la asignación de tareas proactivas de mantenimiento en función de la criticidad del activo, optimizando la toma de decisiones y asegurando la disponibilidad del sistema (Helaly et al., 2010). De esta forma, el análisis de criticidad se convierte en una herramienta estratégica para orientar los esfuerzos de mantenimiento hacia los elementos clave, reduciendo riesgos y pérdidas operativas.

En la siguiente Figura 4 la matriz de criticidad donde se especifican las definiciones de cada sistema.

Figura 4

Modelo Matriz de criticidad.

FRECUENCIA	4	MC	MC	C	C	C
	3	MC	MC	MC	C	C
	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	NC	MC	C
		10	20	30	40	50
		CONSECUENCIA				

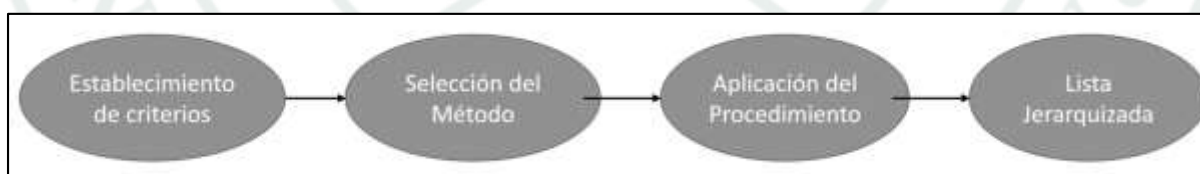
Nota. La Figura representa el Modelo básico de la matriz de criticidad. Tomado de:

“<https://angelmendizabal.com/mantenimiento/ejemplo-practico-para-realizar-un-analisis-de-criticidad/>”.

En la Figura 5 representa el modelo básico de análisis de criticidad que consta de cuatro pasos importantes.

Figura 5

Modelo básico de análisis de criticidad.



Nota. Esta Figura 5 representa el Modelo básico del análisis de criticidad Fuente: Elaboración propia con base en las normas PDVSA.

El análisis de criticidad permite identificar los sistemas, componentes y procesos que tienen mayor impacto sobre la confiabilidad operativa y la seguridad industrial. Este enfoque resulta esencial para priorizar recursos y definir estrategias de mantenimiento efectivas.

En la Tabla 5 se presentan los principales campos de aplicación del análisis de criticidad dentro de una organización industrial, destacando cómo este método contribuye en áreas como

el mantenimiento, la inspección, la gestión de materiales, la disponibilidad de planta y la capacitación del personal.

Tabla 5

Principio campos aplicación del análisis de criticidad

Campo de aplicación del Análisis de Criticidad	Ámbito
Mantenimiento	Al identificar los sistemas más críticos, se facilita la priorización de programas y tareas de mantenimiento predictivo, preventivo, correctivo o de rediseño, optimizando recursos y planificación de órdenes de trabajo.
Inspección	El análisis de criticidad centraliza los esfuerzos de inspección, determinando los equipos y variables que deben ser evaluados (presión, temperatura, espesor, flujo, etc.) y definiendo los intervalos adecuados de revisión.
Materiales	Ayuda a definir decisiones sobre existencias, repuestos y herramientas, optimizando inventarios y reduciendo costos mediante un manejo eficiente del stock.
Disponibilidad de planta	Permite orientar las inversiones en mantenimiento y renovación de sistemas hacia los activos de mayor impacto operativo, mejorando la continuidad y eficiencia de la producción.
Personal	Facilita la capacitación técnica y el crecimiento profesional del personal, enfocando la formación en las áreas críticas para aumentar la productividad y reducir fallas.

Nota. Este cuadro muestra Principio campos aplicación del análisis de criticidad . Fuente: Adaptado de Ariza Rincón, A. J. (2019). *Aplicación de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) a equipos de minería a cielo abierto tomando como piloto la flota taladros de voladura* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander].

Por su parte en la Tabla 6 se describen los pasos esenciales que conforman este proceso, los cuales sirven como guía metodológica para llevar a cabo un estudio de criticidad eficaz dentro de la gestión del mantenimiento industrial.

Tabla 6

Pasos esenciales que conforman proceso de análisis criticidad

N.º	Paso	Descripción parafraseada
1	Identificación de los equipos a estudiar	En esta fase se seleccionan los equipos más relevantes o con mayor impacto en la operación, considerando su función dentro del proceso productivo.
2	Definición del alcance y objetivos del estudio	Se establece el propósito del análisis, determinando los criterios y parámetros que orientarán la priorización de los activos. Este proceso se apoya en la recopilación de información mediante entrevistas o cuestionarios dirigidos al personal técnico y operativo.
3	Selección del personal participante	Se determina el grupo de personas que aportará información clave para el estudio, incluyendo ingenieros, técnicos y operarios involucrados en el mantenimiento o supervisión de los equipos.
4	Recolección y análisis de datos	Se realiza la recopilación sistemática de datos provenientes de encuestas, reportes históricos y registros técnicos, con el fin de evaluar objetivamente los factores que determinan la criticidad de cada activo.

Nota. Pasos esenciales que conforman proceso de análisis criticidad. Tomado de: Adaptado de Ariza Rincón, A. J. (2019). *Aplicación de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) a equipos de minería a cielo abierto tomando como piloto la flota taladros de voladura* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander].

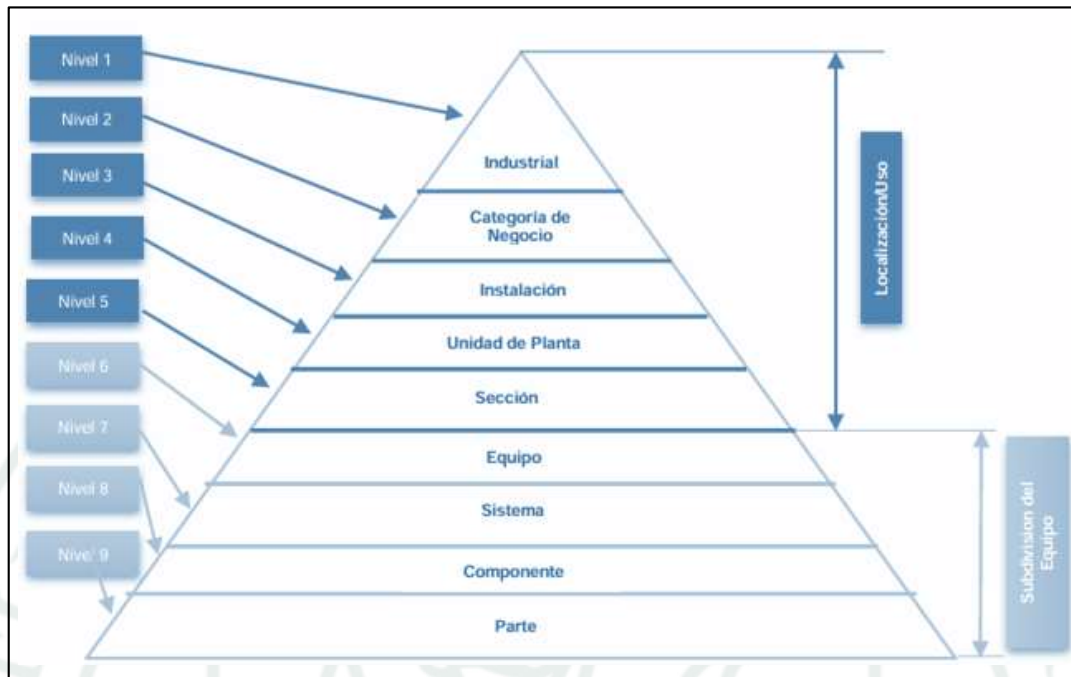
2.4.5 Análisis Taxonómico de los equipos

De acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma ISO 14224, la taxonomía se entiende como un método de clasificación estructurada que organiza los ítems o activos en grupos según características comunes, tales como su ubicación, función o tipo de equipo. Este sistema permite representar la información de manera jerárquica, motivo por el cual también se le conoce como árbol de equipos, dado que muestra las relaciones entre los distintos niveles de un activo dentro de la organización.

El esquema de la Figura 6 ilustra la jerarquía propuesta por la norma ISO 14224 para la definición y estructuración de la taxonomía de los equipos.

Figura 6

Pirámide de Taxonomía



Nota. La Figura representa el Modelo de la pirámide taxonómica. Tomado de: “ISO 1424 industrias de petróleo y gas natural – Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos”

Los niveles del 1 al 5 corresponden a una clasificación general vinculada principalmente con los distintos sectores o tipos de industria, ya que el análisis de confiabilidad se aborda desde una perspectiva integral de la planta.

Por su parte, los niveles del 6 al 9 se asocian directamente con las unidades de equipo y sus respectivas subdivisiones internas. La cantidad de niveles considerados dependerá tanto de la complejidad del sistema o componente como del propósito operativo que cumpla.

La adecuada definición de esta jerarquía resulta fundamental para aplicar de manera efectiva la estrategia de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), garantizando así mayores niveles de disponibilidad, confiabilidad y aprovechamiento de los activos.

2.4.5. Análisis de fallas de los equipos

En el marco del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), el análisis de fallas de los equipos constituye una herramienta esencial para comprender las causas que originan las fallas, sus efectos sobre el sistema y las consecuencias operativas que generan. Este proceso permite identificar los modos de falla que afectan las funciones críticas del activo y establecer estrategias de mantenimiento orientadas a prevenir su recurrencia. Como señalan Moubray (1997) y Smith (2017), el análisis de fallas es la base sobre la cual se construye un

programa de mantenimiento confiable, ya que posibilita determinar las acciones proactivas más adecuadas para mantener la disponibilidad de los equipos.

En el contexto de los molinos de alta presión HPGR, este enfoque cobra especial relevancia, pues su operación continua y las elevadas cargas de trabajo hacen necesario anticipar los modos de falla que podrían comprometer su desempeño. De esta forma, el análisis de fallas dentro del RCM no solo contribuye a reducir el tiempo de inactividad, sino también a optimizar la eficiencia y prolongar la vida útil de los componentes más críticos.

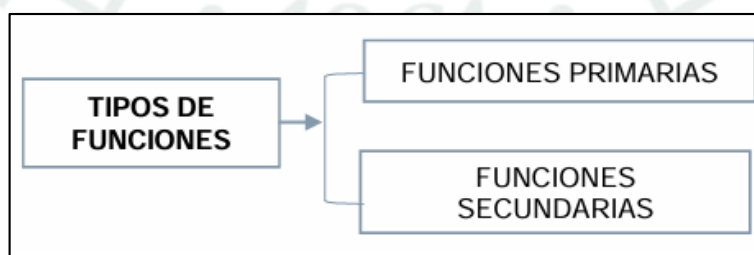
2.4.6. Funciones

Dentro del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), las funciones representan el punto de partida para el análisis del activo, ya que describen qué se espera que haga un equipo y bajo qué condiciones debe cumplir su propósito. Según Moubray (1997), definir correctamente las funciones permite determinar con claridad los estándares de desempeño requeridos, lo que facilita identificar cuándo el equipo deja de operar según lo esperado. De manera complementaria, Smith (2017) sostiene que la función de un activo no solo se refiere a su tarea principal, sino también a los requisitos secundarios vinculados con la seguridad, la eficiencia energética o la calidad del producto. Por su parte, Kelly (2006) explica que la comprensión funcional es esencial para establecer políticas de mantenimiento coherentes con los objetivos de confiabilidad de la organización. En conjunto, estos autores coinciden en que el análisis funcional dentro del RCM constituye la base sobre la cual se construye todo el proceso, ya que permite reconocer las condiciones de éxito del equipo y definir los criterios que determinarán su falla funcional.

Las funciones en los equipos se dividen en dos categorías principales. En la siguiente Figura 7 se exponen los tipos de funciones de un equipo.

Figura 7

Tipos de funciones de un equipo



Nota. La Figura representa un diagrama de tipos de funciones Tomado de: “Mantenimiento basado en la confiabilidad” MOUBRAY, John

En la tabla 7 se muestra un resumen que reúne los principales conceptos y definiciones correspondientes a las funciones primarias y secundarias de los equipos, tal como se detallan a continuación.

Tabla 7

Tabla explica las funciones primarias y secundarias

Tipo de función	Descripción
Función primaria	Se refiere al propósito fundamental por el cual se adquiere un activo físico. Representa la razón principal de su existencia y debe definirse con precisión. En la mayoría de los equipos, las funciones primarias se asocian con parámetros como velocidad, capacidad o volumen, considerando también la calidad del producto obtenido.
Tipos de funciones primarias	Un activo puede poseer una o varias funciones primarias independientes, cada una con criterios de desempeño propios. En ciertos casos, las funciones primarias son interdependientes o están en serie, es decir, el cumplimiento de una depende del correcto funcionamiento de otra.
Funciones secundarias	Son aquellas funciones que complementan o apoyan la función principal del activo. Aunque no constituyen su objetivo principal, son esenciales para su operación segura, eficiente y sostenible. Deben identificarse con claridad para asegurar una gestión de mantenimiento efectiva.
Ecología	Vinculada a las exigencias medioambientales actuales, esta función busca que los activos operen de manera sostenible, reduciendo su impacto ecológico. Dentro del RCM, implica establecer y cumplir normas ambientales relacionadas con el funcionamiento del equipo.
Seguridad	Tiene como propósito asegurar que los equipos no representen riesgos para las personas ni para el entorno. En el análisis RCM, los modos de falla que puedan comprometer la seguridad son evaluados para prevenir incidentes.
Integridad estructural	Incluye funciones que garantizan la capacidad del activo de sostener o proteger otros elementos o subsistemas, manteniendo su estabilidad y confiabilidad.
Control	Hace referencia a las funciones que permiten supervisar, regular o retroalimentar el desempeño del activo. Estas incluyen sensores, indicadores y sistemas de registro que facilitan el monitoreo continuo de las condiciones operativas.
Contención	Representa la capacidad del activo para almacenar o transferir materiales de forma

	segura, como en el caso de bombas, tanques, tuberías o sistemas neumáticos e hidráulicos.
Confort	Relacionada con la reducción de molestias o incomodidades en el entorno laboral. Su objetivo es garantizar condiciones adecuadas de operación para el bienestar de los usuarios.
Economía / Eficiencia	Se orienta a la optimización del uso de recursos en la operación y mantenimiento. Considera factores como costos de energía, mantenimiento y consumo de materiales, buscando la máxima eficiencia.
Funciones superfluas	Engloba aquellos componentes o sistemas que no tienen una función clara, pero que deben mantenerse para evitar que afecten la confiabilidad general del sistema. A pesar de no aportar valor directo, requieren atención en el mantenimiento.
Apariencia	Hace referencia a la función estética o visual del activo, relevante en términos de protección, identificación o cumplimiento de normas de seguridad industrial.
Protección	Incluye las funciones destinadas a resguardar los equipos frente a daños o condiciones adversas, tales como la corrosión, el desgaste o las sobrecargas.

Nota. Esta tabla representa funciones primarias y secundarias Tomado de: “Mantenimiento basado en la confiabilidad” MOUBRAY, John.

2.4.7. Contexto Operacional

Dentro del análisis de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), el término contexto operacional se refiere al conjunto de condiciones reales en las que un activo debe desarrollar sus funciones, incluyendo factores como el entorno físico, el régimen de operación, los requerimientos de producción y los estándares de seguridad vigentes. Según da Silva, Melani, Michalski y de Souza (2023), tener claramente definido este contexto es indispensable para planificar acciones de mantenimiento eficaces, pues permite al analista identificar correctamente las funciones del equipo, los modos de falla pertinentes y las estrategias más adecuadas. En consecuencia, una definición precisa del contexto operativo no solo favorece la coherencia del análisis RCM, sino que fortalece la validez de las decisiones de mantenimiento que de él se desprenden.

2.4.8. Concepto de falla

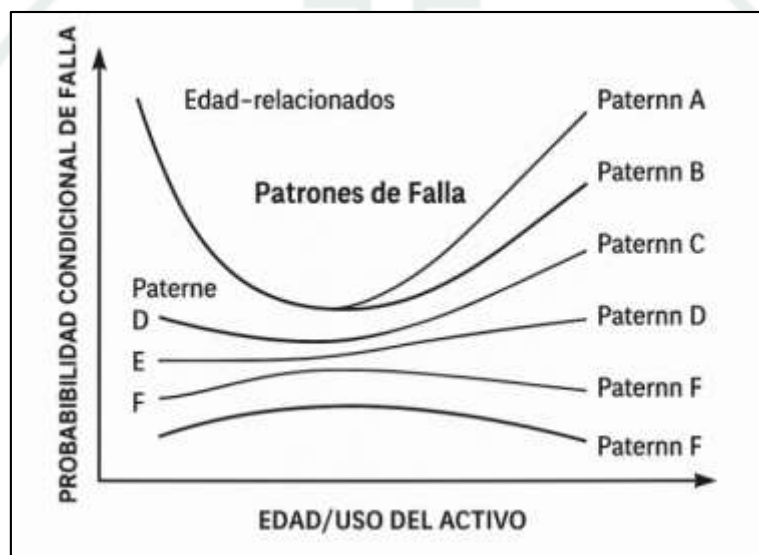
De acuerdo con lo planteado por John Moubray (1997), una falla puede entenderse como la pérdida de la capacidad de un activo para cumplir las funciones que sus usuarios esperan de él. En ese sentido, una falla no solo implica la detención total del equipo, sino cualquier limitación que restrinja su desempeño dentro de los parámetros operativos establecidos. Esta

condición refleja una desviación entre el estado real y el nivel funcional requerido, afectando tanto la productividad como los costos de mantenimiento y gestión. Por lo tanto, puede afirmarse que una falla representa una condición que impide al activo realizar las tareas deseadas, integrando dimensiones técnicas, económicas y administrativas.

En la Figura 8 que se muestra a continuación, el eje horizontal (X) corresponde a la edad del activo, la cual puede expresarse en diferentes unidades según el tipo de operación, como horas de servicio, kilómetros recorridos, ciclos de trabajo o cantidad de unidades procesadas. Por su parte, el eje vertical (Y) representa la probabilidad condicional de falla.

Figura 8

Grafica probabilidad de falla vs según el uso



Nota. La Figura representa gráficamente la probabilidad de falla Fuente: “Mantenimiento basado en la confiabilidad” MOUBRAY, John

2.4.8.1 Fallas Potencial

Dentro de la metodología del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), las fallas potenciales se definen como las condiciones o eventos que podrían conducir a la pérdida parcial o total de la función de un activo si no se detectan o corrigen a tiempo. Comprender y documentar estas fallas resulta esencial para anticipar problemas antes de que se transformen en fallas funcionales, fortaleciendo la prevención y la gestión del riesgo operativo.

Según SAE International (1999), las fallas potenciales representan el punto inicial del análisis RCM, pues permiten identificar las causas y mecanismos que, de no ser controlados, derivarían en la pérdida de confiabilidad de un sistema. En esa misma línea, Moubray (1997)

sostiene que la detección temprana de fallas potenciales posibilita la aplicación de tareas proactivas, optimizando los intervalos de mantenimiento y reduciendo los costos de intervención. Asimismo, la norma ISO 14224 (2006) resalta la importancia de clasificar los modos de falla con base en datos históricos y taxonomías estandarizadas, lo cual facilita el análisis comparativo entre activos y contribuye a una gestión más eficaz del mantenimiento.

En consecuencia, la identificación sistemática de fallas potenciales constituye la base de cualquier estrategia RCM efectiva. Su documentación rigurosa permite establecer relaciones claras entre función, modo de falla, efecto y consecuencia, generando así un marco de decisiones técnicas que incrementa la disponibilidad de los equipos y reduce la probabilidad de fallas inesperadas.

La Figura 9 representa la relación entre la edad del activo y la probabilidad condicional de falla. En esta gráfica se observa que, durante la etapa inicial de operación, la probabilidad de falla tiende a ser alta debido a posibles defectos de fabricación, errores de instalación o deficiencias en la puesta en marcha; esta fase se conoce como mortalidad infantil. A medida que el equipo entra en su periodo de vida útil, la probabilidad de falla se mantiene relativamente constante, reflejando un funcionamiento estable bajo condiciones normales de operación y mantenimiento. Finalmente, en la fase de desgaste, la probabilidad de falla aumenta progresivamente como consecuencia del deterioro natural de los componentes. Este comportamiento evidencia la importancia de aplicar estrategias de mantenimiento basadas en la confiabilidad, como el RCM, que permitan anticipar fallas y extender la vida útil de los activos (Moubray, 1997; Jardine & Tsang, 2013).

Figura 9

Gráfica probabilidad condicional de falla



Nota. La Figura representa un diagrama de tipos de funciones Tomado de: [“https://inspenet.com/articulo/importancia-patrones-de-falla-rcm/”](https://inspenet.com/articulo/importancia-patrones-de-falla-rcm/)

2.4.8.2 Falla Funcional

En el marco del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), se entiende por falla funcional el estado en que un activo ya no logra cumplir con las funciones que se esperaban de él en su contexto operativo. Por ejemplo, cuando una máquina funciona pero su rendimiento está por debajo del estándar requerido, se considera que ha ocurrido una falla funcional (Eptura, 2022). Este concepto difiere de una falla absoluta, ya que no implica necesariamente la detención completa del equipo, sino que puede manifestarse como una disminución del rendimiento, una interrupción parcial de la función o una desviación de la calidad esperada.

Así, una falla funcional representa la brecha entre lo que el usuario necesita que el activo haga y lo que realmente está haciendo. Reconocer esta brecha es de vital importancia, pues permite al analista de RCM identificar correctamente los modos de falla, priorizar las tareas de mantenimiento y diseñar planes que restauren la capacidad del equipo para cumplir su propósito. La falla funcional puede entenderse como la condición en la que un activo físico pierde la capacidad de desempeñar una o más de sus funciones dentro de los límites de rendimiento que el usuario considera aceptables. De acuerdo con los principios del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), este tipo de falla puede manifestarse tanto como una pérdida total de la función como una desviación significativa del comportamiento esperado. En otras palabras, una falla funcional representa el estado en el que un recurso deja de cumplir con los parámetros operativos establecidos, evidenciando una incapacidad para mantener el nivel de desempeño requerido.

Cuando se produce una falla funcional, el enfoque del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) cambia, ya que el interés no se centra únicamente en lo que los usuarios esperan del equipo, sino en comprender las causas que impiden que dichas expectativas se cumplan. Las fallas pueden identificarse únicamente después de haber establecido con claridad las funciones del activo y los parámetros de desempeño bajo los cuales debe operar. De este modo, es posible determinar que una misma función puede presentar diversos tipos de fallas funcionales, las cuales deben ser documentadas y analizadas de manera sistemática para garantizar una gestión de mantenimiento más efectiva.

2.4.8.3 Análisis de Modos de Falla y sus defectos

Una vez que se han determinado las fallas funcionales de un activo, el paso siguiente dentro del proceso del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) consiste en identificar los eventos específicos que originan dichos estados de falla. A estos se les denomina

modos de falla, y corresponden a las causas o mecanismos que provocan la pérdida de una función determinada. En términos generales, un modo de falla puede entenderse como cualquier suceso o condición que conlleve al incumplimiento del desempeño esperado por parte de un componente, sistema o proceso.

De esta manera, el modo de falla se reconoce como el origen directo de una falla funcional, afectando negativamente la función que se busca conservar mediante la aplicación del RCM. Para su descripción, se recomienda emplear una redacción breve y precisa, compuesta por un verbo y un sustantivo que expresen claramente el tipo de evento, evitando términos genéricos o poco específicos como “rotura”, “falla” o “mal funcionamiento”.

2.4.8.4 Análisis de las consecuencias de falla

Las consecuencias de las fallas se entienden como la descripción del impacto que tiene la ocurrencia de una falla, tanto en su magnitud como en su relevancia dentro del sistema. Cuando se logra disminuir la frecuencia o la severidad de los efectos asociados a una falla, también se reduce la magnitud de sus consecuencias. En un entorno industrial, es común identificar miles de modos de falla durante un análisis detallado, cada uno con efectos distintos que pueden influir en la operación del proceso, la calidad del producto, la atención al cliente, la seguridad del personal o el medio ambiente.

Una de las principales fortalezas del enfoque del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) radica en que prioriza la evaluación de las consecuencias por encima de las características puramente técnicas de la falla. Por esta razón, el RCM clasifica dichas consecuencias en cuatro categorías fundamentales, las cuales permiten orientar las acciones de mantenimiento de acuerdo con su impacto real sobre el sistema.

2.4.9. Tareas Preventivas

En la metodología RCM, las tareas preventivas consisten en intervenciones sistemáticas, planificadas y programadas con el objetivo de evitar que un activo experimente fallas funcionales antes de que estas ocurran. Según Ishak, Hotmauli y Prajadhiana (2024), la elaboración de un programa de mantenimiento preventivo implica determinar los componentes críticos mediante análisis de modos y efectos de falla (FMEA), establecer intervalos de intervención basados en datos históricos y operativos, y efectuar acciones de limpieza, ajuste, reemplazo o inspección antes de que se registre un desempeño inaceptable. En esencia, tales tareas permiten anticipar el desgaste o deterioro de los equipos y sostener su eficiencia indicada,

con lo cual se elevan los niveles de disponibilidad, se minimizan los costos de reparación y se reduce el riesgo de fallas inesperadas.

Smith (2017) resalta que la prevención no se limita a sustituir piezas, sino a garantizar que las condiciones operativas del activo se mantengan dentro de los límites de diseño, evitando así degradaciones progresivas. En el caso de equipos críticos como los molinos de alta presión HPGR, las tareas preventivas son fundamentales para mitigar el desgaste de los rodillos, optimizar la eficiencia energética y extender la vida útil de los componentes principales.

2.4.10. Tareas Predictivas

Las tareas predictivas dentro del RCM consisten en intervenciones que se planifican basándose no solo en intervalos de tiempo o ciclos de uso, sino en el monitoreo profundo del estado real del activo, identificando signos tempranos de degradación antes de que se presente una falla funcional. Como señalan Macêdo et al. (2023), estas tareas derivan de modelos de mantenimiento centrados en la condición del equipo que emplean datos históricos, mediciones de campo y análisis predictivos para estimar cuándo es necesario intervenir. Esta aproximación permite optimizar la eficiencia, minimizar reparaciones innecesarias y elevar la disponibilidad de los sistemas al anticiparse a las fallas.

Según Smith (2017), el mantenimiento predictivo forma parte esencial del RCM, ya que proporciona información precisa sobre el momento óptimo para intervenir un activo, evitando intervenciones innecesarias y reduciendo costos. En los HPGR, la aplicación de métodos predictivos como el seguimiento del desgaste de los rodillos o el control de temperatura en los sistemas hidráulicos permite identificar.

En la Figura 10 muestra un esquema representativo de las condiciones monitoreables en un sistema HPGR, las cuales son fundamentales para la ejecución de tareas predictivas dentro de un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad. En esta imagen se aprecia el conjunto principal del molino de rodillos de alta presión, acompañado por íconos que simbolizan las variables críticas que deben ser controladas de manera continua para garantizar su correcto funcionamiento.

Entre las principales condiciones monitoreadas se encuentran:

Vibración, empleada para detectar desbalanceos, desalineaciones o defectos en los rodamientos.

Lubricación, que permite verificar la calidad y presión del aceite en los sistemas hidráulicos y reductores.

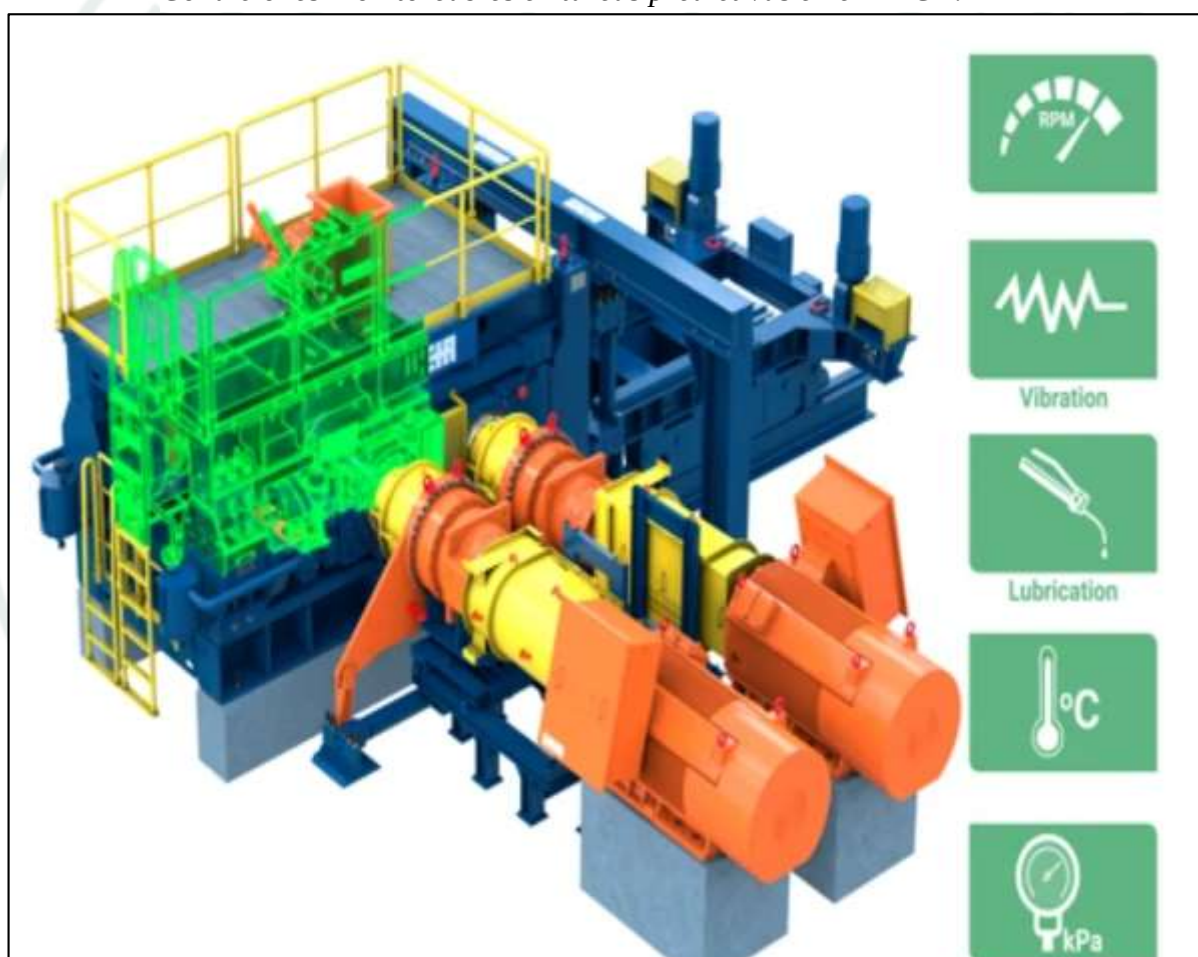
Temperatura, que ayuda a identificar sobrecalentamientos en los rodamientos, motores y componentes eléctricos.

Presión, asociada al sistema hidráulico de los rodillos, la cual se controla para mantener la fuerza de compresión óptima sobre el mineral.

El seguimiento de estas variables permite anticipar posibles fallas, optimizar los intervalos de mantenimiento y extender la vida útil de los componentes críticos del HPGR, contribuyendo así a una operación más segura, eficiente y rentable (Metso Outotec, 2020; Weir Minerals, 2021).

Figura 10

Condiciones Monitoréables en tareas predictivas en el HPGR.



Nota. La Figura representa los valores a monitorear en tareas predictivas del HPGR. Tomado de: <https://www.global.weir/services/digital-services/NEXT-intelligent-solutions/NEXT-hpgr/>.

2.4.11. Tareas de búsqueda de fallas

Las tareas de búsqueda de fallas tienen como propósito identificar fallas ocultas o latentes que no presentan evidencia visible durante la operación normal del sistema. Estas fallas

suelen encontrarse en equipos de protección o control, donde una disfunción no detectada podría generar consecuencias graves.

Según da Silva y colaboradores (2023), las tareas que se orientan a la detección de fallas latentes —aquellas que no presentan síntomas visibles durante la operación— son fundamentales dentro del proceso de Reliability-Centered Maintenance (RCM), ya que actúan como salvaguardas para componentes críticos que podrían fallar sin aviso previo. Asimismo, Pérez y Martínez (2021) señalan que la periodicidad con que se ejecutan estas tareas debe calibrarse cuidadosamente, procurando un equilibrio entre el riesgo de una falla no detectada y los costos de inspección. En conjunto, la aplicación rigurosa de tareas de búsqueda de fallas fortalece la seguridad operativa y contribuye a prevenir interrupciones de carácter grave en la operación.

2.4.12. Diagrama de decisión RCM

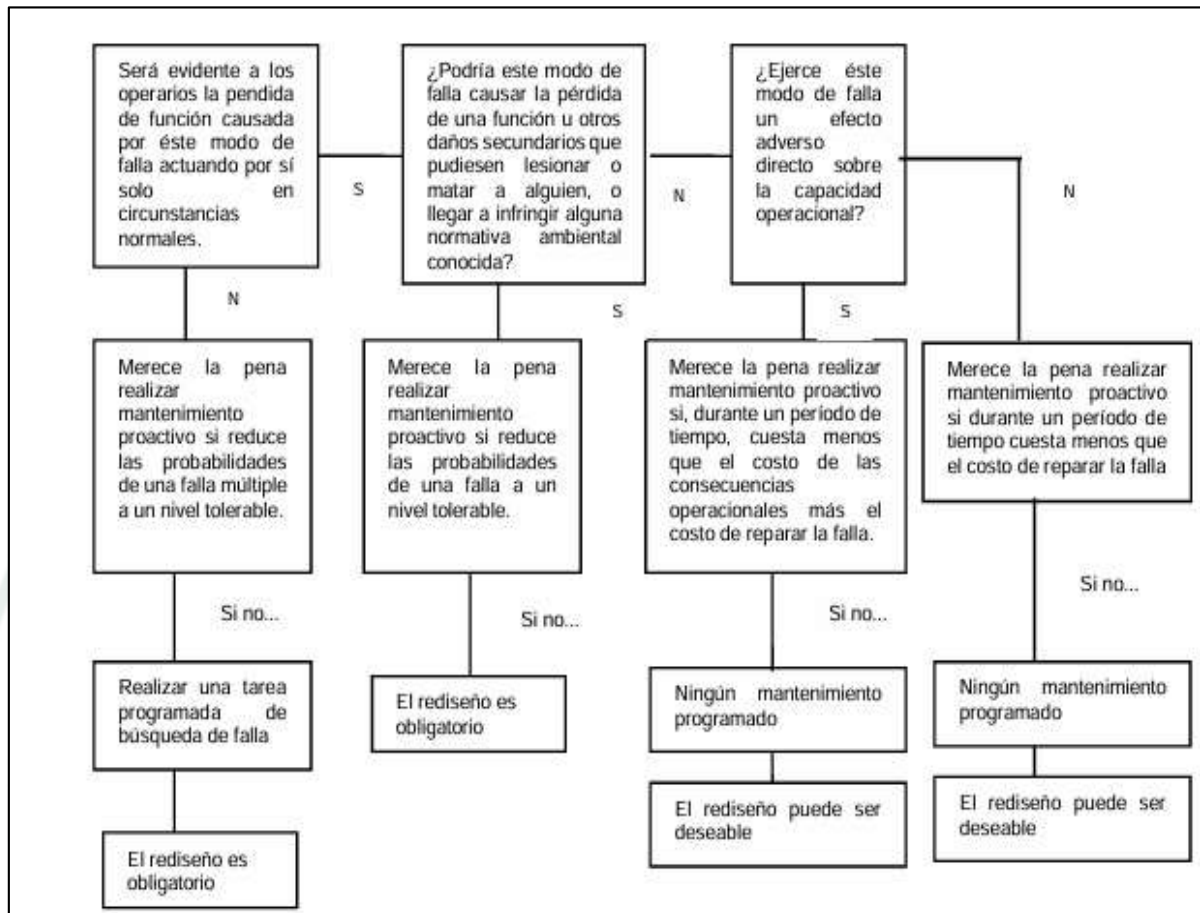
El diagrama de decisión RCM funciona como una herramienta lógica que guía a los analistas del mantenimiento a través de una secuencia estructurada de interrogantes que permiten determinar la estrategia de mantenimiento más adecuada frente a cada modo de falla identificado. Como señalan los recursos especializados en RCM, esta lógica de decisión toma en cuenta factores como si la falla es visible u oculta, si su impacto involucra seguridad, medio ambiente u operación, y si existe una acción proactiva viable para anticiparla (Relyence, 2016).

Del mismo modo, los “Guidance Notes on Reliability-Centered Maintenance” (American Bureau of Shipping, 2018) explican que el árbol de decisiones se convierte en el mecanismo central para clasificar cada modo de falla según su criticidad y seleccionar tareas como mantenimiento preventivo, monitoreo de condición, rediseño o incluso permitir el desgaste hasta fallo cuando la consecuencia es tolerable. En suma, el diagrama de decisión RCM permite estructurar de forma sistemática las intervenciones de mantenimiento, priorizando aquellas que aportan mayor valor para la disponibilidad y seguridad del activo.

En la siguiente Figura 11 se describe el diagrama de evaluación de las consecuencias de falla

Figura 11

Diagrama de la evaluación de las consecuencias de falla



Nota. La Figura representa un diagrama de tipos de funciones. Tomado de: “Mantenimiento centrado en la confiabilidad” MOUBRAY, John.

2.4.13. Beneficios del Mantenimiento basado en la confiabilidad

El Mantenimiento Basado en la Confiabilidad (RCM) constituye un enfoque integral que orienta la gestión del mantenimiento hacia la preservación de las funciones esenciales de los activos, priorizando las acciones que garantizan la disponibilidad y seguridad operativa. De acuerdo con Moubray (1997), el RCM permite identificar los modos de falla más críticos y diseñar estrategias específicas para prevenir o mitigar sus consecuencias, incrementando así la eficiencia del sistema productivo. Smith (2017) complementa señalando que la aplicación del RCM contribuye a optimizar el uso de los recursos técnicos y humanos, reduciendo costos y evitando intervenciones innecesarias mediante un enfoque planificado y proactivo.

La implementación de un programa de RCM proporciona numerosas ventajas al centrar los esfuerzos de mantenimiento en los activos que tienen mayor impacto en la producción, la seguridad y los costes operativos. Según la plataforma Prometheus Group (2024), adoptar este

enfoque permite “mejorar la fiabilidad del equipo, reducir los costes de mantenimiento y minimizar los tiempos de parada no planificados” mediante estrategias basadas en datos reales de funcionamiento y modos de fallo. Complementariamente, un estudio de revisión académica en el sector manufacturero evidencia que los programas de RCM bien ejecutados han logrado una reducción significativa de los periodos de inactividad, una mejora notable en la disponibilidad de los equipos y una disminución considerable de los costes de ciclo de vida del activo (Uzoigwe, 2024). En conjunto, estas evidencias indican que el mantenimiento centrado en la confiabilidad transforma la actividad de mantenimiento de una función de soporte a un motor estratégico que aporta valor sustancial a la organización.

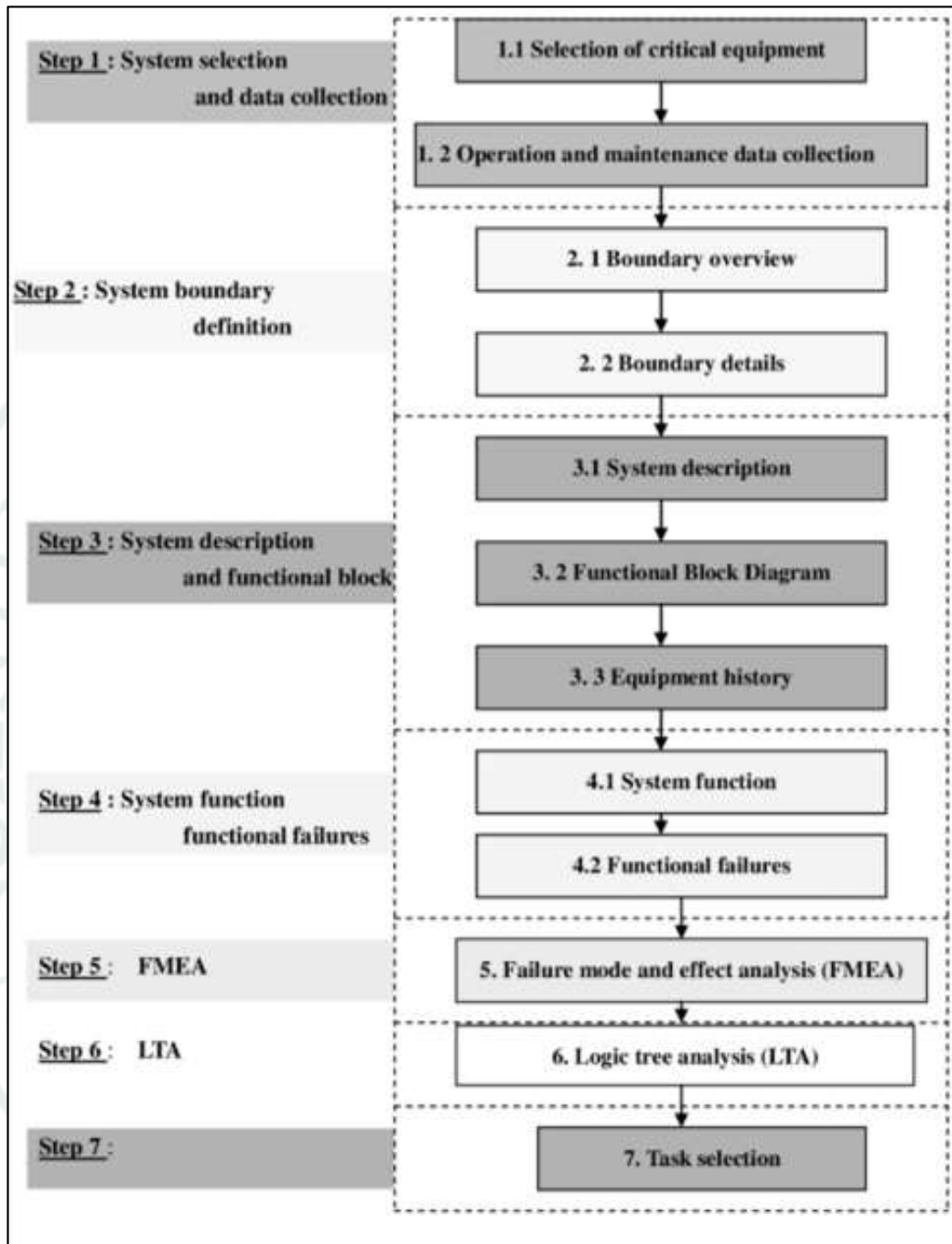
En el caso particular de los molinos de alta presión HPGR, la implementación del RCM aporta beneficios significativos tanto en la operación en planta como en las actividades de reparación. Este enfoque posibilita identificar los componentes de mayor desgaste como los rodillos, sellos y sistemas hidráulicos y establecer procedimientos estandarizados para su desmontaje, inspección y montaje, reduciendo los tiempos de reparación y mejorando la trazabilidad de las intervenciones. Además, la aplicación de metodologías RCM permite planificar de manera anticipada la reposición de piezas, el uso de herramientas especializadas y la coordinación del personal técnico, lo que se traduce en una mayor disponibilidad del equipo y una reducción del tiempo total de parada.

Kelly (2006) resalta que los beneficios del RCM no se limitan únicamente a la confiabilidad técnica, sino que también fortalecen la gestión estratégica del mantenimiento al promover la mejora continua, la estandarización de procesos y la sostenibilidad operativa. En consecuencia, la aplicación del mantenimiento basado en la confiabilidad en los HPGR tanto en planta como en el taller contribuye a consolidar un sistema de mantenimiento más eficiente, seguro y alineado con los objetivos de productividad de la organización de datos.

En la Figura 12 se muestra el diagrama de los principales pasos del RCM

Figura 12

Diagrama de los principales pasos del RCM



Nota. La Figura representa un diagrama donde se expone pasos del RCM. Tomado de : https://www.researchgate.net/figure/Main-steps-of-the-RCM_fig2_267807133

2.5. Concepto Lean Maintenance

El mantenimiento basado en el enfoque “lean” lleva los principios de la filosofía lean al ámbito del mantenimiento: busca sostener las funciones del activo con el mínimo desperdicio

(tiempos muertos, esperas, movimientos, reprocesos y exceso de inventario), estandarizando procesos y apoyándose en datos.

Smith define el enfoque como “hacer más con menos” también en mantenimiento, mediante estandarización, visual management y alineación con la demanda interna; su obra sistematiza el uso de indicadores y prácticas lean aplicadas a mantenimiento.

En síntesis, Lean Maintenance es un sistema socio-técnico que integra personas, proceso y datos para eliminar desperdicios del flujo de mantenimiento y conservar la confiabilidad con el menor costo de ciclo de vida.

2.5.1. Contexto histórico de Lean Maintenance

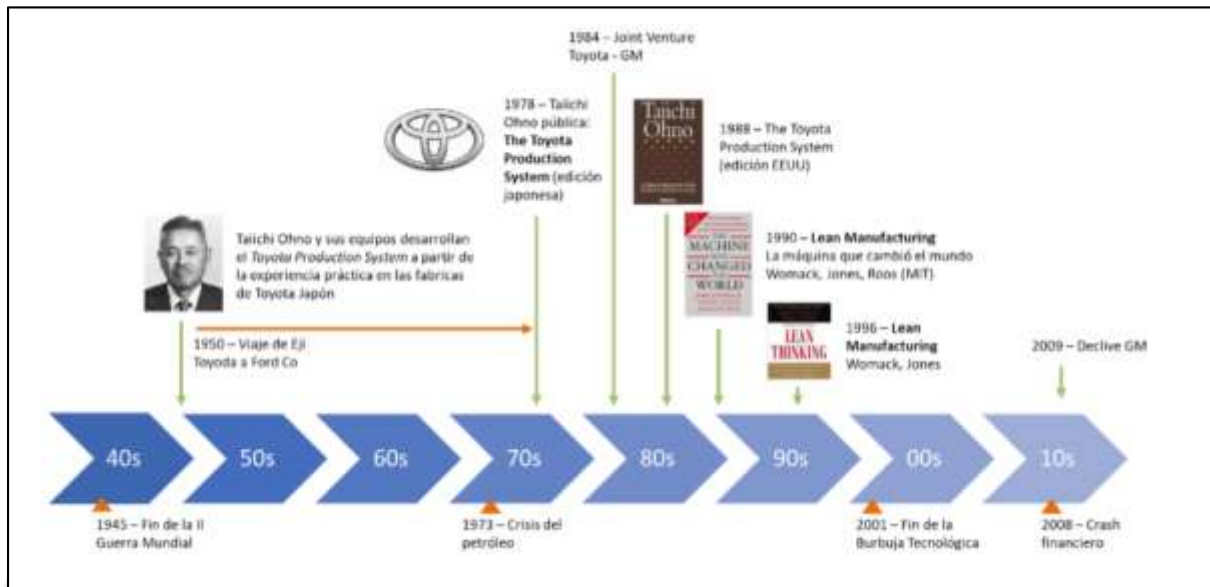
El origen del Lean Maintenance se remonta al desarrollo del Sistema de Producción de Toyota (TPS), el cual sentó las bases de la filosofía lean moderna. Su enfoque, centrado en la eliminación de desperdicios y la mejora continua, se extendió progresivamente hacia áreas de soporte como el mantenimiento, al identificarse que los equipos productivos solo pueden operar bajo principios lean si los procesos de mantenimiento garantizan confiabilidad y disponibilidad constantes.

De acuerdo con Womack y Jones (2003), el pensamiento lean evolucionó a partir de la observación de prácticas japonesas que priorizaban la simplicidad, la estandarización y la participación de todos los trabajadores en la resolución de problemas. Con el tiempo, estas ideas se adaptaron al mantenimiento industrial, originando el concepto de Lean Maintenance como una fusión entre las metodologías Lean Thinking y Total Productive Maintenance (TPM).

En este contexto, autores como Paniagua (2024) destacan que el Lean Maintenance nace de la necesidad de vincular la eficiencia operativa con la gestión técnica del mantenimiento, asegurando que cada acción —ya sea correctiva, preventiva o predictiva— contribuya directamente al valor del proceso productivo. En el caso de los molinos de alta presión (HPGR), esta evolución puede permitir diseñar rutinas más ágiles de inspección y reemplazo de componentes críticos, optimizando recursos y reduciendo tiempos de reparación.

Figura 13

Historia sobre Lean



Nota. La Figura muestra una breve representación de la historia de LEAN. Tomado de: “<https://www.linkedin.com/pulse/una-breve-historia-sobre-lean-leonor-leal/>”

2.5.2. Principios y filosofía del Lean Maintenance

El Lean Maintenance se sustenta en los cinco principios del pensamiento lean: definir valor, mapear la cadena de valor, crear flujo, operar bajo demanda (pull) y buscar la perfección. Estos principios se aplican al mantenimiento como una forma de priorizar tareas que realmente agreguen valor al cliente interno —en este caso, el área de producción— y eliminar todo tipo de actividad que no contribuya a la disponibilidad del activo.

Según Paniagua (2024), esta filosofía parte de la premisa de que el mantenimiento debe considerarse un proceso estratégico, no un gasto operativo, y debe orientarse a garantizar equipos confiables, personal motivado y sistemas de gestión visual que faciliten la mejora continua. Del mismo modo, Womack y Jones (2003) enfatizan que la perfección en lean no se alcanza eliminando fallas, sino entendiendo y controlando las causas raíz que las originan.

Aplicado a los HPGR, estos principios implican diseñar flujos de trabajo eficientes para el desmontaje y revisión de los rodillos, mantener ordenadas las áreas en planta con 5S, y estandarizar procedimientos de montaje y prueba. De esta manera, las filosofías lean no solo mejora la productividad del mantenimiento, sino que también fortalece la seguridad y la calidad operativa.

En la Figura 14 representa los cinco principios fundamentales de la filosofía Lean, los cuales orientan la mejora continua y la eliminación de desperdicios dentro de los procesos industriales.

El primer principio, identificar lo que genera valor al cliente, busca reconocer qué actividades o características del producto aportan utilidad real desde la perspectiva del usuario final.

El segundo principio, mapear la cadena de valor, consiste en analizar y visualizar todas las etapas del proceso, diferenciando las que agregan valor de aquellas que generan desperdicio.

El tercer principio, generar flujo de valor eliminando desperdicios, se enfoca en optimizar las operaciones para que el trabajo avance de manera continua, reduciendo tiempos muertos y retrabajos.

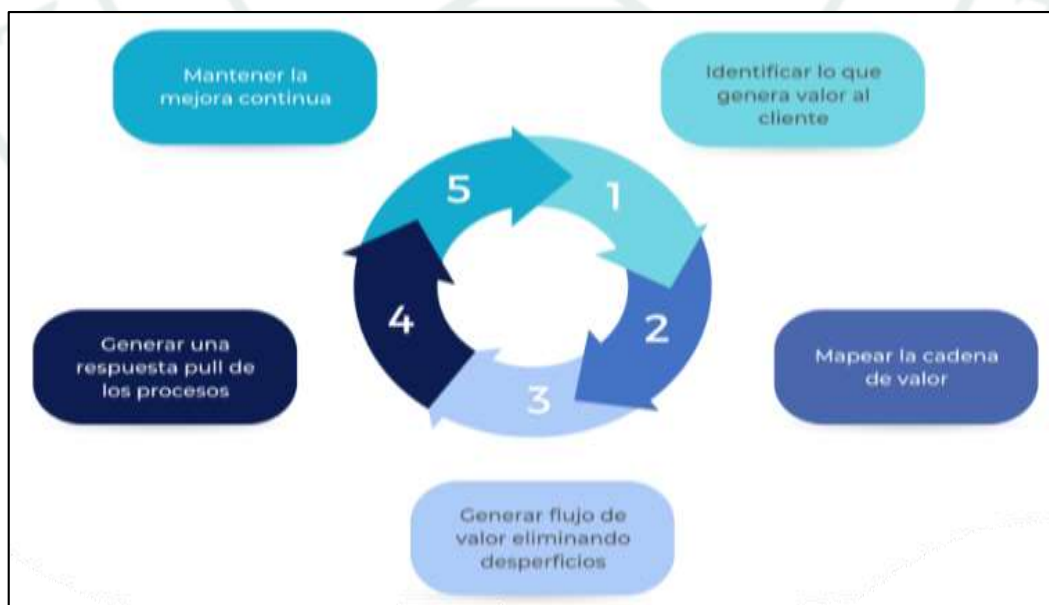
El cuarto principio, establecer un sistema Pull de producción, promueve que las actividades se ejecuten en función de la demanda real del cliente, evitando sobreproducción e inventarios innecesarios.

Finalmente, el quinto principio, mantener la mejora continua (Kaizen), asegura que la organización mantenga un proceso constante de revisión, aprendizaje y perfeccionamiento.

Estos principios, aplicados al mantenimiento industrial, permiten optimizar recursos, mejorar la confiabilidad de los equipos y fortalecer la cultura organizacional hacia la eficiencia (Womack & Jones, 2003; Paniagua, 2019).

Figura 14

Los 5 principios Lean



Nota. La Figura muestra el ciclo de los 5 principios Lean. Tomado de: “<https://www.linkedin.com/pulse/una-breve-historia-sobre-lean-leonor-leal/>”

2.5.3. Técnicas Lean Maintenance

Las principales técnicas asociadas al Lean Maintenance integran herramientas de gestión visual, organización y mejora continua. Entre ellas destacan 5S, kaizen, poka-yoke, SMED, y VSM (Value Stream Mapping). Cada una contribuye a identificar y eliminar desperdicios dentro del flujo de mantenimiento, ya sea en la búsqueda de herramientas, la espera de repuestos o los traslados innecesarios de personal.

Smith (2004) explica que aplicar estas técnicas permite reducir tiempos improductivos y aumentar la disponibilidad de los equipos, al estructurar intervenciones más cortas y efectivas. Por su parte, Mostafa (2015) sostiene que el Lean Maintenance funciona mejor cuando las técnicas se adaptan al tipo de planta y se combinan con análisis de confiabilidad y monitoreo de condición.

En el entorno de los HPGR, estas herramientas facilitan la estandarización de procedimientos repetitivos, como el cambio de rodillos o sellos, asegurando limpieza, orden y trazabilidad. Con ello, se reducen riesgos de errores humanos y se promueve una cultura de mejora continúa orientada a la eficiencia y seguridad operativa

En la siguiente tabla explica las técnicas relacionadas a la metodología Lean

Tabla 8

Técnicas del Lean

Técnica	Descripción	Objetivo principal	Aplicación en mantenimiento
5S	Metodología japonesa que promueve la organización y limpieza del entorno laboral en cinco pasos: clasificar, ordenar, limpiar, estandarizar y mantener.	Crear un entorno de trabajo ordenado, seguro y eficiente.	Aplicada en talleres para mantener el orden, limpieza y correcta ubicación de herramientas.
Kaizen	Filosofía enfocada en la mejora continua mediante pequeñas acciones progresivas que involucran a todo el personal.	Fomentar la participación activa y el compromiso del personal en la mejora continua.	Se usa para proponer mejoras en procedimientos y rutinas de mantenimiento preventivo.
Poka-Yoke	Sistema preventivo que evita errores humanos mediante controles visuales o físicos que garantizan la correcta ejecución de tareas.	Reducir la ocurrencia de errores y aumentar la calidad del trabajo realizado.	Implementada en inspecciones y montajes para prevenir errores en ensamblajes o conexiones.

SMED	Método orientado a reducir el tiempo de cambio o preparación de herramientas, aumentando la productividad y la disponibilidad de los equipos.	Optimizar los tiempos de intervención y mejorar la eficiencia operativa.	Utilizada en paradas de planta o cambios de piezas para disminuir los tiempos improductivos.
VSM	Mapa del flujo de valor que permite identificar actividades que agregan y no agregan valor, optimizando procesos y eliminando desperdicios.	Analizar el proceso para eliminar pasos innecesarios y aumentar la eficiencia global.	Sirve para mapear y optimizar el flujo de órdenes de trabajo, identificando retrasos o desperdicios.

Nota. Esta tabla representa las diferentes estrategias que existen dentro de la metodología Lean

2.5.4. Herramientas y metodología del Lean Maintenance

El mantenimiento basado en filosofía lean no sólo adopta valores, sino que se apoya en un conjunto definido de herramientas metodológicas que permiten que los principios operen en el taller y en la planta de mantenimiento. En esta vía, el enfoque considerara tanto el flujo de las órdenes de mantenimiento como la gestión del almacén, el personal técnico y los sistemas de monitoreo de condición.

Según Paniagua Gómez-Álvarez (2024), la metodología lean contempla fases que van desde el diagnóstico del estado actual mediante mapeo del flujo de valor, hasta la estandarización de procedimientos y su control continuo mediante indicadores visuales y tablero de gestión. El autor destaca que solo con estas fases estructuradas se logra que la metodología deje de ser un conjunto de herramientas aisladas y se convierta en un sistema integrado de mejora del mantenimiento.

Según Jasiulewicz-Kaczmarek y Saniuk (2018), la implementación del Lean Maintenance requiere identificar primero los desperdicios relacionados con el mantenimiento (tiempos de espera, transporte, defectos, inventario excesivo, etc.), y luego aplicar herramientas como 5S, VSM (mapeo del flujo de valor de mantenimiento), SMED (reducción de tiempos de cambio) y Kanban para sincronizar repuestos, personal y equipos. Los autores encontraron que muchas organizaciones aun tienen una brecha entre la aplicación de principios lean en producción y en mantenimiento, lo que limita la mejora del rendimiento de los activos.

En el contexto de los molinos de alta presión (HPGR) y su taller de reparación, estas herramientas cobran especial importancia: implementar 5S en el área de desmontaje de rodillos, aplicar VSM (Mapa del flujo de valor) para mapear cada paso desde la orden hasta el cierre de trabajo, y estandarizar la gestión visual de piezas críticas permiten reducir los tiempos de

intervención, minimizar errores humanos y garantizar trazabilidad de cada trabajo. De esta forma, la metodología del Lean Maintenance transforma el taller de mantenimiento en un flujo ágil, transparente y centrado en la disponibilidad del equipo.

2.5.5. El enfoque del Lean Maintenance

El mantenimiento orientado por la filosofía lea exige el uso sistemático de herramientas y métodos que transforman los procesos de mantenimiento tradicionales en flujos eficientes y visuales, asegurando que cada intervención contribuya al valor del negocio.

Según la investigación de Fernandes, Rodrigues y Lapasini (2024), la aplicación de una metodología de Lean Maintenance en empresas de infraestructura incluyó la utilización de mapas de flujo de órdenes, la identificación de ocho tipos de desperdicios en mantenimiento y la implantación de herramientas como 5S, VSM y visual management, lo cual permitió una mejora en tiempo real del flujo de trabajo y una reducción de la interrupción del servicio.

En el contexto del mantenimiento de los molinos de alta presión (HPGR) y las actividades, esta metodología se traduce en mapear la secuencia desde la orden de trabajo hasta la liberación post-montaje, aplicar 5S para optimizar el área de rodillos, visualizar el estado de piezas críticas y reducir las esperas innecesarias de repuestos. Al hacerlo, se logra convertir el proceso de mantenimiento en un sistema de trabajo fluido, predecible y estandarizado, alineado con los objetivos de confiabilidad y disponibilidad del activo.

2.5.6. Aplicaciones del Lean Maintenance

El Lean Maintenance se aplica en entornos industriales con el propósito de eliminar desperdicios en los procesos de mantenimiento, optimizar los recursos disponibles y maximizar el valor generado para la organización. Su aplicación abarca desde la planificación de tareas preventivas y predictivas hasta la gestión de inventarios, el control de costos y la mejora continua del desempeño operativo.

Según Paniagua Gómez y Álvarez (2019), la filosofía Lean aplicada al mantenimiento busca integrar al personal técnico, los equipos y los procesos en un sistema coordinado, orientado a la eficiencia y la reducción de pérdidas. De igual modo, Ruiz y Cárdenas (2020) explican que su implementación permite identificar actividades sin valor agregado, como tiempos de espera, movimientos innecesarios o sobreprocesos en los trabajos de mantenimiento, logrando una mayor disponibilidad de los activos críticos.

En la práctica, el Lean Maintenance se aplica mediante herramientas como las 5S, el kaizen, el poka-yoke y el Value Stream Mapping (VSM), que facilitan la identificación de

cuellos de botella, mejoran el flujo de trabajo y fomentan la participación activa del personal. Su implementación ha demostrado generar beneficios tangibles, como la reducción de costos, la mejora de la productividad y un aumento en la confiabilidad de los equipos industriales (Hernández & García, 2021). En el ámbito del mantenimiento de molinos de alta presión (HPGR) y sus talleres de reparación, estas aplicaciones se traducen en la selección de áreas piloto donde se implementa 5S y SMED en el desmontaje de rodillos, la reordenación del flujo de trabajo de repuestos críticos mediante Kanban, y la integración de órdenes de trabajo a través de tablero visual en planta-taller. Este conjunto de mejoras permite reducir el tiempo de parada, aumentar la disponibilidad del equipo y fortalecer la trazabilidad de cada intervención.

2.5.7. Planificación del Proyecto Lean Maintenance

La planificación de un proyecto Lean Maintenance constituye una fase crítica en la implementación de esta metodología, ya que permite definir los objetivos, recursos, indicadores de desempeño y responsabilidades del equipo de trabajo. Según Fernández y López (2021), una planificación efectiva debe partir del análisis del estado actual del mantenimiento, identificando las áreas con mayores oportunidades de mejora y estableciendo metas medibles en términos de disponibilidad, tiempo de respuesta y reducción de costos.

Además, Paniagua Gómez y Álvarez (2019) señalan que la planificación debe estar alineada con los principios de la mejora continua, promoviendo la participación del personal operativo y fomentando una cultura organizacional basada en la prevención y la eficiencia. En este sentido, el uso de herramientas Lean como el Value Stream Mapping y el A3 Thinking resulta fundamental para visualizar los procesos, detectar desperdicios y priorizar acciones de mejora.

Finalmente, la planificación del proyecto Lean Maintenance no se limita a la ejecución de tareas, sino que implica un enfoque sistemático de evaluación constante, que asegure la sostenibilidad de los resultados y el aprendizaje organizacional a largo plazo (Jiménez & Soto, 2020).

2.5.8. El entorno Lean y la Calidad

En un entorno donde se aplica filosofía lean, la calidad no es un añadido posterior, sino una propiedad integradora del sistema de producción —lo cual exige que los procesos de mantenimiento estén diseñados para prevenir defectos antes de que ocurran, asegurando que los activos funcionen conforme a los estándares de producción y cliente.

De acuerdo con el análisis de la plataforma I-Dcon (2013), al aplicar mantenimiento lean, las actividades no solo se orientan a reducir tiempos y costos, sino que se incorporan

criterios de calidad operacional, como minimizar retrabajos, asegurar que cada tarea de mantenimiento contribuya a la confiabilidad del equipo y eliminar errores humanos mediante estandarización y visualización.

Por lo tanto, el entorno lean impone una cultura en la cual calidad, flujo y mantenimiento están interrelacionados: los procesos de mantenimiento deben ejecutarse de forma que no solo garanticen disponibilidad, sino también condiciones de operación sin defectos, lo cual fortalece la competitividad y la estabilidad operativa de la organización.

2.5.9. Mantenimiento basado en estrategias Lean

El mantenimiento basado en estrategias lean implica adoptar un conjunto de directrices donde las intervenciones ya no responden únicamente a un cronograma fijo o a fallas evidentes, sino que se diseñan para maximizar valor, eliminar desperdicios y actuar justo cuando el activo lo requiere.

De acuerdo con el estudio de Fernández-González, Gómez-Sánchez y García-Sánchez (2022), las organizaciones que integran estrategias lean en el mantenimiento logran transformar sus sistemas de gestión de activos mediante tres ejes principales: la eliminación de actividades que no agregan valor, la sincronización del mantenimiento con la demanda real de producción, y la mejora continua basada en indicadores de desempeño específicos.

Por lo tanto, aplicar el mantenimiento basado en estrategias lean representa un cambio de paradigma desde “hacer mantenimiento porque lo dice el plan” hacia “hacer mantenimiento porque aporta valor y mejora la confiabilidad”, lo cual convierte al mantenimiento en un eslabón clave de la cadena de valor productivo, en lugar de ser sólo un coste operativo.

2.6. Fundamentos de conminución de materiales

La conminución se refiere al proceso mediante el cual se reduce el tamaño de los materiales sólidos hasta alcanzar dimensiones que permitan la liberación de minerales valiosos. Según Weerasekara (2013), este proceso se sustenta en mecanismos de fractura y abrasión directamente influenciados por las propiedades físicas y mineralógicas del material. Debido a que la conminución representa una de las etapas de mayor consumo energético en una planta, su optimización se vuelve esencial para mejorar la eficiencia operativa.

2.6.1. Los equipos de conminución tradicionales

Los equipos convencionales utilizados en la conminución incluyen trituradoras de mandíbulas, trituradoras de cono y molinos de bolas o barras. Estos equipos operan principalmente mediante mecanismos de impacto, compresión y fricción. Metso (2010)

sostiene que los molinos de bolas funcionan proyectando medios de molienda sobre el material, reduciendo su tamaño progresivamente. No obstante, estos equipos requieren elevados niveles de energía y demandan mantenimiento frecuente.

2.6.2. Nuevas tecnologías en procesos de conminución

El desarrollo tecnológico ha permitido la incorporación de equipos avanzados como los rodillos de alta presión (HPGR) y los molinos verticales, los cuales ofrecen una mayor eficiencia energética y operativa. Moraga (2024) señala que la integración de modelamiento predictivo y análisis automatizados permite ajustar las condiciones del proceso en tiempo real, optimizando el rendimiento y reduciendo costos.

2.7. Proceso de molienda

La molienda es una de las etapas fundamentales dentro del procesamiento de minerales y forma parte de la denominada conminución, cuyo propósito es reducir progresivamente el tamaño de las partículas hasta liberar los minerales valiosos contenidos en la roca. A diferencia del chancado, que actúa principalmente por compresión y genera fragmentos de mayor tamaño, la molienda busca alcanzar granulometrías finas, generalmente en el rango de micras, adecuadas para los procesos de concentración posteriores, como la flotación o la lixiviación.

Según Morrell et al. (2015), la molienda se realiza en equipos cilíndricos que giran parcialmente llenos de cuerpos moledores (bolas, barras o el mismo mineral), los cuales ejercen fuerzas de impacto y fricción que fragmentan las partículas. El resultado es un material con mayor superficie específica, lo que favorece la liberación mineral y aumenta la eficiencia de los procesos de separación.

En la industria minera, la molienda es también una de las operaciones de mayor consumo energético, representando hasta el 50 % de la energía total del procesamiento de minerales (Bond, 1961). Esto explica la importancia de aplicar tecnologías y metodologías de mantenimiento que aseguren la máxima disponibilidad y eficiencia de los equipos de molienda, como los molinos de bolas, SAG y HPGR.

En síntesis, el proceso de molienda constituye una operación crítica para la cadena productiva minera, pues de su eficiencia depende la calidad de la liberación mineral, la continuidad de los procesos posteriores y la competitividad global de la operación.

La Figura 14 representa el circuito general del proceso de molienda, en el cual se aprecia la secuencia de reducción de tamaño de mineral desde la trituración primaria hasta la molienda fina.

El proceso inicia en el triturador primario (Primary Gyratory), donde el mineral extraído es fragmentado en partículas de menor tamaño. Posteriormente, el material pasa a la etapa de trituración secundaria (MP800), que realiza una reducción adicional antes de ingresar al molino de rodillos de alta presión (HPGR).

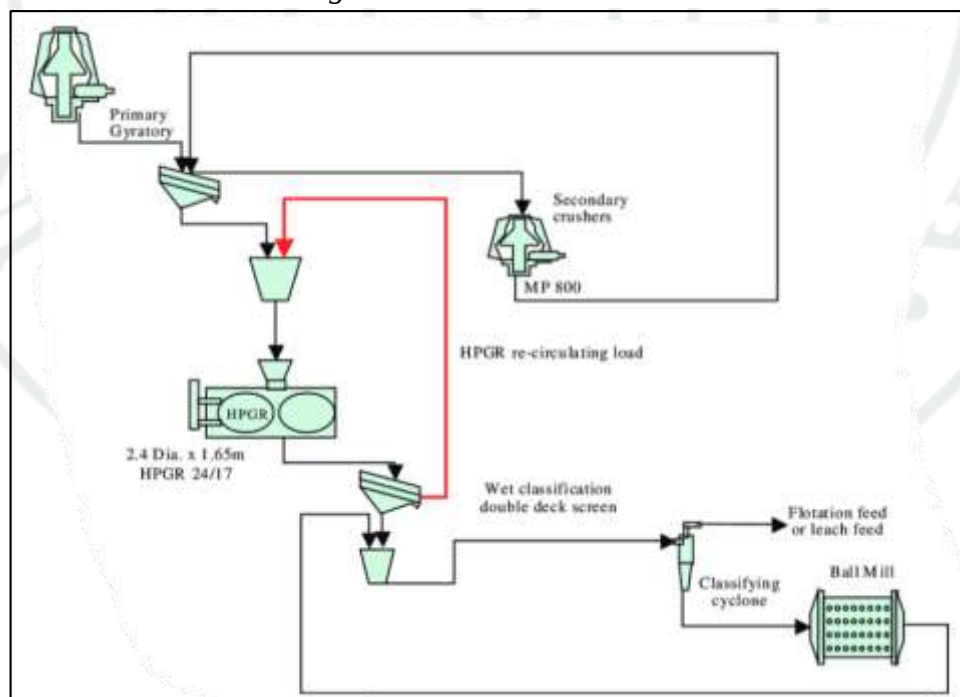
El HPGR cumple una función esencial al aplicar altas presiones sobre el lecho de mineral, generando fracturas microestructurales que mejoran la eficiencia del proceso de molienda posterior. Una parte del producto del HPGR retorna al circuito como carga recirculante, optimizando la granulometría de alimentación.

A continuación, el material pasa por un sistema de clasificación húmeda (Wet classification double deck screen), donde se separan las partículas finas de las gruesas. Las fracciones más finas son derivadas hacia los ciclones clasificadores y finalmente alimentan el molino de bolas (Ball Mill), donde se logra la molienda final hasta el tamaño requerido para la flotación o lixiviación.

En conjunto, el diagrama ilustra un sistema cerrado y eficiente, diseñado para maximizar la liberación de minerales valiosos y reducir el consumo energético global del proceso (Morrell, 2008; Tavares & Shi, 2015).

Figura 15

Ciclo de molienda general



Nota. La Figura muestra el ciclo de molienda general. Tomado de: “https://www.researchgate.net/figure/Conventional-HPGR-circuit-design-single-train_fig2_325397523”

2.8. Molino de Alta Presion (HPGR)

El High Pressure Grinding Roll es un equipo de conminución que tritura mineral por compresión interparticular entre dos rodillos que giran en sentido opuesto. Sus principales ventajas incluyen: menor consumo energético (hasta 30 % frente a molinos convencionales), mejor liberación de partículas y mayor eficiencia global del circuito (Schönert, 1988; Morrell et al., 2015). Componentes principales:

- Rodillos con recubrimiento de carburo de tungsteno o studs.
- Sistema hidráulico que controla la presión y separación de rodillos.
- Transmisión mecánica con motores, reductores y acoplamientos.
- Estructura y chasis diseñados para absorber cargas y vibraciones.

Modos de falla frecuentes:

- Desgaste acelerado de studs.
- Fugas hidráulicas.
- Fatiga de rodamientos principales.
- Problemas de alineación.

Dada su criticidad en el circuito de chancado y molienda, el HPGR requiere estrategias de mantenimiento específicas que aseguren su óptimo desempeño tanto en planta como en taller.

En la Figura 16 se observa el equipo HPGR llegando a planta

Figura 16

High Pressure Grinding Roll (HPGR) en planta de procesamiento



Nota. La Figura muestra el equipo HPGR izado siendo extraído del punto de operación con rumbo al taller. Tomado: “Presentación de manual del fabricante”

La Figura 16 muestra un diagrama de flujo de proceso simplificado correspondiente a una planta de conminución, donde se destaca la ubicación y función del molino de rodillos de alta presión (HPGR) dentro del circuito de molienda.

El proceso se inicia con el acopio del mineral en el stockpile primario, desde donde es alimentado hacia las tolvas de descarga que conducen el material a la etapa de chancado secundario. En esta fase, el mineral es reducido a tamaños más manejables mediante chancadoras cónicas, permitiendo una alimentación más uniforme a los siguientes equipos.

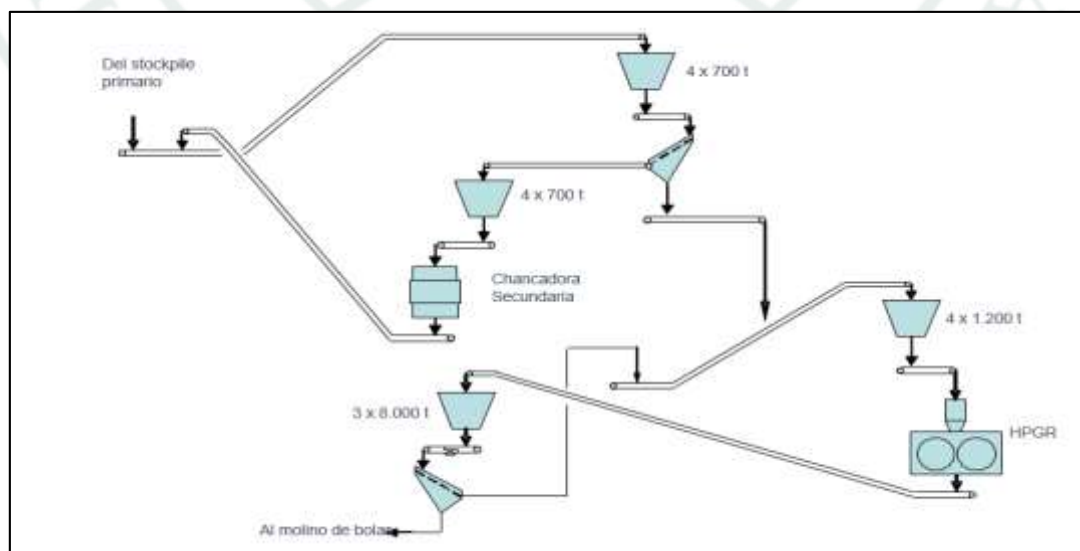
Posteriormente, el mineral triturado pasa a una serie de tolvas intermedias (de 700 t y 1 200 t de capacidad), que regulan el flujo hacia el HPGR. Este equipo es el encargado de realizar la molienda por compresión, aplicando altas presiones entre dos rodillos que fracturan el mineral, generando microfisuras que favorecen la liberación de partículas valiosas en etapas posteriores.

El producto del HPGR es luego transportado hacia las tolvas de descarga y clasificación, donde se separan las fracciones finas de las gruesas. Finalmente, el material clasificado es enviado hacia el molino de bolas, donde se lleva a cabo la molienda fina para alcanzar el tamaño óptimo requerido por el proceso de concentración.

En resumen, el esquema ilustra la integración del HPGR dentro del circuito de molienda, actuando como un eslabón intermedio entre el chancado y la molienda convencional, con el objetivo de reducir el consumo energético y mejorar la eficiencia del proceso global (Shi & Tavares, 2019; Morrell, 2008).

Figura 17

Diagrama de flujo de proceso simplificado de una planta



Nota. La Figura muestra el diagrama de flujo con los equipos predecesores al HPGR. Fuente: “Presentación de manual del fabricante”

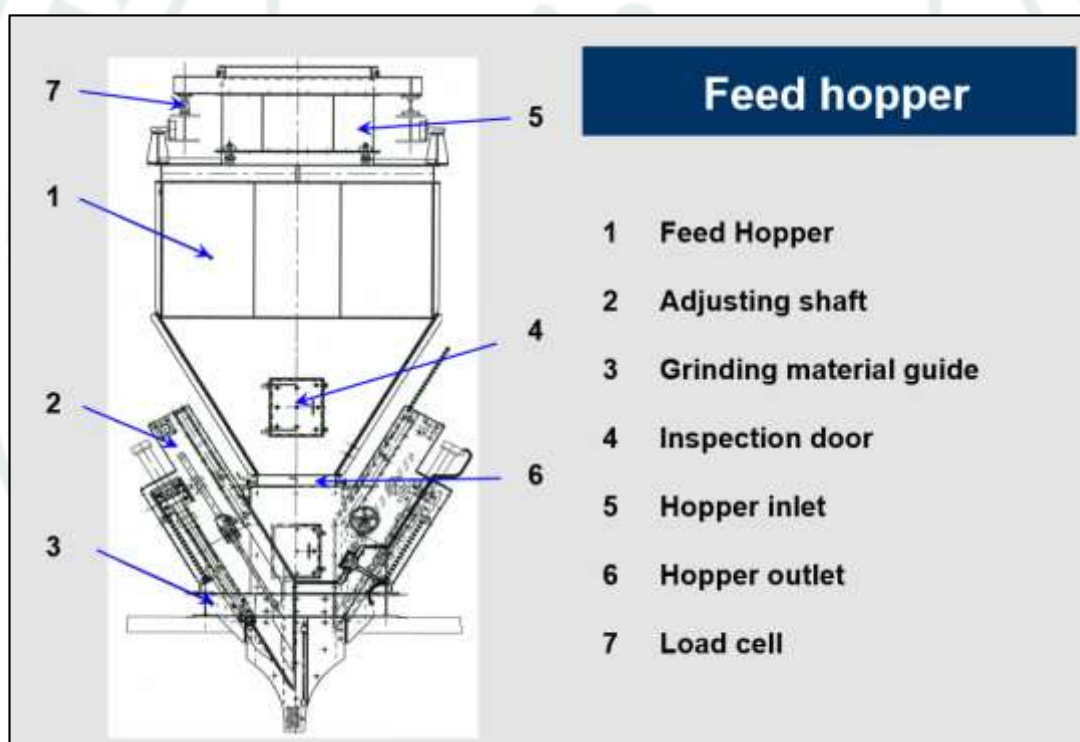
2.8.1. Hooper de Alimentación

El primer componente relevante del HPGR es la tolva de alimentación (hooper), diseñada para recibir el flujo de mineral proveniente de las etapas de chancado y asegurar una distribución uniforme hacia los rodillos. Esta disposición evita zonas de sobrecarga o bloqueo y contribuye a mantener el rendimiento óptimo del equipo. Según Thyssenkrupp Industrial Solutions (2014), la tolva incorpora revestimientos anti-desgaste de alta resistencia y un sistema de alimentación tipo 'choke-feed' que mejora la carga del lecho de material y la eficiencia del proceso. Por tanto, un diseño adecuado del hooper es esencial para garantizar la estabilidad operativa y prolongar la vida útil de los componentes del HPGR.

En la Figura 18 se puede observar las partes del FEED HOPPER

Figura 18

Esquema de las partes del FEED HOPPER



Nota. La

Figura muestra el diagrama de flujo con los equipos predecesores al HPGR. Tomado de: "Presentación de manual del fabricante"

2.8.2. Sistemas de los Molinos de Alta presión

Los molinos de rodillos de alta presión están conformados por una serie de sistemas que trabajan de manera integrada para garantizar su correcto funcionamiento, eficiencia y seguridad operativa. A continuación, se describen los principales:

- Sistema de Alimentación

Su función es suministrar el mineral desde las tolvas o alimentadores hacia la zona de compresión de los rodillos. Este sistema debe mantener un flujo continuo y homogéneo de material, evitando sobrecargas o vacíos que puedan afectar la presión y la distribución del lecho de molienda (Metso Outotec, 2019).

- Sistema de Rodillos de Molienda

Constituye el núcleo operativo del HPGR. Está formado por dos rodillos contrarrotantes que aplican una alta presión sobre el lecho de material, generando fracturas por compresión. Las superficies de los rodillos suelen estar recubiertas con insertos de carburo de tungsteno que aumentan su durabilidad y reducen el desgaste (Weir Minerals, 2021).

- Sistema Hidráulico y de Presión

Este sistema controla la fuerza aplicada sobre los rodillos mediante actuadores hidráulicos. Regula la presión de molienda, compensa variaciones de carga y protege al equipo ante cuerpos extraños, asegurando una operación estable y segura (Thyssenkrupp, 2020).

- Sistema Estructural y de Mantenimiento

Comprende la carcasa, bastidores, soportes y componentes que permiten el montaje, desmontaje y acceso a las partes internas del HPGR. Su diseño modular facilita las labores de inspección, cambio de rodillos, y mantenimiento preventivo sin requerir paradas prolongadas.

- Sistema de Descarga y Transporte

Recoge el material triturado y lo conduce hacia las etapas de clasificación o molienda secundaria. Este sistema está diseñado para evitar la acumulación de finos y garantizar una descarga continua y eficiente (FLSmidth, 2018).

En conjunto, estos sistemas permiten que el HPGR opere con alta confiabilidad, bajo consumo energético y una mayor eficiencia en la reducción de tamaño del mineral.

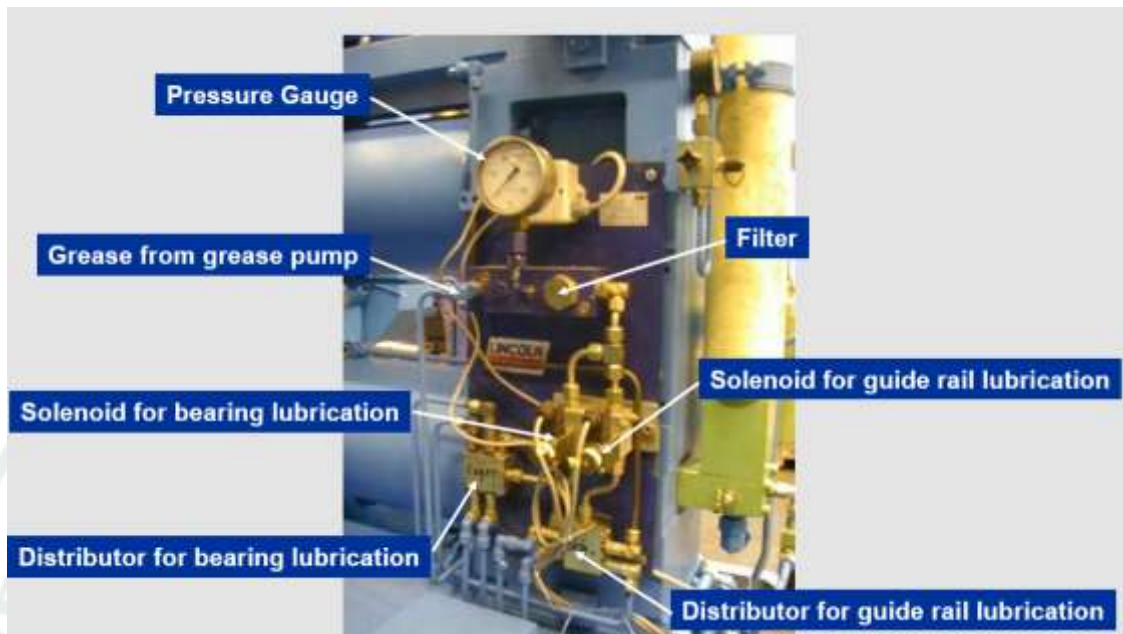
2.8.3. Unidad de Engrase

La unidad de engrase en el HPGR cumple una función crítica al proporcionar una lubricación continua y controlada a los rodamientos del rodillo fijo y móvil, así como al sistema de transmisión. Esta lubricación reduce la fricción, minimiza el desgaste y favorece la vida útil del equipo en condiciones exigentes. Según FLSmidth (2022), los sistemas modernos de engrase automático integran sensores de presión, temperatura y caudal que permiten monitorear el estado del aceite o grasa en tiempo real, facilitando intervenciones oportunas. La implementación de esta unidad asegura una operación más confiable, menos mantenimiento correctivo y mayor disponibilidad del sistema.

En la Figura 19 se muestra las partes centrales de engrase o lubricación

Figura 19

Partes de la central de Engrase o lubricación



Nota. La Figura muestra partes de la central de engrase o lubricación del HPGR. Tomado de: “Presentación de manual del fabricante”

2.8.4. Sistema Hidráulico

El sistema hidráulico del HPGR es responsable de aplicar la fuerza de compresión necesaria sobre los rodillos a través de cilindros hidráulicos y un sistema de muelles hidropneumáticos. Esta configuración permite ajustar con precisión la presión entre los rodillos según la dureza del mineral alimentado, mejorando tanto la eficiencia de trituración como la protección contra materiales extraños. Según Klymowsky (2010), en muchos equipos HPGR la presión operativa puede alcanzar hasta 250 MPa, lo que incrementa la fracturación interpartícula y reduce la carga de molienda posterior. De esta forma, un sistema hidráulico bien diseñado y mantenido mejora el rendimiento global y la eficiencia energética del circuito.

En la Figura 20 se visualiza el sistema hidráulico el cual se encarga del movimiento del rodillo móvil

Figura 20

Sistema hidráulico el cual ejerce fuerza compresión a los rodillos



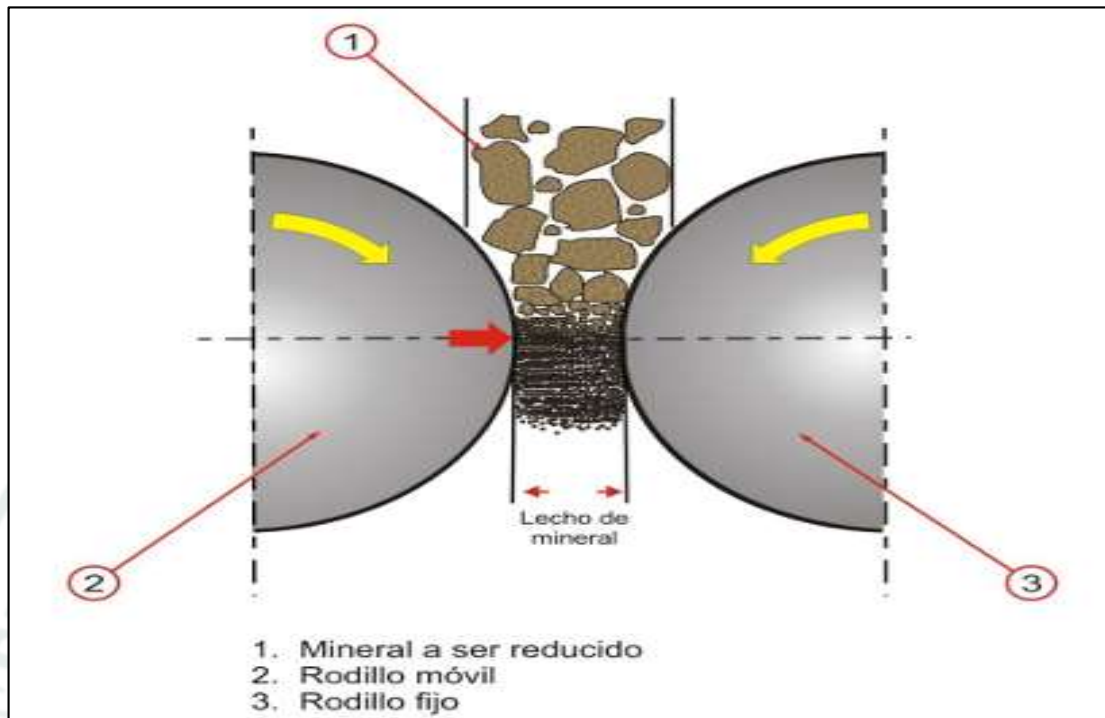
Nota. La Figura muestra sistema hidráulico de presión del I HPGR. Fuente: “Presentación de manual del fabricante”

2.8.5. Rodillo Fijo y Móvil

El HPGR incorpora dos rodillos contrapuestos: uno fijo y otro móvil. El rodillo móvil se desplaza longitudinalmente gracias a los cilindros hidráulicos, manteniendo una presión constante en el lecho de material. Ambos están recubiertos con segmentos de carburo de tungsteno o mezclas de aleaciones endurecidas, lo que les confiere alta resistencia al desgaste en ambientes abrasivos. Según Thyssenkrupp Industrial Solutions (2014), estos rodillos logran vidas operativas superiores a 10,000 horas en rocas muy abrasivas gracias a su diseño robusto. Así, la correcta selección y mantenimiento de los rodillos es decisivo para la confiabilidad del HPGR.

Figura 21

Función del Rodillo Móvil y fijo

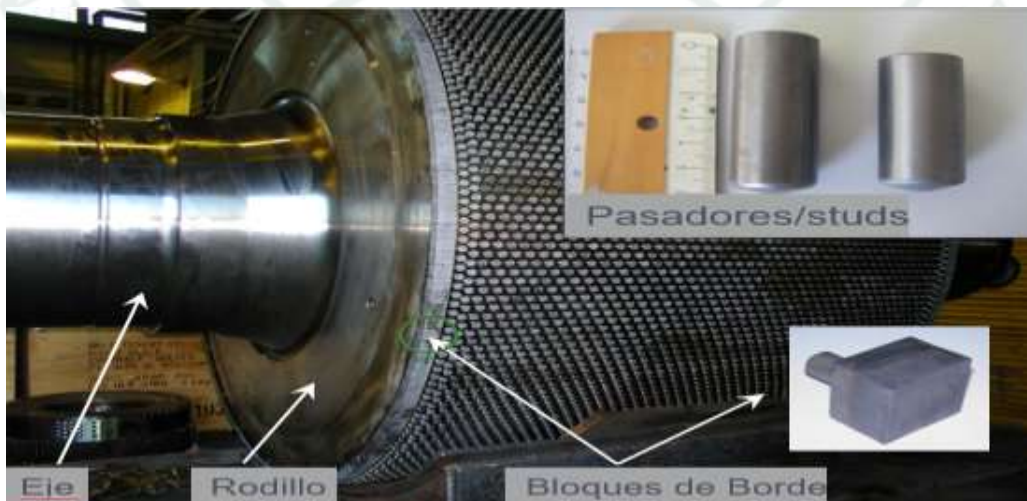


Nota. La Figura muestra la diferencia del rodillo móvil y fijo. Fuente: “Presentación de manual del fabricante”

Cada rodillo está cubierto a manera de revestimiento por studs (material tungsteno), los cuales son los que entran en contacto con el mineral a ser molido. (Ver Figura 22).

Figura 22

Rodillo está recubierto por pasadores de Studs.



Nota. La Figura muestra el recubrimiento del rodillo. Fuente: “Presentación de manual del fabricante”

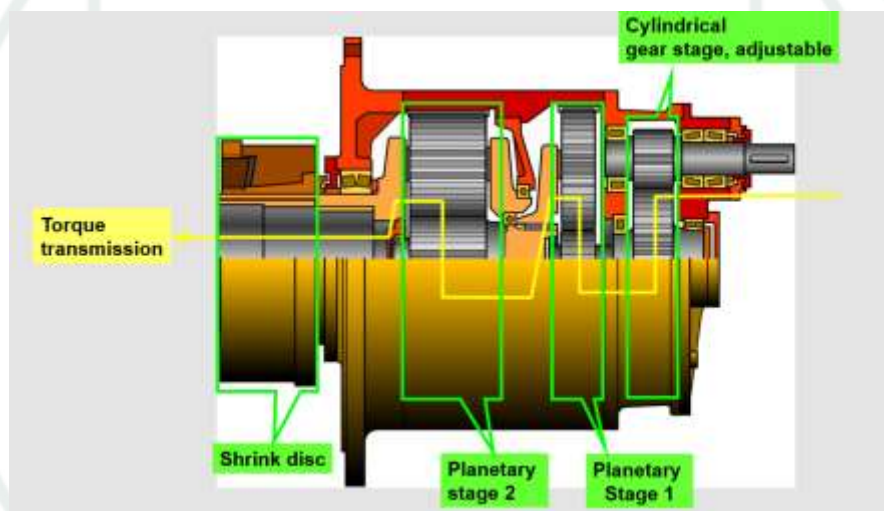
2.8.6. Caja de Transmisión

La caja de transmisión del HPGR transfiere la potencia del motor a los rodillos mediante reductores planetarios o paralelos, cardanes y acoplamientos mecánicos. Un diseño eficiente de esta unidad reduce pérdidas energéticas y asegura una velocidad de rotación correcta para el proceso de trituración. Según Metso (2023), la versión HRC™ de HPGR incluye transmisión optimizada que incrementa la disponibilidad del equipo y reduce los costos operativos a largo plazo. En consecuencia, la caja de transmisión se convierte en un componente clave para garantizar el rendimiento continuo del circuito.

En la Figura 23 se observa la caja de transmisión, también llamado Gear box

Figura 23

Caja Transmisión con reductores planetarios



Nota. La figura muestra caja de transmisión planetaria del 1 HPGR, Tomado de Presentación de manual dell fabricante''

2.8.7. Principio de Funcionamiento

La caja de transmisión del HPGR transfiere la potencia del motor a los rodillos mediante reductores planetarios o paralelos, cardanes y acoplamientos mecánicos. Un diseño eficiente de esta unidad reduce pérdidas energéticas y asegura una velocidad de rotación correcta para el proceso de trituración. Según Metso (2023), la versión HRC™ de HPGR incluye transmisión optimizada que incrementa la disponibilidad del equipo y reduce los costos operativos a largo plazo. En consecuencia, la caja de transmisión se convierte en un componente clave para garantizar el rendimiento continuo del circuito.

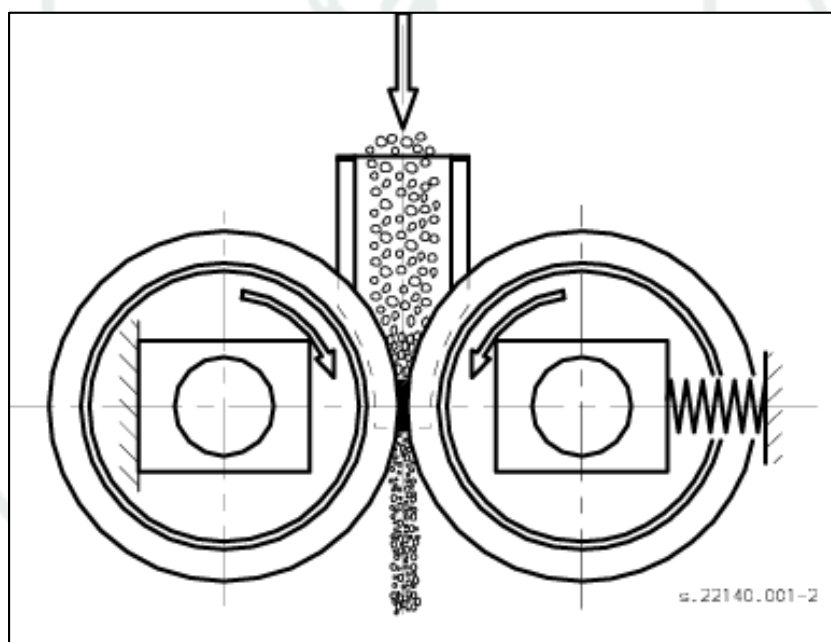
La prensa de rodillos es un equipo diseñado para la conminución de materiales frágiles o semiduros, pertenecientes principalmente a la familia de minerales no metálicos. Su funcionamiento se basa en la compresión del material entre dos cilindros que giran en direcciones opuestas, generando un lecho de material autosoportado que se somete a presiones muy elevadas.

Según Thyssenkrupp Industrial Solutions (2014), este principio de trabajo permite obtener una fragmentación eficiente con menor consumo energético y una reducción significativa del desgaste en comparación con los sistemas de molienda tradicionales. En consecuencia, la tecnología se ha consolidado como una alternativa de alto rendimiento en la industria minera y del cemento

En la Figura 24 se representa de manera general el funcionamiento del HPGR

Figura 24

Funcionamiento de la Prensa de Rodillos.



Nota. La Figura muestra principio funcionamiento del HPGR. Tomado de: “Presentación de manual del fabricante”

2.8.8. Ventajas y Desventajas del uso y aplicación de los molinos de alta presión - HPGR

Los HPGR se han incorporado a circuitos de trituración y molienda por su eficiencia energética y su capacidad de generar microfisuras que facilitan la molienda posterior. No obstante, su adopción implica retos asociados a control operativo, alimentación y desgaste.

Entre las ventajas más citadas: menor energía específica, mayor capacidad, producto microagrietado y menor espacio requerido. Entre las desventajas: sensibilidad al edge effect, desgaste de rodillos y necesidad de control de humedad y granulometría (Klymowsky, 2008; SAIMM, 2016).

2.8.9. Aplicación de los Molinos de Alta Presión - HPGR

La aplicación de HPGR es versátil: pueden reemplazar etapas de chancado/molienda o trabajar en paralelo con molinos SAG/bolas, configurándose como pre-trituración, trituración terciaria, molienda fina o “de-bottlenecking” de líneas existentes.

Los fabricantes reportan su uso en minerales duros y competentes, en cemento y en metales base, tanto en circuitos nuevos como en retrofits para aumentar capacidad sin ampliar footprint (Metso, FLSmidth, thyssenkrupp).

2.8.10. Impacto ambiental de los HPGR

Además de la eficiencia técnica, la adopción de HPGR conlleva beneficios ambientales indirectos al disminuir energía específica, medios de molienda y, potencialmente, agua en etapas posteriores, contribuyendo a menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por unidad de producción.

Estudios de referencia en Análisis de Ciclo de Vida (LCA) muestran que la energía de conminución contribuye significativamente a la huella de carbono del procesamiento; por ello, tecnologías más eficientes como el HPGR reducen la intensidad energética del circuito (Norgate & Haque, 2009; Metso, 2025).

2.9. Bases Legales de la Investigación

2.9.1. SAE JA-1011 — Criterios de evaluación para procesos RCM

La norma SAE JA-1011 establece criterios claros para evaluar si un proceso puede considerarse auténticamente como un Proceso de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Su enfoque es práctico: define una serie de pasos y preguntas que aseguran que el análisis se centre en funciones, modos de falla y consecuencias, proporcionando un marco sistemático para validar procesos RCM.

SAE JA-1011 enfatiza que cualquier procedimiento presentado como RCM debe demostrar conformidad con estos criterios para garantizar rigor metodológico (SAE International, JA-1011).

Por ello, adoptar SAE JA-1011 como referencia en proyectos RCM aporta legitimidad y permite estandarizar metodologías, facilitando comparaciones objetivas entre implementaciones.

2.9.2. SAE JA-1012 — Guía de aplicación para RCM

La SAE JA-1012 funciona como un documento guía que facilita la aplicación práctica del RCM, entregando ejemplos, recomendaciones y aclaraciones sobre pasos críticos del proceso.

JA-1012 profundiza en aspectos de ejecución, haciendo hincapié en la correcta definición del contexto operacional y en la trazabilidad de decisiones tomadas durante el análisis. (SAE International, JA-1012).

Combinar JA-1011 (criterios) y JA-1012 (guía) proporciona tanto la evaluación del rigor metodológico como soporte operativo para implementar RCM en planta.

2.9.3. ISO 14224 — Taxonomía y recolección de datos de confiabilidad y mantenimiento

ISO 14224 entrega una estructura estandarizada para la captura e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento, aportando definiciones y formatos uniformes para describir equipos, fallas y eventos.

La norma es especialmente útil al construir historiales de fallas y bases de datos que alimentan análisis estadísticos y modelos predictivos, requisito necesario para la aplicación rigurosa de RCM (ISO 14224, 2006).

Adoptar ISO 14224 mejora la calidad de los registros e incrementa la comparabilidad de análisis entre plantas y periodos, fortaleciendo el soporte cuantitativo de las decisiones de mantenimiento.

2.9.4. ISO 55000 / ISO 55001 / ISO 55002 — Gestión de activos (Asset Management)

La familia ISO 55000 define el marco para una gestión integral de activos: ISO 55000 presenta conceptos y beneficios, ISO 55001 establece los requisitos de un sistema de gestión y ISO 55002 ofrece orientación práctica para su implementación.

Estas normas promueven la integración del mantenimiento con la gestión estratégica de activos, alineando políticas, roles, procesos y métricas con los objetivos organizacionales (ISO TC251, familia ISO 55000).

Incorporar ISO 55000 en proyectos RCM y Lean Maintenance contribuye a que las decisiones de mantenimiento respondan a prioridades de negocio y ciclo de vida de los activos.

2.9.5. ISO 45001 — Seguridad y salud en el trabajo

ISO 45001 establece los requisitos para un sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional orientado a prevenir lesiones y enfermedades laborales.

En el ámbito del mantenimiento, ISO 45001 obliga a incorporar la seguridad en el diseño de tareas, evaluación de riesgos y procedimientos operativos, protegiendo al personal y al entorno (ISO 45001, 2018).

Al aplicar RCM o Lean Maintenance, respetar ISO 45001 garantiza que las intervenciones prioricen tanto la confiabilidad técnica como la seguridad de los trabajadores.

2.9.6. ISO 9001 — Gestión de la calidad

ISO 9001 define requisitos para sistemas de gestión de la calidad, centrados en procesos, control documental y mejora continua.

Para mantenimiento, ISO 9001 refuerza la necesidad de estandarizar procedimientos, registrar actividades y auditar resultados para asegurar la calidad en las intervenciones (ISO 9001:2015).

Integrar prácticas de ISO 9001 en mantenimiento favorece la consistencia de tareas y la documentación necesaria para validar enfoques RCM y Lean.

2.9.7. ISO 20815 — Gestión de la producción y confiabilidad (petróleo y gas)

ISO 20815 entrega lineamientos para la gestión de producción y la confiabilidad en instalaciones de petróleo y gas, con foco en planificación y ejecución para minimizar interrupciones.

La norma orienta sobre aseguramiento de producción y gestión de riesgos en entornos complejos, aportando criterios útiles para definir prioridades de mantenimiento y asegurar continuidad operativa (ISO 20815, 2008).

Aunque sectorial, sus principios de producción asegurada y planificación son transferibles a la gestión de mantenimiento industrial en general.

2.9.8. UNE EN 16646 — Mantenimiento dentro de la gestión de activos físicos

La UNE-EN 16646 describe cómo integrar el mantenimiento en el ciclo de vida de los activos, estableciendo responsabilidades y criterios para alinear el mantenimiento con objetivos de negocio.

Esta norma enfatiza que el mantenimiento debe planificarse como parte integral de la gestión de activos, lo que mejora la toma de decisiones y la asignación de recursos (UNE-EN 16646, 2015).

Adherirse a UNE-EN 16646 ayuda a que proyectos RCM y Lean Maintenance se enmarquen en un enfoque consistente de gestión de activos.



CAPITULO III

Implementación de la propuesta



3.1. Delimitación del sistema HPGR

La delimitación del sistema es el punto de partida para el desarrollo del análisis RCM. Este paso permite definir con precisión qué partes del HPGR formarán parte del estudio y cuáles quedan fuera del alcance. Establecer estos límites es importante para evitar evaluaciones demasiado amplias o que incluyan componentes que no influyen directamente en el desempeño operativo del equipo. De acuerdo con las directrices planteadas por Moubray (1997), el proceso de delimitación permite establecer los límites físicos y funcionales del sistema, asegurando que el análisis posterior mantenga coherencia y trazabilidad.

En esta investigación, el sistema a evaluar corresponde al HPGR utilizado en la etapa de conminución. El análisis se orienta únicamente hacia los subsistemas que intervienen en la generación de la presión de operación y en los mecanismos que permiten que el equipo cumpla con su función principal. Por esa razón, el estudio se centra en los elementos mecánicos y en los sistemas auxiliares que participan directamente en la trituración del mineral.

El HPGR está conformado por dos rodillos principales (uno fijo y uno flotante), cuyo movimiento y presión ejercida sobre el mineral representan el núcleo funcional del equipo. De manera complementaria, participan sistemas como el circuito hidráulico, la lubricación, la transmisión, los sellos laterales y los mecanismos de enfriamiento. Estos subsistemas sí serán considerados dentro del análisis RCM, ya que una falla en cualquiera de ellos puede interrumpir la operación, reducir la capacidad de molienda o generar costos adicionales de mantenimiento.

Por otro lado, el equipo cuenta con sensores y dispositivos de monitoreo que registran variables como temperatura, presión y vibración. Aunque estos elementos contribuyen al seguimiento de las condiciones de operación, no serán incluidos en la taxonomía ni en el desarrollo del análisis RCM, porque su función es complementaria y no afecta directamente la capacidad del HPGR para triturar mineral. Además, estos dispositivos suelen manejarse mediante lógicas de control específicas que no forman parte del alcance de este estudio. Este enfoque es coherente con las recomendaciones de guías técnicas de RCM, que sugieren limitar el análisis a los componentes que tengan impacto directo en la función principal del activo.

A partir de estas consideraciones, los subsistemas incluidos dentro de la delimitación del sistema para el presente estudio son los siguientes:

- Rodillo fijo / flotante
- Sistema hidráulico
- Sistema de lubricación
- Sistema de transmisión
- Sistema de sellos laterales

- Sistema de enfriamiento
- Sistema de alimentación y descarga
- Estructura soporte del equipo

Esta delimitación servirá como base para construir la taxonomía del HPGR y para desarrollar el resto de etapas del análisis RCM. Con ello se asegura que el estudio se mantenga enfocado en los elementos que realmente determinan la confiabilidad del equipo y que los resultados puedan aplicarse de manera práctica en un entorno industrial.

Del mismo modo, se han establecido algunas exclusiones del análisis para evitar superposiciones con otros sistemas de la planta. Entre las exclusiones se consideran: las fajas transportadoras de alimentación y descarga, la infraestructura civil y la subestación eléctrica de alimentación. Estos elementos presentan funciones y modos de falla propios que deben ser evaluados en análisis independientes.

La delimitación funcional considera como punto inicial la entrada del mineral al sistema de alimentación del HPGR, y como punto final la entrega del producto triturado hacia la siguiente etapa del proceso.

Finalmente, esta delimitación permite plantear un análisis estructurado y coherente con los lineamientos metodológicos del RCM, estableciendo la base para la formulación de funciones, la identificación de modos de falla y la posterior selección de estrategias de mantenimiento. Asimismo, asegura que el plan de mantenimiento resultante sea específico para el HPGR y responda a las necesidades operativas reales de la empresa fabricante y del servicio postventa.

3.2. Conformación del grupo de trabajo

Para llevar a cabo la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en el HPGR, es necesario conformar un grupo de trabajo con conocimientos técnicos y experiencia en la operación y mantenimiento del equipo. Este grupo permite identificar correctamente las funciones del equipo, los modos de falla y las estrategias de mantenimiento más adecuadas, asegurando que el análisis sea completo y aplicable.

La selección de los integrantes se basa en criterios de conocimiento técnico, experiencia operativa y capacidad de análisis, buscando que cada miembro aporte información relevante desde su área de especialización. Entre los criterios principales se incluyen:

Conocimiento del equipo: Personal familiarizado con el HPGR y sus componentes críticos.

Experiencia práctica: Operadores y supervisores que hayan trabajado directamente con el equipo, capaces de describir fallas recurrentes y condiciones de operación.

Especialización en mantenimiento: Ingenieros y técnicos de mantenimiento mecánico, eléctrico e instrumentación, encargados de evaluar las estrategias de mantenimiento existentes y proponer mejoras.

Habilidades de análisis y decisión: Integrantes capaces de analizar información técnica y llegar a consensos durante el desarrollo del RCM.

Coordinación del grupo: Un líder que organice las sesiones, registre los resultados y supervise la aplicación de la metodología de manera sistemática.

Se recomienda que el grupo esté conformado de la siguiente manera:

- 1 Coordinador de RCM (Ingeniero de Mantenimiento o especialista en confiabilidad).
- 2 Ingenieros de Mantenimiento (mecánico y eléctrico).
- 1 Especialista en Instrumentación y Control.
- 2 Supervisores de Operación del HPGR.
- 1 Analista de Planeamiento de Mantenimiento.
- 1 Operador experimentado del equipo.

Con esta estructura se logra integrar la perspectiva operativa, técnica y estratégica, garantizando que las decisiones tomadas durante el análisis RCM sean representativas de la realidad del equipo y puedan aplicarse de manera efectiva para optimizar su mantenimiento.

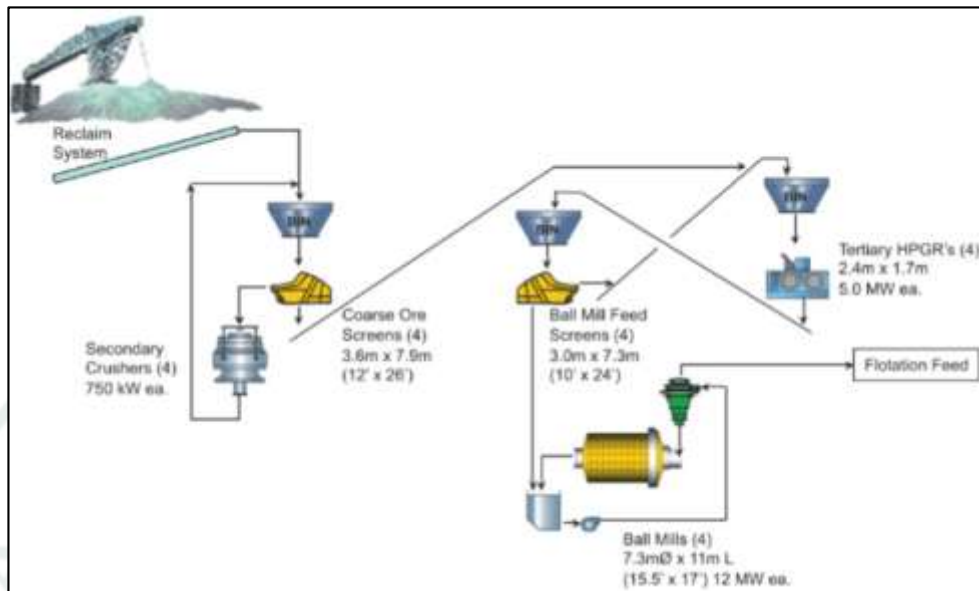
3.3. Layout del equipo en planta

La comprensión del layout del proceso es un componente indispensable para la adecuada aplicación de la metodología RCM, ya que permite identificar la ubicación operativa del HPGR dentro del circuito de conminución y reconocer las interacciones funcionales con los sistemas upstream y downstream. De acuerdo con Sutcliffe (2015), el análisis de confiabilidad de una máquina de alta criticidad debe considerar su posición dentro del flujo productivo, puesto que esta determina el impacto que genera una falla en términos de disponibilidad del proceso, acumulación de inventarios y continuidad operacional.

En la figura 25 se muestra la parte de un proceso productivo en una planta concentradora, donde se puede ver la ubicación del HPGR.

Figura 25

Demostración del Layout donde se puede visualizar la ubicación del HPGR en planta.



Nota. La figura demuestra la ubicación del HPGR dentro de la planta Tomado de: “Crusher HPGR – Ball mill circuit courtesy of Minera”

En la operación analizada, el HPGR forma parte del circuito terciario de conminución, tal como se aprecia en el diagrama de proceso mostrado en la Figura 23. En este esquema, el mineral proveniente del sistema de recuperación (reclaim system) es transportado hacia los chancadores secundarios, donde se realiza la primera reducción granulométrica.

Posteriormente, el material es derivado hacia las zarandas de clasificación gruesa, cuyas corrientes de rechazo se dirigen nuevamente a trituración secundaria.

El mineral que cumple las especificaciones de tamaño continúa hacia las zarandas de alimentación a molino, donde se realiza una segunda etapa de clasificación. Las fracciones adecuadas para molienda son enviadas directamente a los molinos de bolas, mientras que las fracciones excedentes de tamaño son alimentadas al sistema de HPGR terciario, conformado por cuatro unidades de 2.4 m × 1.7 m y una potencia instalada aproximada de 5 MW por equipo.

En este punto del proceso, los rodillos del HPGR generan un estado de compresión altamente controlado que permite fracturar el mineral por esfuerzos de confinamiento, mejorando la eficiencia energética respecto a la conminución convencional. El producto generado se incorpora nuevamente al flujo hacia molienda o se dirige, dependiendo de las condiciones de operación, directamente hacia la etapa de flotación.

Desde una perspectiva del RCM, este layout evidencia que el HPGR opera en un tramo crítico del proceso debido a su capacidad para influir directamente en la granulometría de alimentación a molienda y, por ende, en la estabilidad del circuito aguas abajo. Asimismo, la

ubicación estratégica del equipo determina la importancia de minimizar tiempos de indisponibilidad y garantizar que las tareas de mantenimiento correctivo, preventivo o predictivo se ejecuten bajo parámetros estandarizados y planificados.

Finalmente, el layout permite delimitar con claridad los puntos de interfaz del HPGR con equipos y subsistemas complementarios, tales como las tolvas de alimentación, las fajas transportadoras, los sistemas hidráulicos asociados y los mecanismos de derivación de carga.

Esta información es indispensable para construir la taxonomía del sistema y realizar el análisis de fallas del capítulo siguiente.

3.4. Determinación de criticidad mediante el método RBCA

3.4.1. Fundamentación del método

Con el fin de definir los sistemas que serán analizados mediante la metodología Reliability Centered Maintenance (RCM), es indispensable realizar previamente una evaluación que permita identificar aquellos cuya falla pueda generar las mayores consecuencias sobre la operación del equipo. Debido a que el HPGR está integrado por diversos sistemas que cumplen funciones específicas dentro del proceso de conminución, no resulta conveniente ni técnicamente eficiente aplicar el análisis RCM con el mismo nivel de detalle a cada uno de ellos. Por ello, es necesario establecer un criterio de priorización que permita enfocar el estudio en los sistemas de mayor importancia operacional.

Para cumplir este objetivo, en la presente investigación se adoptó el método Risk-Based Criticality Assessment (RBCA), una metodología de evaluación basada en el análisis del riesgo, ampliamente utilizada en la gestión de activos para establecer prioridades de mantenimiento. Este enfoque determina el nivel de criticidad de cada sistema considerando la interacción entre la probabilidad de ocurrencia de una falla y las consecuencias que dicha falla podría ocasionar sobre la operación del equipo.

La selección del método RBCA responde a su compatibilidad con los principios de la metodología RCM, ya que ambos enfoques centran el análisis en las consecuencias derivadas de la pérdida de funcionalidad de los activos. En este contexto, la evaluación de criticidad constituye una etapa previa que permite definir cuáles sistemas requieren un análisis funcional detallado, la identificación de sus modos de falla y el posterior establecimiento de estrategias de mantenimiento acordes con su nivel de riesgo.

En esta investigación, el método RBCA fue aplicado a los principales sistemas que conforman el HPGR, obteniéndose una jerarquización de criticidad basada en el riesgo asociado a cada uno de ellos. Esta priorización permitió seleccionar los sistemas más representativos para el desarrollo del análisis RCM y la formulación de la propuesta de mantenimiento.

3.4.2 Metodología de evaluación

La determinación de la criticidad de cada sistema se realizó a partir de la evaluación de dos variables que representan el nivel de riesgo asociado a una falla. La primera corresponde a la probabilidad de ocurrencia, que refleja la posibilidad de que un sistema presente una pérdida de su función durante la operación. La segunda variable está relacionada con las consecuencias que dicha falla puede generar sobre el desempeño del HPGR y la continuidad del proceso productivo.

Con base en estos dos parámetros, el índice de criticidad se calculó mediante la siguiente expresión:

$$IC=P \times C$$

Donde:

IC: Índice de criticidad.

P: Probabilidad de ocurrencia de la falla.

C: Consecuencia asociada a la falla.

La aplicación de esta metodología permite cuantificar el nivel de riesgo de los sistemas que conforman el HPGR y establecer un orden de prioridad de acuerdo con su criticidad. De esta manera, es posible orientar las estrategias de mantenimiento hacia aquellos sistemas cuya falla tendría un mayor impacto sobre la disponibilidad, la confiabilidad y la continuidad operacional del equipo.

3.4.3 Evaluación de la probabilidad

La probabilidad de falla hace referencia a la posibilidad de que un sistema presente una pérdida de su función durante las condiciones normales de operación del HPGR. Para

determinar este parámetro se analizaron diversos factores que influyen en el comportamiento del sistema a lo largo de su vida útil.

La valoración de la probabilidad se efectuó considerando las condiciones de operación a las que está sometido el equipo, las solicitaciones mecánicas que actúan sobre sus componentes, el nivel de desgaste esperado durante el servicio, el historial de fallas reportado para equipos HPGR y la complejidad operacional de cada sistema.

Tabla 9

Evaluación de la probabilidad

Valor	Nivel	Descripción
1	Muy baja	La falla es poco probable durante la vida útil del sistema.
2	Baja	La falla ocurre ocasionalmente bajo condiciones particulares.
3	Media	La falla ocurre de manera esporádica durante la operación normal.
4	Alta	La falla presenta recurrencia debido a las condiciones de operación del HPGR.
5	Muy alta	La falla ocurre frecuentemente debido a las elevadas solicitaciones mecánicas y desgaste continuo.

3.4.4 Evaluación de las consecuencias

Las consecuencias de la falla corresponden al efecto que produce la pérdida de funcionalidad de un sistema sobre el desempeño general del HPGR y sobre la continuidad de la operación. La magnitud de este impacto depende de la importancia que tiene cada sistema dentro del proceso de conminución y de las repercusiones que su falla puede generar en la operación.

Para la evaluación de este criterio se consideró una consecuencia de carácter global, incorporando los principales aspectos que podrían verse afectados ante una falla del sistema, entre ellos la continuidad operacional, la disponibilidad del equipo, la seguridad del personal, los costos asociados a las actividades de mantenimiento y la influencia sobre el proceso productivo, afectación del proceso productivo.

Tabla 10*Evaluación de las consecuencias*

Valor	Nivel	Descripción
1	Muy baja	La falla no afecta la operación del equipo.
2	Baja	La falla genera una ligera disminución del rendimiento sin detener el proceso.
3	Media	La falla reduce parcialmente la producción y requiere intervención programada.
4	Alta	La falla ocasiona la parada del HPGR y elevados costos de reparación.
5	Muy alta	La falla produce la pérdida total de la función del equipo, elevados costos y riesgos para la seguridad.

3.4.5 Matriz riesgo

Con base en los valores asignados a la probabilidad y a las consecuencias, el índice de criticidad se obtuvo mediante la matriz de riesgo mostrada.

Tabla 11*Matriz de riesgo*

Probabilidad	1	2	3	4	5
5	5	10	15	20	25
4	4	8	12	16	20
3	3	6	9	12	15
2	2	4	6	8	10
1	1	2	3	4	5

Los valores obtenidos fueron clasificados de acuerdo con los siguientes rangos.

Tabla 12*Rangos*

Índice	Clasificación
20–25	Crítico
12–19	Alto
6–11	Medio
1–5	Bajo

3.4.6 Evaluación de los sistemas del HPGR

Sistema Rodillos y Estructura

Este sistema constituye el elemento principal del proceso de conminución, ya que soporta directamente las elevadas fuerzas de compresión generadas durante la operación del HPGR. Asimismo, está sometido permanentemente a abrasión del mineral, desgaste de studs, esfuerzos de fatiga y cargas cíclicas transmitidas al bastidor y a los rodamientos principales.

Debido a estas condiciones de operación se asignó una probabilidad de falla igual a cinco (5).

La consecuencia también fue valorada con cinco (5) debido a que cualquier pérdida funcional ocasiona la detención inmediata del equipo, elevados costos de reparación, largos tiempos de recuperación y una afectación directa sobre la producción.

$$IC=5 \times 5=25$$

obteniéndose una criticidad alta, razón por la cual este sistema fue seleccionado para desarrollar el análisis RCM.

Sistema Accionamiento y Transmisión

Este sistema tiene la función de transmitir la potencia generada por el motor hacia los rodillos del HPGR a través del conjunto de reductores, acoplamientos y engranajes. Durante su operación se encuentra sometido de manera permanente a elevados esfuerzos de torsión y cargas mecánicas, condiciones que favorecen el desgaste progresivo de sus componentes.

La probabilidad de falla fue calificada con un valor de cuatro (4), considerando que los componentes del sistema presentan una recurrencia moderada-alta de fallas, principalmente asociadas al desgaste de engranajes, rodamientos y acoplamientos como consecuencia de las condiciones de operación.

Por su parte, la consecuencia recibió una valoración de cinco (5), debido a que una falla en este sistema interrumpe la transmisión de potencia hacia los rodillos, ocasionando la detención inmediata del HPGR y demandando tiempos considerables para la ejecución de las actividades de reparación y restablecimiento del equipo.

Por tanto,

$$IC=4 \times 5=20$$

clasificándose como un sistema crítico.

Sistema Hidráulico de Fuerza

El sistema hidráulico controla la presión de trabajo aplicada entre los rodillos, siendo responsable de mantener la fuerza de compresión requerida para el proceso de molienda.

Está conformado por bombas hidráulicas, válvulas de control, cilindros hidráulicos, acumuladores y elementos de regulación que trabajan bajo altas presiones.

Se asignó una probabilidad de cuatro (4) debido a que las condiciones de presión y operación favorecen la aparición de fugas internas, desgaste de bombas, pérdida de presión y fallas de válvulas.

La consecuencia fue valorada con cuatro (4) debido a que una pérdida de presión reduce considerablemente la capacidad de molienda, disminuye la eficiencia del proceso y puede ocasionar la parada automática del HPGR por protección.

Por tanto,

$$IC=4 \times 4=16$$

correspondiendo a un nivel de criticidad **alto**.

Aunque el índice de criticidad obtenido para este sistema no lo ubica dentro de la categoría de crítico, se consideró conveniente incorporarlo al análisis RCM debido a la importancia de la función que desempeña en la operación del HPGR. Este sistema es el encargado de generar la fuerza de compresión aplicada entre los rodillos, condición indispensable para que el proceso de conminución se desarrolle de manera adecuada y el equipo mantenga su desempeño operativo.

Sistema de Lubricación

El sistema de lubricación asegura la adecuada formación de película lubricante en rodamientos, engranajes y demás componentes sometidos a fricción.

Su probabilidad fue valorada con tres (3), mientras que la consecuencia obtuvo un valor de tres (3), alcanzando un índice de criticidad de nueve (9), correspondiente a un nivel medio.

Sistema de Enfriamiento

Este sistema mantiene la temperatura adecuada del aceite hidráulico y del lubricante mediante intercambiadores de calor y elementos de circulación.

La probabilidad fue valorada con dos (2) y la consecuencia con tres (3), obteniéndose un índice de criticidad de seis (6), correspondiente a un nivel medio.

Sistema de Alimentación y Descarga

Este sistema controla el ingreso y la evacuación del mineral durante el proceso de molienda.

La probabilidad fue valorada con dos (2) y la consecuencia con dos (2), alcanzando un índice de criticidad de cuatro (4), correspondiente a un nivel bajo.

Resultados de análisis de criticidad.

Tabla 13

Resultados de análisis de criticidad

Sistema	P	C	IC	Nivel
Sistema Rodillos y Estructura	5	5	25	Crítico
Sistema Accionamiento y Transmisión	4	5	20	Crítico
Sistema Hidráulico de Fuerza	4	4	16	Alto
Sistema de Lubricación	3	3	9	Medio
Sistema de Enfriamiento	2	3	6	Medio
Sistema de Alimentación y Descarga	2	2	4	Bajo

3.4.7 Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos muestran que el Sistema de Rodillos y Estructura, el Sistema de Accionamiento y Transmisión y el Sistema Hidráulico de Fuerza presentan los mayores niveles de criticidad dentro del HPGR. En razón de ello, estos sistemas fueron priorizados para el desarrollo del análisis mediante la metodología RCM.

La selección se fundamenta en que una falla en cualquiera de estos sistemas afecta directamente la capacidad del HPGR para desarrollar el proceso de conminución, generando interrupciones en la producción, incrementos en los costos de mantenimiento y una reducción de la disponibilidad operacional del equipo.

En contraste, los sistemas de lubricación, enfriamiento y alimentación–descarga obtuvieron niveles de criticidad medio y bajo. Esto se debe a que las fallas asociadas a estos sistemas, en la mayoría de los casos, pueden identificarse oportunamente mediante actividades de inspección, monitoreo y mantenimiento preventivo, evitando que evolucionen hasta comprometer el funcionamiento integral del equipo.

3.5. Aplicación del RCM

3.5.1. Contexto Operacional

De acuerdo con los resultados obtenidos del Análisis de Criticidad, la metodología RCM será implementada en el equipo HPGR (High Pressure Grinding Rolls), el cual forma parte del circuito de conminución de una planta concentradora. Este equipo cumple un rol crítico en la reducción de tamaño del mineral previo a las etapas posteriores del proceso, contribuyendo directamente a la eficiencia global de la planta y a la optimización del consumo energético.

El HPGR opera de manera continua como parte del proceso productivo, bajo condiciones severas de carga, presión y abrasión, propias del tratamiento de minerales. Su operación se encuentra a cargo del personal de operaciones de la planta concentradora, quienes trabajan en turnos rotativos y bajo procedimientos operativos estandarizados, cumpliendo con los lineamientos de seguridad, medio ambiente y calidad establecidos por la organización.

El régimen de operación del HPGR es de 24 horas diarias, durante los siete días de la semana, con detenciones programadas únicamente para actividades de mantenimiento planificado o paradas generales de planta. Actualmente, el mantenimiento aplicado al equipo contempla acciones preventivas y correctivas. El mantenimiento preventivo incluye inspecciones periódicas, lubricación de componentes críticos y monitoreo de variables operativas; mientras que el mantenimiento correctivo se ejecuta cuando ocurre una falla funcional que afecta la disponibilidad o el desempeño del equipo.

En relación con los repuestos, se consideran componentes críticos como rodillos, sistemas hidráulicos, válvulas, acumuladores, sellos, mangueras de alta presión y elementos eléctricos y de control, cuya disponibilidad resulta fundamental para reducir los tiempos de reparación y evitar paradas prolongadas del proceso productivo.

Tabla 14*Cuadro del contexto operacional por factores del HPGR*

DATOS TÉCNICOS DEL EQUIPO		IMAGEN
Nombre	HPGR – High Pressure Grinding Rolls	
Marca	FLsmith	
Modelo	HRC™ 3000 (referencial)	
Serie	HPGR-PL-2020	
Procedencia	Dinamarca	
Año de fabricación	2018	
ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO		
Potencia total	10 – 12 MW	
Peso	≈ 300 t	
Diámetro de rodillos	2.4 m	
Ancho de rodillos	1.7 m	
Tensión	6.6 kV	
Frecuencia	60 Hz	
ESPECIFICACIONES DEL MOTOR		
Tipo	Motor eléctrico AC	
Potencia unitaria	5 – 6 MW	
Frecuencia	60 Hz	
CONDICIONES GENERALES		
Actividad	Conminución de mineral	
Años de servicio	3 años	
Situación actual	Operativo	
CONDICIONES DE OPERACIÓN		
Turnos	3 turnos	
Horas de operación	24 h/día	
Tipo de material	Mineral sulfurado	
CONTEXTO OPERACIONAL		
Proceso	Continuo	
Redundancia	Parcial	
Estándares de seguridad	Sí – EPP y procedimientos	
MANTENIMIENTO		
Mantenimiento preventivo	Inspecciones, lubricación y monitoreo	
Mantenimiento correctivo	Cambio de rodillos y sistemas	
Tiempo promedio de reparación	2 – 4 semanas	
Repuestos críticos	Rodillos, válvulas, acumuladores, sellos	

Nota. Esta tabla representa la descripción del HPGR en su contexto operacional

3.6. Taxonomía del equipo

Para llevar a cabo el análisis del equipo HPGR bajo el enfoque del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), es indispensable desarrollar la taxonomía del equipo. Esta actividad consiste en establecer una clasificación estructurada y ordenada de sus elementos, organizándolos en distintos niveles jerárquicos. Dicha jerarquización permite comprender de manera integral la forma en que el HPGR opera, así como la relación funcional existente entre el equipo principal, sus sistemas y los componentes que lo conforman.

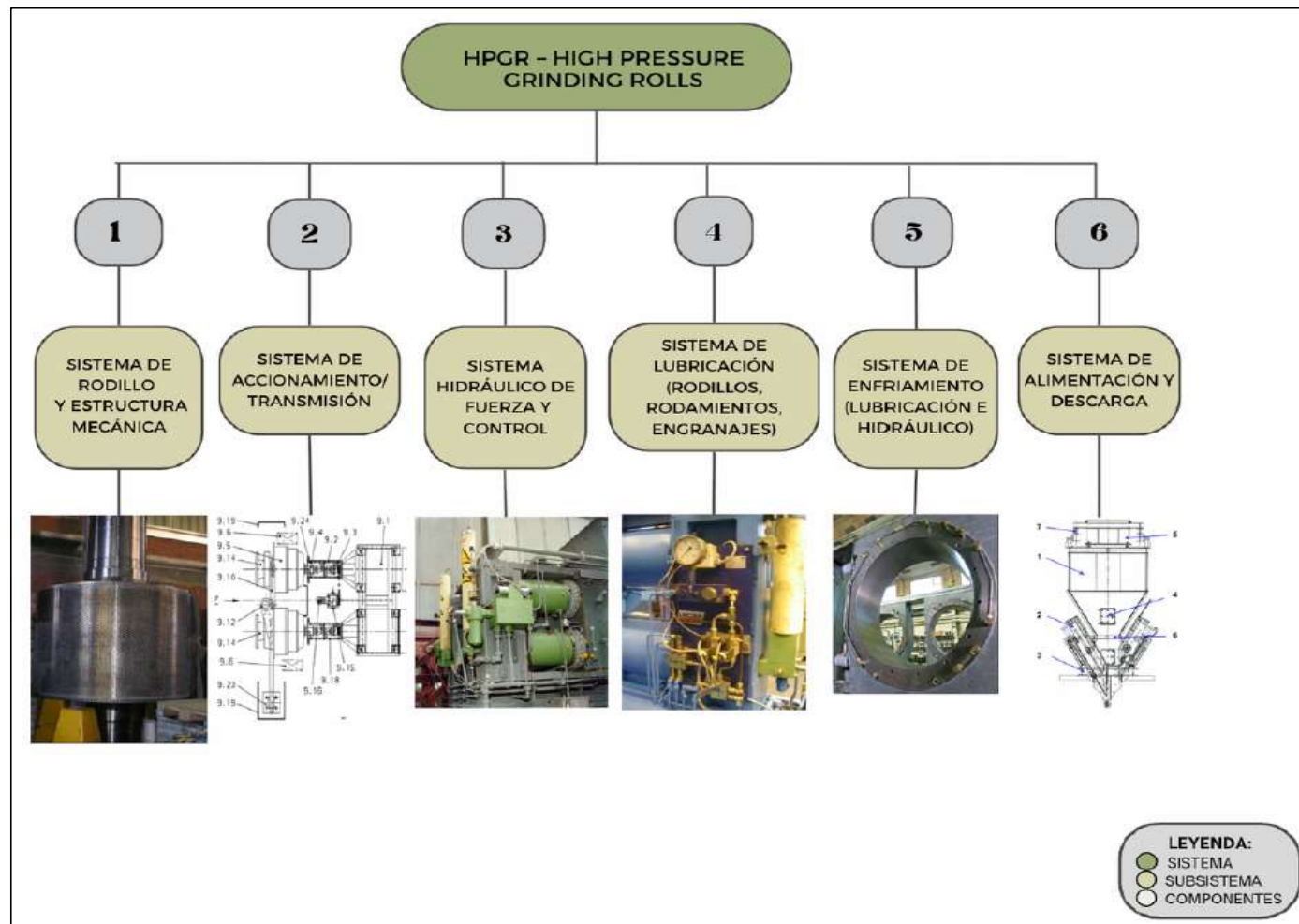
La taxonomía del HPGR facilita la identificación de los elementos críticos del equipo, permitiendo que el análisis RCM se realice de forma sistemática y coherente, desde el nivel más general hasta el más específico. Asimismo, esta estructura jerárquica constituye la base para el análisis de funciones, fallas, modos de falla y consecuencias, asegurando que la evaluación de confiabilidad se encuentre alineada con las condiciones reales de operación del equipo en una planta concentradora.

3.6.1. Taxonomía obtenida del equipo HPGR

La aplicación

Figura 26

Análisis Taxonómico realizado al equipo HPGR



Nota. La figura muestra el análisis Taxonómico que se utilizara para el estudio RCM Tomado de: “Elaboración Propia”

Figura 27

Sistema de rodillo y estructura metálica

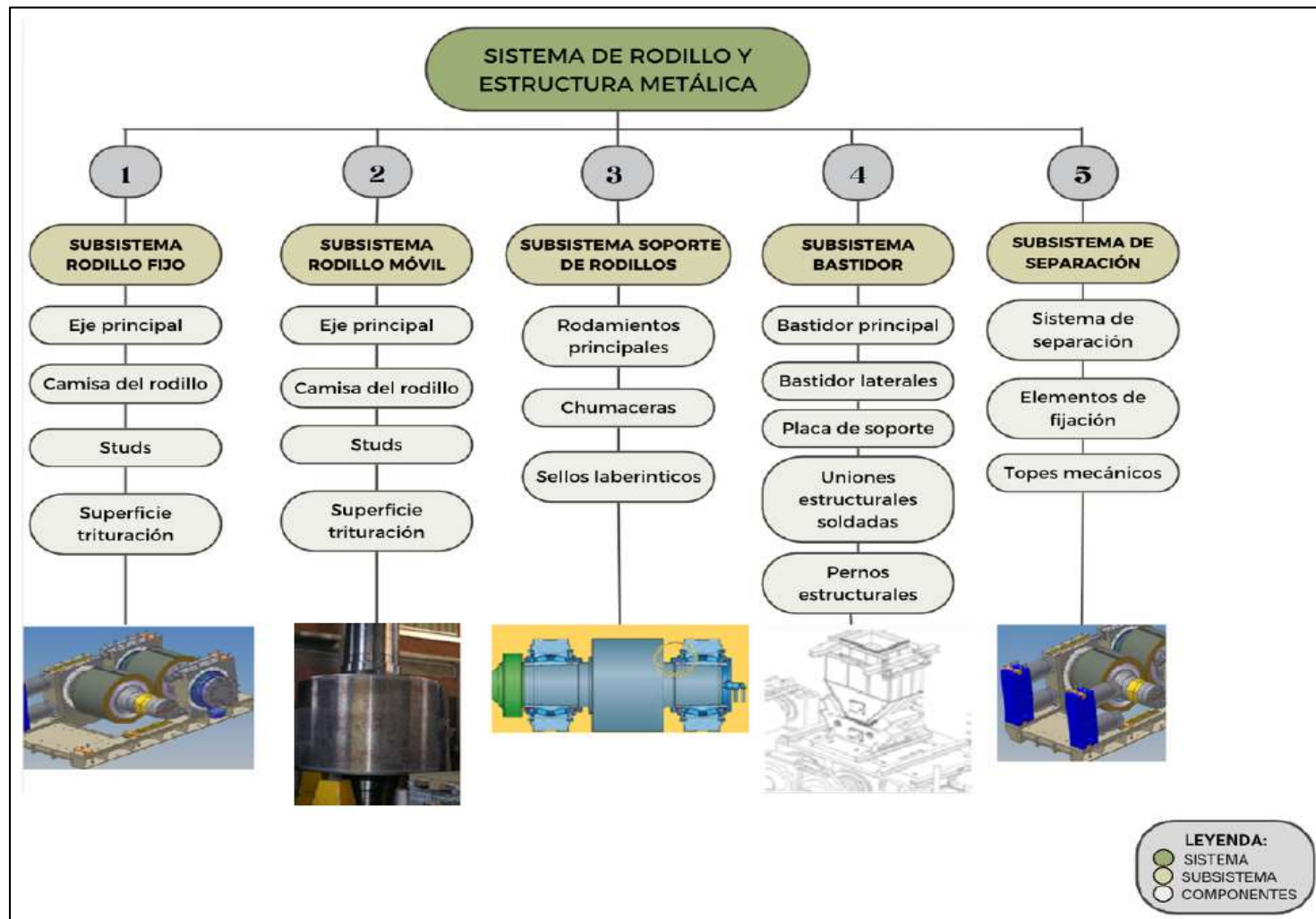


Figura 28

Sistema de accionamiento/transmisión

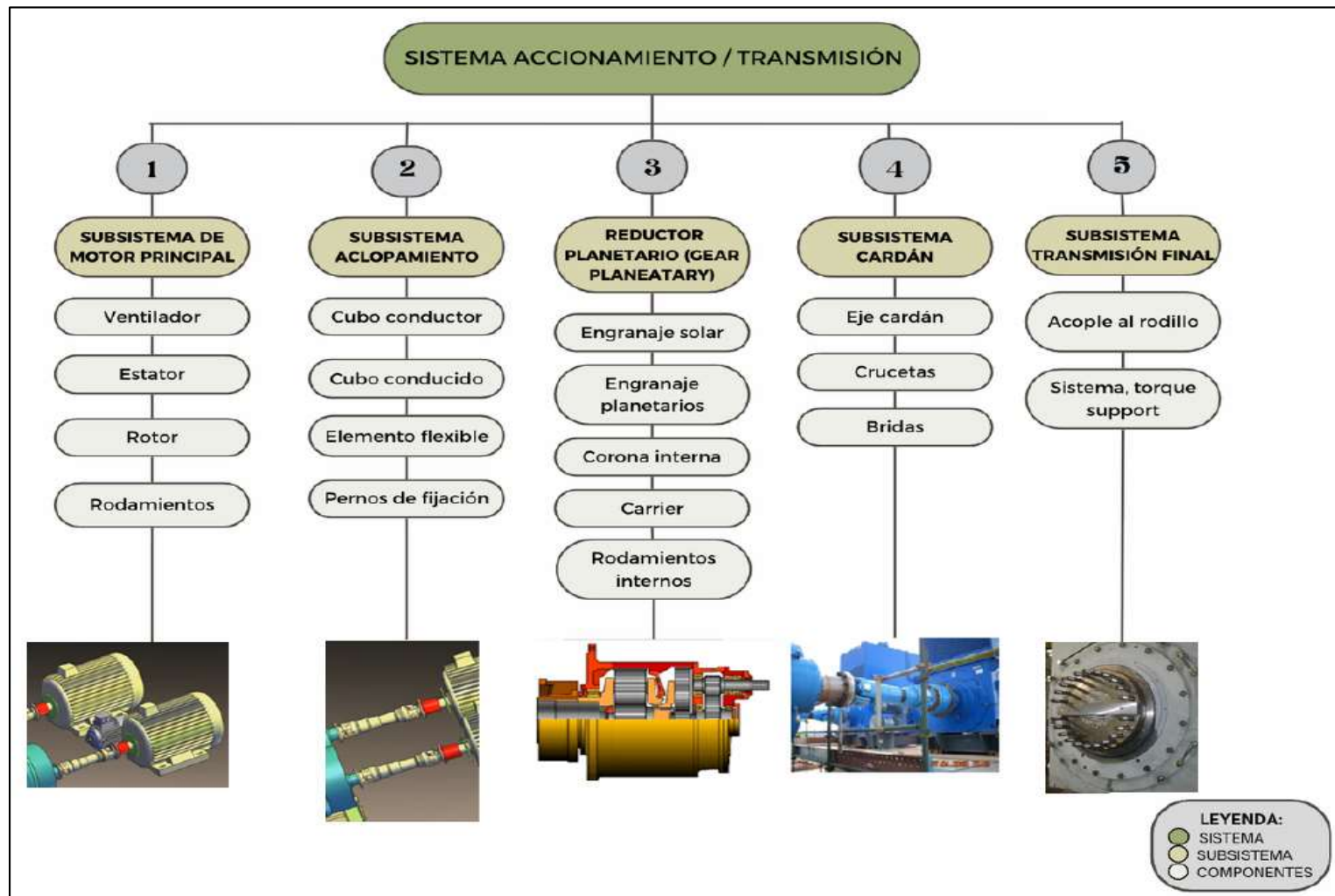


Figura 29

Sistema hidráulico de fuerza y control

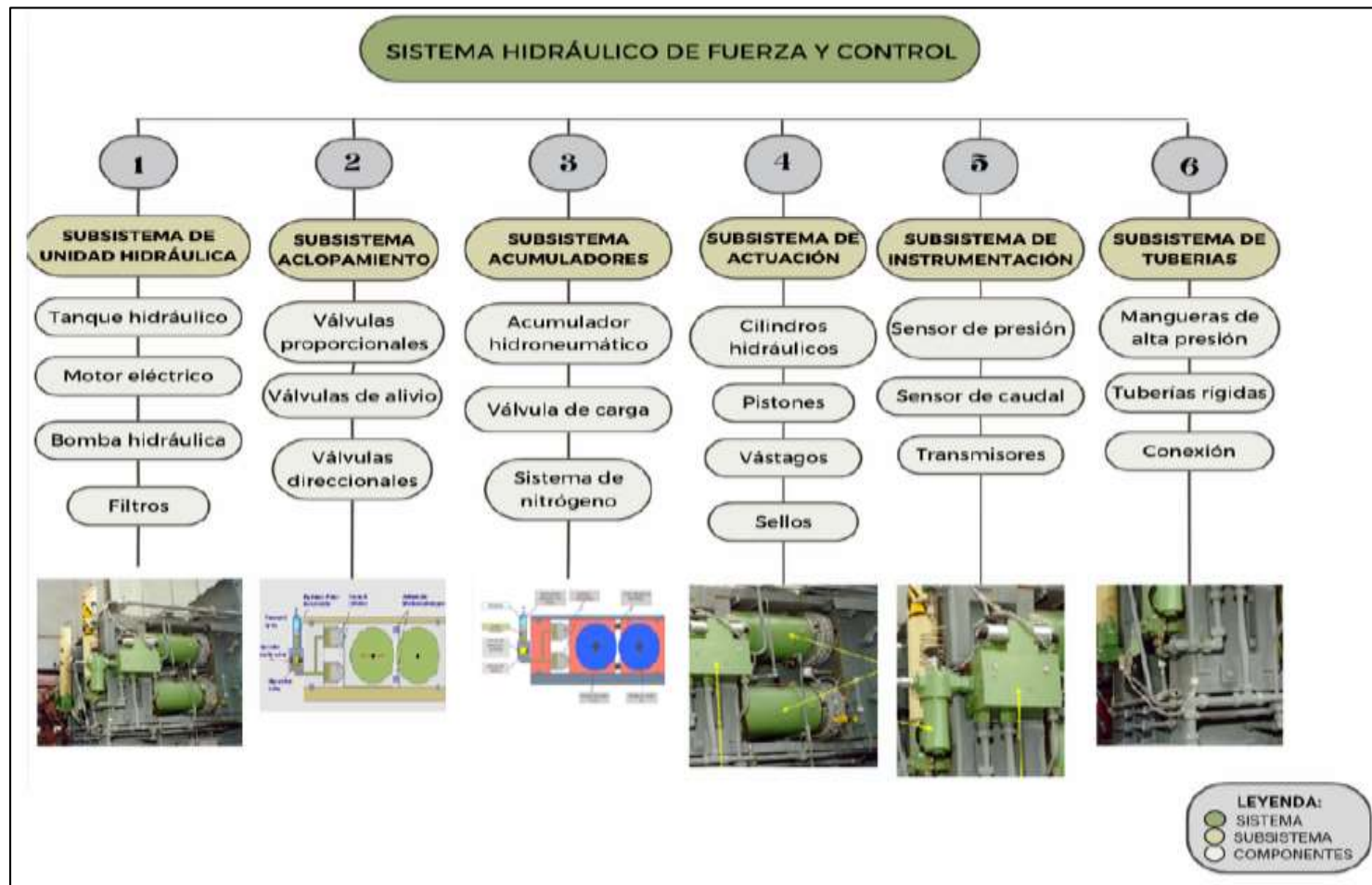


Figura 30

Sistema de lubricación (rodillos, rodamientos, engranajes)

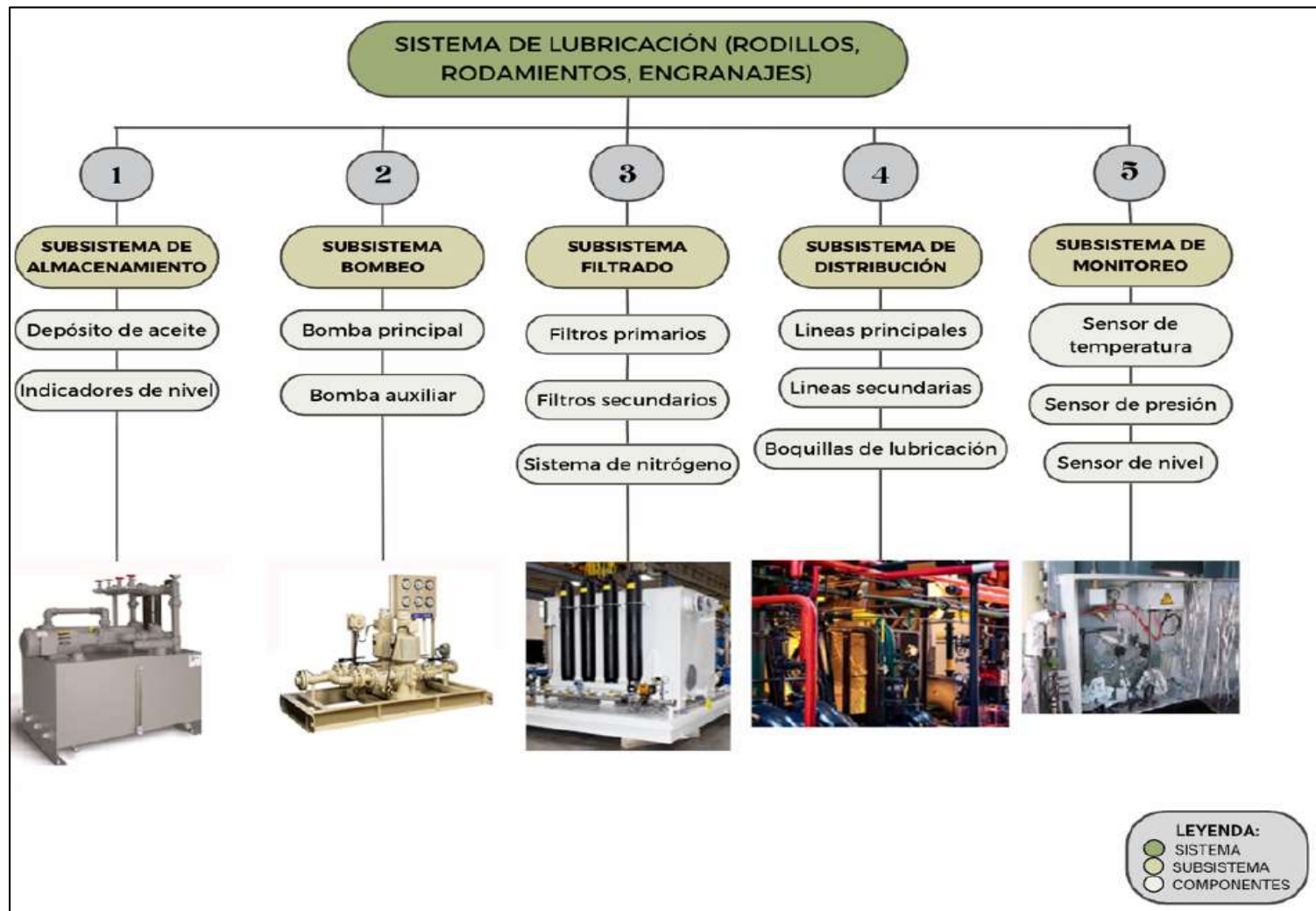


Figura 31

Sistema de enfriamiento (Lubricación e hidráulico)

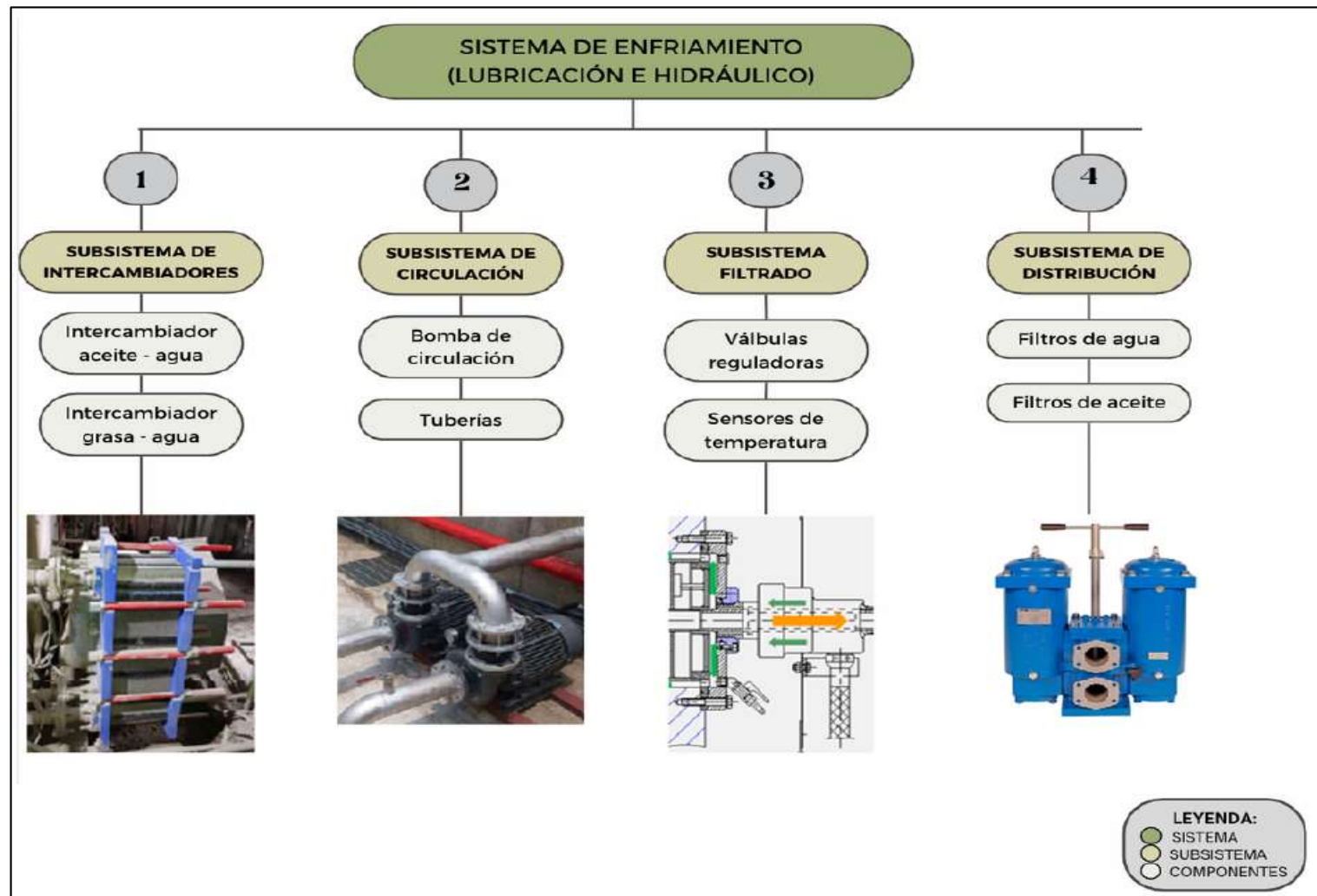
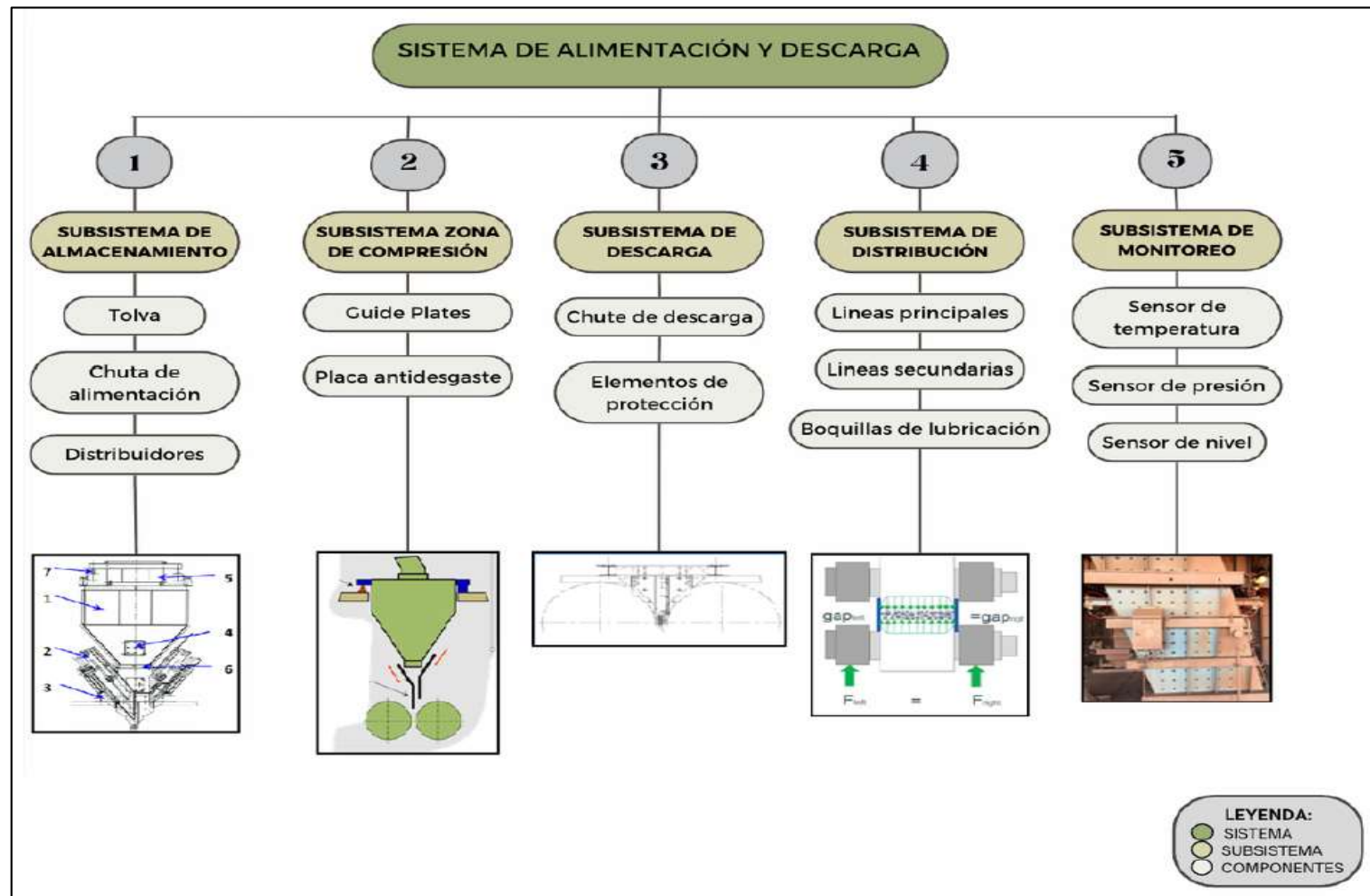


Figura 32

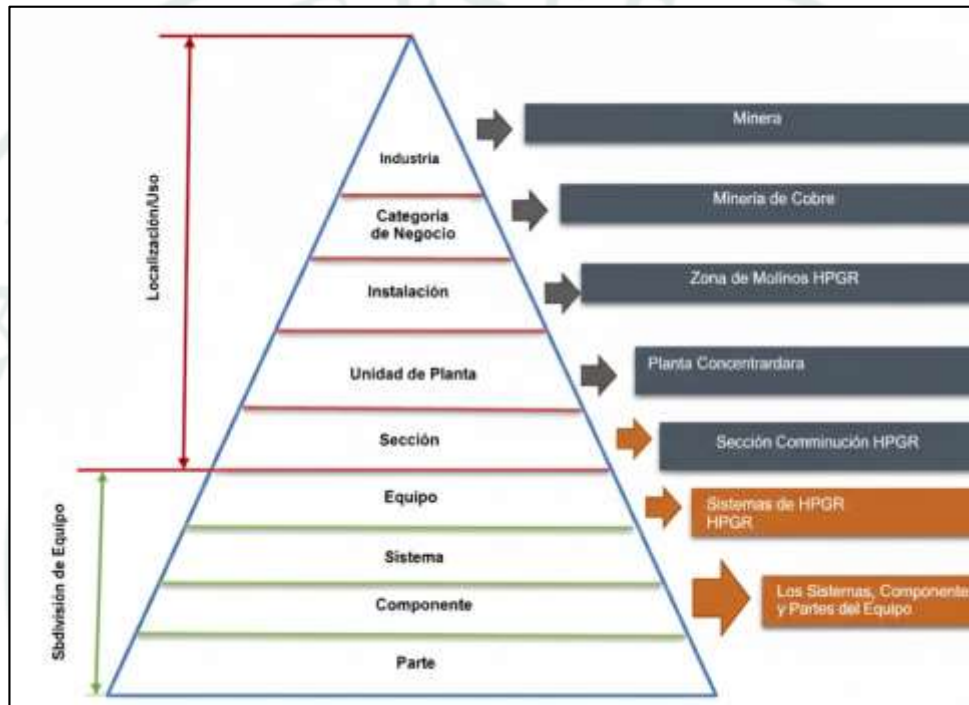
Sistema de alimentación y descarga



En ese sentido, a continuación, se presenta la pirámide jerárquica correspondiente a la taxonomía definida para el HPGR, la cual será utilizada como soporte metodológico para la implementación del RCM en el equipo objeto de estudio.

Figura 33

Pirámide jerárquica de taxonomía para la implementación del RCM para de HPGR.



Nota. La figura muestra la Pirámide la cual emplearemos como guía para poder desarrollar la implementación del RCM
Tomado de: “Elaboración Propia”

3.7. Función primaria del HPGR

El Molino de Rodillos de Alta Presión (HPGR, por sus siglas en inglés) tiene como función principal la reducción del tamaño del mineral mediante la aplicación de altas presiones de compresión entre dos rodillos que giran en sentidos opuestos. Este mecanismo genera un proceso de conminución distinto al de los molinos convencionales, ya que la energía se transmite de manera directa a un lecho de partículas, produciendo fracturas internas y microfisuras en el mineral. Como resultado, se obtiene un producto con una granulometría más uniforme y con una mayor liberación de minerales valiosos. Esta característica permite que el HPGR sea utilizado como alternativa o complemento a las etapas de trituración y molienda, contribuyendo a una mayor eficiencia energética del circuito de conminución y a la reducción del consumo específico de energía en planta.

3.8. Funciones secundarias del HPGR

3.8.1. Función secundaria Ecología

El HPGR debe operar minimizando su impacto ambiental durante todas las etapas de funcionamiento. Esto implica controlar la generación de polvo fino producto de la conminución, evitar fugas de fluidos hidráulicos o lubricantes al ambiente y mantener niveles de ruido dentro de los límites permitidos por la normativa vigente. Asimismo, el equipo debe permitir la correcta gestión de residuos asociados al mantenimiento, como grasas, aceites usados y componentes desgastados, contribuyendo al cumplimiento de los estándares ambientales establecidos en la planta concentradora.

3.8.2. Función secundaria Seguridad

El HPGR debe garantizar condiciones seguras para el personal de operación y mantenimiento. Para ello, el equipo debe contar con protecciones físicas, resguardos mecánicos y sistemas que eviten el acceso involuntario a zonas de riesgo durante su operación. Además, debe permitir la ejecución segura de actividades de inspección, ajuste y mantenimiento, reduciendo la probabilidad de accidentes asociados a atrapamientos, sobrepresiones hidráulicas o fallas mecánicas repentinas.

3.8.3. Función secundaria Control

Debe permitir el monitoreo y control adecuado de las variables críticas de operación, tales como presión de molienda, velocidad de los rodillos, consumo energético y condiciones del sistema hidráulico. Esta función secundaria asegura que el equipo opere dentro de los parámetros de diseño, facilitando la detección temprana de desviaciones que puedan derivar en fallas, pérdida de eficiencia o daños prematuros en los componentes principales.

3.8.4. Función secundaria Apariencia

Debe mantener una condición física y estructural adecuada que refleje un estado operativo aceptable. Esto incluye la conservación de la pintura, el orden de los componentes visibles y la ausencia de deformaciones, corrosión excesiva o deterioro evidente. Si bien esta función no impacta directamente en el proceso, una buena apariencia del equipo contribuye a la identificación temprana de anomalías y refuerza las buenas prácticas de mantenimiento dentro de la planta.

3.8.5. Función secundaria Protección

El HPGR debe proteger sus propios componentes frente a condiciones operativas adversas, como sobrecargas, ingreso de material no triturable o variaciones extremas en el régimen de trabajo. Esta función se cumple mediante sistemas de alivio de presión, mecanismos de ajuste de separación entre rodillos y dispositivos que absorben esfuerzos excesivos, evitando daños estructurales y prolongando la vida útil del equipo.

3.8.6. Función secundaria Eficiencia

Debe operar de manera eficiente en términos energéticos y operacionales, asegurando un consumo de potencia acorde al tonelaje procesado y a la granulometría requerida. Asimismo, debe contribuir a la estabilidad del proceso aguas abajo, entregando un producto consistente que optimice el desempeño de las etapas posteriores de clasificación y molienda. El cumplimiento de esta función secundaria permite maximizar la disponibilidad del equipo y reducir costos asociados a reprocesos y paradas no programadas.

3.9. Función primaria de los Sistema rodillo estructura

Transmitir y soportar las fuerzas mecánicas necesarias para la conminución del mineral, manteniendo la alineación, rigidez estructural y estabilidad de los rodillos durante la operación continua del HPGR.

3.9.1. Función secundaria de los Sistema rodillo estructura Seguridad

Garantizar la estabilidad mecánica del conjunto rodillo–estructura, evitando desplazamientos, vibraciones excesivas o fallas estructurales que puedan poner en riesgo al personal y a la integridad del equipo.

3.9.2. Función secundaria de Sistema rodillo estructura Protección

Proteger los rodillos y la estructura frente a sobrecargas mecánicas, impactos del mineral y esfuerzos anormales que puedan generar deformaciones permanentes o daños prematuros.

3.9.3. Función secundaria de los Sistema rodillo estructura Eficiencia

Contribuir a una adecuada transmisión de cargas y distribución uniforme de esfuerzos, permitiendo una molienda eficiente, reducción homogénea del mineral y menor desgaste de los rodillos.

3.9.4. Función primaria del Sistema Accionamiento y transmisión

Proporcionar y transmitir la potencia mecánica necesaria desde el motor hasta los rodillos del HPGR, asegurando la velocidad, torque y sincronización requeridos para el proceso de conminución.

3.10. Función secundaria del Sistema Accionamiento y transmisión Control

Permitir la regulación de la velocidad de rotación, el torque aplicado y la respuesta del sistema ante variaciones de carga, asegurando una operación estable y controlada del HPGR.

3.10.1. Función secundaria del Sistema Accionamiento y transmisión Seguridad

Prevenir daños al equipo y riesgos operacionales mediante sistemas de protección ante sobrecargas, bloqueos o fallas en la transmisión de potencia.

3.10.2. Función secundaria del Sistema Accionamiento y transmisión Eficiencia

Debe optimizar el consumo energético del equipo, garantizando una transmisión eficiente de potencia con mínimas pérdidas mecánicas.

3.11. Función primaria del Sistema Hidráulico de fuerza

Generar y regular la presión hidráulica necesaria para aplicar la fuerza de compresión requerida entre los rodillos del HPGR, asegurando una adecuada reducción del tamaño del mineral.

3.12. Función secundaria del Sistema Hidráulico de fuerza Control

Regular de manera precisa la presión de trabajo, permitiendo ajustes automáticos o manuales en función de las características del mineral y las condiciones operativas.

3.12.1. Función secundaria del Sistema Hidráulico de fuerza Seguridad

Actuar como sistema de alivio ante sobrepresiones o presencia de cuerpos extraños, evitando daños estructurales, fallas graves del equipo y riesgos para el personal.

3.12.2. Función secundaria del Sistema Hidráulico de fuerza Protección

Debe Proteger los componentes mecánicos del HPGR frente a cargas extremas o transitorias, absorbiendo impactos y reduciendo esfuerzos excesivos.

3.12.3. Función secundaria del Sistema Hidráulico de fuerza Eficiencia

Contribuir a una operación estable del proceso de conminución, manteniendo una presión óptima que favorezca la eficiencia energética y el desempeño del equipo.

3.13. Análisis de fallas total y parcial del equipo

Luego de definir las funciones primarias y secundarias del HPGR, se procede a la identificación de las fallas totales y parciales asociadas al equipo y a cada uno de sus sistemas. Este proceso permite reconocer las posibles pérdidas de función durante la operación. El cuadro siguiente presenta de manera resumida la información desarrollada en las hojas RCM de la presente investigación.

Tabla 15

Cuadro de fallas totales y parciales del HPGR

Equipo	Función Primaria	Falla Total Función Primaria	Falla Parcial Función Primaria	Tipo de Función Secundaria	Función Secundaria	Falla Total Función Secundaria	Falla Parcial Función Secundaria
HPGR	Reducir el tamaño del mineral mediante compresión interparticular.	No logra la reducción del tamaño del mineral.	La reducción del tamaño es inferior a la requerida medida.	Ecología	Controlar derrames, emisiones de polvo y niveles de ruido.	Genera derrames y emisiones fuera de límites permitidos.	Control parcial de polvo, ruido o derrames.
				Seguridad	Proteger al personal durante la operación y mantenimiento.	Genera condiciones inseguras para el personal.	Riesgos controlados parcialmente durante la operación.
				Control	Regular presión, velocidad y alimentación del equipo.	No permite el control de variables operativas.	Control inestable de las variables del proceso.
				Apariencia	Mantener condiciones adecuadas de orden e iluminación.	Condiciones inadecuadas de orden y limpieza.	Deficiencias parciales de orden e iluminación.
				Protección	Contar con sistemas de protección y emergencia.	No dispone de sistemas de protección operativos.	Sistemas de protección operativos de forma parcial.
				Eficiencia	Operar con consumo energético y disponibilidad adecuados.	Consumo energético elevado y baja disponibilidad.	Eficiencia operativa reducida.

Nota. Esta tabla representa las fallas parciales y totales del equipo HPGR

Tabla 16

Cuadro de fallas totales y parciales de los sistemas rodillo-estructura del HPGR

EQUIPO	FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA TOTAL DE LA FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA PARCIAL DE LA FUNCIÓN PRIMARIA	TIPO DE FUNCIÓN SECUNDARIA	FUNCIÓN SECUNDARIA	FALLA TOTAL DE LA FUNCIÓN SECUNDARIA	FALLA PARCIAL DE LA FUNCIÓN SECUNDARIA
HPGR – Sistema Rodillo y Estructura	Aplicar presión mecánica uniforme sobre el mineral para su conminución eficiente.	No se logra la conminución del mineral.	Conminución irregular o incompleta.	SEGURIDAD / EFICIENCIA	Mantener estabilidad estructural y alineamiento de rodillos durante la operación.	Riesgo de colapso estructural o parada total del equipo.	Vibraciones o desalineamientos controlables.

Nota. Esta tabla representa las fallas parciales y totales de los sistemas del HPGR

Tabla 17

Cuadro de fallas totales y parciales de los sistemas accionamiento-transmisión del HPGR

EQUIPO	FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA TOTAL DE LA FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA PARCIAL DE LA FUNCIÓN PRIMARIA	TIPO DE FUNCIÓN SECUNDARIA	FUNCIÓN SECUNDARIA	FALLA TOTAL DE LA FUNCIÓN SECUNDARIA	FALLA PARCIAL DE LA FUNCIÓN SECUNDARIA
HPGR – Sistema Accionamiento y Transmisión	Transmitir potencia y velocidad adecuada a los rodillos.	Los rodillos no giran.	Pérdida parcial de velocidad o torque.	CONTROL / EFICIENCIA	Regular velocidad, sincronización y transmisión de potencia.	Pérdida total del control de giro.	Variaciones de velocidad sin detener el proceso.

Nota. Esta tabla representa las fallas parciales y totales de los sistemas del HPGR

Tabla 18

Cuadro de fallas totales y parciales de los sistemas hidráulico - fuerza del HPGR

EQUIPO	FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA TOTAL DE LA FUNCIÓN PRIMARIA	FALLA PARCIAL DE LA FUNCIÓN PRIMARIA	TIPO DE FUNCIÓN SECUNDARIA	FUNCIÓN SECUNDARIA	FALLA TOTAL DE LA FUNCIÓN SECUNDARIA	FALLA PARCIAL DE LA FUNCIÓN SECUNDARIA
HPGR – Sistema Hidráulico de Fuerza	Generar y mantener la presión hidráulica requerida.	No se aplica presión al mineral.	Presión inestable o insuficiente.	PROTECCIÓN / ECOLOGÍA	Evitar fugas y proteger componentes hidráulicos.	Fuga severa o falla hidráulica total.	Fugas menores o pérdida gradual de presión.

Nota. Esta tabla representa las fallas parciales y totales de los sistemas del HPGR

Como resultado del análisis desarrollado mediante la metodología RCM, se elaboró una matriz consolidada que integra las funciones analizadas, las fallas funcionales, los modos de falla identificados, las consecuencias asociadas y las tareas de mantenimiento propuestas para los sistemas críticos del HPGR. Esta matriz resume las decisiones adoptadas durante el proceso de análisis y constituye la base para la formulación del plan de mantenimiento propuesto

3.14. Matriz RCM consolidada

Tabla 19
Matriz HPGR

|--|

94

3	Garantizar condiciones seguras para operadores y mantenedores.	A	El equipo representa un riesgo inmediato para las personas.	1	Ausencia o rotura de resguardos mecánicos.	Se produce una exposición directa a rodillos que giran a baja rpm pero con alto torque, lo que genera un riesgo elevado de atrapamiento severo.	3	A	1	N	S	N	S	S							S	-Inspección resguardos -Checklist seguridad -Inspección estructural -Reparación inmediata -Implementación enclavamientos	Inspección operador = Diario Inspección mecánica = Semanal Reparación = Inmediata Rediseño = Mejora	-Operador -Mecánico -Seguridad Industrial -Ingeniería -Confiabilidad
3		A		2	Falla del sistema de parada de emergencia.	El equipo no se detiene ante una situación de emergencia, lo que incrementa severamente el riesgo de accidente.	3	A	2	S	S	N	S	S							S	-Prueba parada emergencia -Inspección botoneras -Prueba sistema seguridad -Verificación cableado -Redundancia sistema	Prueba operador = Diario Inspección botoneras = Semanal Prueba sistema seguridad = Mensual Inspección cableado = Trimestral Rediseño = Mejora	-Operador -Electricista -Instrumentista -Seguridad Industrial -Ingeniería -Confiabilidad
3		A		3	Sobrepresión hidráulica sin alivio operativo.	Se registra una presión superior a 250 MPa, lo que genera riesgo de explosión de la línea y posible fractura estructural del sistema.	3	A	3	S	S	S	S	S							S	-Monitoreo presión -Prueba válvula alivio -Calibración sensores -Inspección mangueras -Verificación PLC -Rediseño doble alivio	Monitoreo presión = Continuo Inspección mangueras = Mensual Calibración sensores = Trimestral Prueba válvula alivio = Semestral Verificación PLC = Semestral Rediseño = Mejora	-Operador -Mecánico -Instrumentista -Hidráulico -Ingeniería -Confiabilidad
3		A		4	Bloqueo inadecuado durante mantenimiento (LOTO deficiente).	Se produce una energización inesperada del sistema, lo que genera un alto riesgo de accidente fatal.	3	A	4	S	S	N	S	S							S	-Verificación LOTO -Prueba energía cero -Auditoría LOTO -Capacitación -Rediseño puntos bloqueo	Verificación LOTO = Cada intervención Prueba energía cero = Cada intervención Auditoría LOTO = Mensual Capacitación = Anual Rediseño = Mejora	-Operador -Mecánico -Predictivo -Ingeniería Confiabilidad
3		B	Reducción de condiciones seguras sin riesgo inmediato crítico.	1	Señalización de advertencia deteriorada.	Disminución de percepción del riesgo.	3	B	1	N	S	N	N	S								-Inspección señalización -Reposición señalización -Limpieza señalización -Auditoría seguridad	Inspección = Mensual Reposición = A condición Limpieza = Mensual Auditoría = Trimestral	-Operador -Seguridad
3		B		2	Iluminación insuficiente en zona de inspección.	Mayor probabilidad de error humano.	3	B	2	N	S	N	S	S								-Inspección iluminación -Reposición luminarias -Limpieza luminarias -Mejora iluminación	Inspección = Mensual Reposición = A condición Limpieza = Mensual Mejora = Según necesidad	-Operador -Mantenimiento eléctrico -Seguridad -Ingeniería
3		B		3	Sensores de puerta interlock intermitentes.	Riesgo potencial de ingreso con equipo energizado.	3	B	3	N	S	N	S	S								-Inspección sensores interlock -Prueba funcional -Ajuste sensores -Reemplazo sensores	Inspección = Mensual Prueba funcional = Mensual Ajuste = A condición Reemplazo = A condición	-Instrumentación -Eléctrico -Seguridad
4	Permitir monitoreo y control continuo de variables críticas.	A	Pérdida total del monitoreo y control operacional.	1	Falla del PLC principal.	Se produce una pérdida total de la automatización, lo que provoca que el equipo entre en estado seguro y se ejecute una parada automática.	4	A	1	N	N	N	S	S	S							-Inspección gabinete PLC -Limpieza gabinete -Verificación fuente -Backup PLC -Verificación red	Inspección gabinete = Mensual Limpieza gabinete = Trimestral Verificación fuente = Semestral Backup PLC = Semestral Comunicación red = Trimestral	-Instrumentación -Automatización -Electricista -Confiabilidad
4		A		2	Falla de sensores de presión principales.	El sistema no puede regular la presión, lo que conduce a una operación fuera de especificación y a la activación de protecciones por falla de señal.	4	A	2	N	N	N	S	S	S							-Verificación señal sensores -Calibración sensores -Inspección cableado -Limpieza sensores -Verificación redundancia	Verificación señal = Mensual Calibración = Semestral Inspección cableado = Trimestral Limpieza sensores = Semestral Verificación redundancia = Semestral	-Instrumentación -Automatización -Eléctrico -Confiabilidad
4		A		3	Pérdida de comunicación con sistema SCADA.	Operación sin supervisión centralizada.	4	A	3	N	N	N	S	S								-Verificación comunicación SCADA -Inspección red industrial -Verificación servidores -Backup SCADA -Prueba redundancia	Verificación comunicación → Mensual Inspección red = Trimestral Verificación servidores = Mensual Backup SCADA = Semestral Prueba redundancia = Semestral	-Automatización -Instrumentación -TI Industrial -Confiabilidad
4		B	Monitoreo impreciso o limitado.	1	Sensor de presión descalibrado.	Se presenta un error de ±5-15 MPa, generando que la fuerza real sea distinta a la indicada y provocando ineficiencia energética en la operación.	4	B	1	S	N	N	S	S	S							-Verificación precisión -Calibración sensor -Revisión tendencias -Inspección física	Verificación precisión = Trimestral Calibración = Semestral Revisión tendencias = Mensual Inspección física = Semestral	-Instrumentación -Operación -Confiabilidad
4		B		2	Tacómetro con señal inestable.	Se presenta una variación de rpm del orden de ±2-5%, generando diferencia de velocidad entre rodillos y un consecuente aumento del desgaste.	4	B	2	S	N	N	S	S	S							-Verificación señal tacómetro -Inspección sensor -Verificación cableado -Calibración tacómetro -Comparación velocidades	Verificación señal = Mensual Inspección sensor = Trimestral Cableado = Trimestral Calibración = Semestral Comparación velocidades = Mensual	-Instrumentación -Confiabilidad -Operación
4		B		3	Sensor de temperatura con deriva.	Detección tardía de sobrecalentamiento.	4	B	3	S	N	N	S	S	S							-Verificación tendencias temperatura -Comparación sensores -Calibración sensor -Inspección física -Análisis técnico	Verificación tendencias = Mensual Comparación sensores = Mensual Calibración = Semestral Inspección física = Semestral Análisis técnico = Mensual	-Instrumentación -Confiabilidad -Operación
5	Protege los componentes ante sobrecargas o condiciones anormales.	A	El sistema no protege al equipo frente a sobrecargas.	1	Válvula de alivio hidráulica bloqueada.	Daño estructural por sobrepresión.	5	A	1	S	S	S	S								S	-Prueba válvula alivio -Verificación presión apertura -Inspección válvula -Análisis aceite hidráulico -Inspección filtración	Prueba válvula = Anual Inspección válvula = Semestral Análisis aceite = Trimestral Inspección filtración = Mensual	-Mantenimiento hidráulico -Confiabilidad -Mantenimiento mecánico
5		A		2	Sistema de retracción del rodillo inoperativo. Proteger los componentes ante sobrecargas o condiciones anormales	Daño severo ante ingreso de material no triturable.	5	A	2	S	S	S	S								S	-Prueba retracción rodillo -Verificación desplazamiento -Inspección cilindros -Verificación sensores -Análisis aceite	Prueba retracción = Mensual Sensores posición = Mensual Inspección cilindros = Trimestral Análisis aceite = Trimestral	-Mantenimiento hidráulico -Instrumentación -Confiabilidad -Mantenimiento mecánico
5		A		3	Falla en sistema de detección de sobrecarga.	Fractura prematura de componentes.	5	A	3	S	S	S	S								S	-Instrumentación -Automatización -Confiabilidad -Mantenimiento hidráulico	Prueba detección = Mensual Verificación sensores = Mensual Simulación sobrecarga → Trimestral Calibración sensores → Semestral	-Instrumentación -Automatización -Confiabilidad -Mantenimiento hidráulico

[illegible]

Tabla 20
Matriz SIS rodillo estructura

								HOJA DE DECISIÓN RCM				SISTEMA / ACTIVO				SISTEMA N				Facilitador				Fecha		Hoja
EQUIPO: SISTEMA ESTRUCTURA RODILLO												SUB - SISTEMA / COMPONENTE				SUB-SISTEMA N										De
AREA : MOLIENDA																										

1		B	7	Incremento progresivo de vibración axial	Indica la presencia de desalineación o desgaste interno, lo que acelera la fatiga en los rodamientos y aumenta el riesgo de una falla catastrófica del sistema.	1	B	7	N	N	N	S	S	S			-Análisis espectral vibracional -Temperatura rodamientos -Inspección alineación rodillos -Evaluación condición rodamientos -Corrección de desalineamiento	Temperatura = Diario Vibraciones = Mensual Espectro = Mensual Alineación = Semestral Intervención = Según condición	-Operaciones -Confidencialidad -Mantenimiento
2	Garantizar la estabilidad mecánica del conjunto rodillo-estructura, evitando desplazamientos, vibraciones excesivas o fallas estructurales que puedan poner en riesgo al personal y a la integridad del equipo	A	1	Falla por fatiga acumulada en zonas de concentración de esfuerzos (soldaduras principales, uniones rígidas, zonas de apoyo de cilindros hidráulicos)	La pérdida inmediata de integridad estructural genera una desalineación súbita entre rodillos, provocando transferencia descontrolada de cargas hacia el eje y los rodamientos y pudiendo derivar en el colapso parcial o total del equipo.	2	A	1	N	S	N	S	S	S			-Inspección END en zonas críticas -Inspección visual estructural crítica -Monitoreo vibracional estructural -Inspección soportes de cilindros hidráulicos -Refuerzo estructural, reparación soldadura	Vibraciones = Mensual Inspección visual = Trimestral Soportes = Semestral END = Anual	-Confidencialidad -Mantenimiento
2		A	2	Falla catastrófica eje rodillo, fractura por fatiga torsional y flexional combinada, iniciada en zonas de transición geométrica o chaveteros.	La separación violenta del rodillo respecto al sistema de transmisión provoca la liberación súbita de la energía elástica acumulada, generando un desbalance extremo del conjunto rotativo y posible expulsión de fragmentos metálicos.	2	A	2	N	S	N	O	S	S			-Monitoreo vibracional del eje -Análisis espectral -Temperatura rodamientos -Inspección END al eje -Control de alineación de rodillos -Reemplazo eje programado	Temperatura Rodamientos= Diario Vibraciones = Mensual Espectro = Mensual Alineación = Semestral END eje → Anual	-Operaciones -Confidencialidad -Mantenimiento
2		A	3	Colapso total de rodamientos principales, falla por fatiga superficial (Rodamientos principales de HPGR pueden soportar cargas dinámicas superiores a 3,000-8,000 kN, por lo que la pérdida de película lubricante genera daño acelerado).	El bloqueo súbito del rodillo por gripado genera un incremento instantáneo del torque en la transmisión, acompañado de vibraciones superiores a 15 mm/s RMS y una elevación térmica abrupta mayor a 100 °C, con posible desperdiciamiento de componentes internos.	2	A	3	N	S	N	S	S	S			-Monitoreo vibracional rodamientos -Análisis espectral en rodamientos fallas -Temperatura rodamientos -Análisis de aceite (contaminación-desgaste) -Inspección sistema lubricación -Reemplazo rodamientos según condición	Temperatura = Diario Vibraciones = Mensual Espectro = Mensual Revision aceite = Mensual / Trimestral Lubricación = Mensual	-Operaciones -Confidencialidad -Mantenimiento
2		A	4	Rotura de pernos estructurales críticos	Se produce una redistribución inmediata de la carga que genera deformación repentina del bastidor y una pérdida brusca de alineación, haciendo necesaria la parada inmediata del equipo.	2	A	4	N	S	N	S	S	S			-Verificación torque en perno críticos -Inspección estructural en uniones -Monitoreo vibracional estructural -Evaluación pernos elongación/dano -Reemplazo pernos críticos	Inspección = Mensual Vibraciones = Mensual Torque = Trimestral Evaluación pernos = Semestral	-Mantenimiento -Confidencialidad
2		B	1	Vibraciones por sobre rango permisible	Se registran niveles sostenidos de vibración del orden de 10-12 mm/s RMS, lo que acelera el daño por fatiga y favorece el aflojamiento progresivo de los pernos estructurales.	2	B	1	N	N	N	S	S	S			-Monitoreo vibracional -Análisis espectral -Inspección pernos estructural -Alineación y balance -Corrección dinámica	Vibraciones = Mensual / continuo Espectro = Mensual Pernos = Mensual Alineación = Semestral	-Confidencialidad -Mantenimiento
2		B	2	Falla en sistema de emergencia Interruptores defectuosos, circuito de seguridad puenteado, falla en PLC de seguridad o relés certificados (SIL).	La imposibilidad de detener el HPGR ante vibración crítica, sobrepresión o falla estructural permite la continuación del giro bajo una condición insegura, generando un aumento exponencial del daño mecánico y un incremento severo del riesgo de accidente fatal.	2	B	2	S	S	N	S			S	-Prueba paradas emergencia -Verificación circuito seguridad -Inspección PLC de seguridad -Prueba relés de seguridad SIL -Auditoría bypass o puentes	Prueba E-stop = Mensual Circuito seguridad = Mensual PLC = Trimestral Relés SIL = Semestral Auditoría bypass = Mensual	-Operaciones -Instrumentación -Mantenimiento -Seguridad	
2		B	3	Fisuras superficiales en soldaduras	Se presenta una propagación lenta de la grieta bajo carga cíclica, con posible transición hacia una fractura frágil si la condición no es detectada y controlada oportunamente.	2	B	3	N	S	N	N	S	S			-Inspección visual soldaduras -END soldaduras -Monitoreo vibracional estructural -Inspección zonas críticas -Reparación soldaduras (cuando se detecta fisura)	Visual = Mensual Zonas críticas = Trimestral END = Semestral Vibraciones = Mensual	-Mantenimiento -Confidencialidad
2		B	4	Aflojamiento incipiente de pernos	Se produce un desplazamiento leve bajo carga que genera un incremento de las tensiones dinámicas en el sistema.	2	B	4	N	N	N	S	S	S			-Verificación torque de pernos -Inspección visual de uniones estructurales -Monitoreo vibracional estructural -Resapiete controlado pernos -Aplicación control de torque	Inspección = Mensual Vibraciones = Mensual Torque = Trimestral Resapiete = Según condición	-Mantenimiento -Confidencialidad
2		B	5	Desalineación leve del bastidor	Se presentan cargas excentricas que generan concentración de esfuerzos en un lado, acelerando la fatiga estructural del equipo.	2	B	5	N	N	N	S	S	S			-Medición alineación del bastidor -Monitoreo vibracional -Monitoreo empujezta rodamientos -Inspección pernos estructurales -Corrección alineación	Temperatura = Diario Vibraciones = Mensual Vibraciones = Mensual Pernos = Mensual Alineación = Semestral	-Operaciones -Confidencialidad -Mantenimiento
3	Proteger los rodillos y la estructura frente a sobrecargas mecánicas, impactos del mineral y esfuerzos anormales que puedan generar deformaciones permanentes o daños prematuros.	A	1	No absorbe impacto de intrituable	Un pico de presión no amortiguado transmite el impacto directamente al bastidor, lo que puede generar una fisura inmediata en la estructura.	3	A	1	N	S	N	S	S	S			-Monitoreo presión hidráulica -Verificación válvulas de alivio -Inspección acumuladores hidráulicos -Pruebas sistema alivio -Control limitables (detector de metales / trampas)	Presión = Continuo Válvulas = Mensual Acumuladores = Mensual Pruebas = Trimestral	-Operaciones -Mantenimiento
3		A	2	Deformación plástica permanente del bastidor tras sobrecarga	El cambio irreversible de geometría provoca pérdida permanente de paralelismo y requiere una reparación mayor del equipo.	3	A	2	N	S	N	S	S	S			-Monitoreo presión Hidráulica -Verificación sistema alivio -Inspección estructural del bastidor -Medición alineación -Reparación bastidor	Presión = Continuo Sistema alivio = Mensual Inspección = Trimestral Alineación = Semestral	-Operaciones -Mantenimiento
3		B	1	Rigidez estructural reducida por fatiga	La mayor flexión bajo carga nominal provoca un incremento de la concentración de esfuerzos y una disminución del margen de seguridad del sistema.	3	B	1	S	S	N	S	S		S	-Monitoreo vibracional estructural -Análisis deflexión estructural -Inspección END estructural -Inspección estructural detallada -Evaluación integridad estructural	Vibraciones = Mensual Inspección = Semestral END = Anual Evaluación = Parada mayor	-Confidencialidad -Mantenimiento	
4	Contribuir a una adecuada transmisión de cargas y distribución uniforme de esfuerzos, permitiendo una molinenda eficiente, reducción homogénea del mineral y menor desgaste de los rodillos	A	1	Contacto no uniforme extremo entre rodillos	Se generan zonas sin compresión efectiva, lo que provoca ineficiencia severa en la reducción y sobrepresión localizada.	4	A	1	N	N	N	S	S	S			-Monitoreo presión hidráulica distribuida -Control granulometría (P80) -Monitoreo consumo energético -Inspección desgaste rodillos -Verificación alineación de rodillos -Corrección perfil de rodillos	Presión = Continuo P80 = Diario Energía = Diario Inspección = Mensual Alineación = Semestral	-Operaciones -Mantenimiento
4		B	1	Flexión leve del eje bajo carga	El incremento de torque requerido provoca un mayor consumo energético por tonelada y favorece la fatiga progresiva del eje.	4	B	1	N	S	N	S	S	S			-Monitoreo consumo energía -Monitoreo vibraciones eje -Análisi distribución de carga -Alineación de rodillos -Inspección eje	Energía = Diario Vibraciones = Mensual Presión = Mensual Inspección = Trimestral Alineación = Semestral	-Operaciones -Confidencialidad -Mantenimiento

Tabla 21
Matriz SIS accionamiento y transmisión

				HOJA DE DECISION RCM		SISTEMA / ACTIVO			SISTEMA N		Facilitador		Fecha		Hoja			
EQUIPO: SISTEMA ACCIONAMIENTO Y TRANSMISION						SUB - SISTEMA / COMPONENTE			SUB-SISTEMA N						De			
AREA : MOLIENDA				Referencia de Información		Evaluación de las consecuencias			Tareas "A falta de"			Tareas Propuestas		Frecuencia Inicial		A realizar por		
									H1 H2 H3 S1 S2 S3									
									O1 O2 O3 N1 N2 N3			H4 H5 S4						
FUNCION				FALLA FUNCIONAL		MODO DE FALLA(causa de falla)		EFEECTO DE FALLA		F FF MF		H S E O		N1 N2 N3 H4 H5 S4				
1	Proporcionar y transmitir la potencia mecánica necesaria desde el motor hasta los rodillos del HPGR, asegurando la velocidad, torque y sincronización requeridos para el proceso de cominación.	A	El sistema no transmite potencia al rodillo.	1	Falla del motor principal:Falla eléctrica interna (cortocircuito entre espiras, degradación de aislamiento Clase F/H, sobrecorriente >110% In), rotor bloqueado, falla en ventilación forzada, daño en rodamientos del motor o disparo por protección diferencial.	1	A	1	N	N	N	S	S	S	-Monitoreo corriente del motor -Monitoreo temperatura bobinados -Análisis vibraciones motor -Prueba resistencia aislamiento -Inspección rodamientos del motor -Inspección sistema de Ventilación -Overhaul del motor	Corriente = Continuo Temperatura = Continuo Vibraciones = Mensual Rodamientos = Trimestral Aislamiento = Semestral Ventilación = Mensual	-Operaciones -Confiable -Mantenimiento	
1		A		2	Rotura de acople Falla por fatiga torsional acumulada, sobre torque (>150% nominal), desalineación angular >0.5°, falla de elementos elásticos o fractura de cubos.	1	A	2	N	S	N	S	S	S	-Análisis vibración torsional -Verificación alineación láser -Inspección acople(elementos elásticos) -Monitoreo torque/carga -Reemplazo elementos de acople	Torque = Continuo Vibraciones = Mensual Inspección = Trimestral Alineación = Semestral	-Operaciones -Confiable -Mantenimiento	
1		A		3	Rotura de engranajes planetarios, fractura del carrier, colapso de rodamientos internos o gripado por pérdida de lubricación.	1	A	3	N	S	N	S	S	S	-Análisis de aceite (ISO + ferografía) -Monitores de vibraciones del reductor -Monitoreo Temperatura GearBox -Inspección sistema de lubricación -Overhaul del reductor	Temperatura = Diario Aceite = Mensual Vibraciones = Mensual Lubricación = Mensual	-Operaciones -Confiable -Mantenimiento	
1		B	El sistema transmite potencia con degradación.	1	Desgaste de engranajes: Pitting, microspitting o scuffing por mala lubricación o sobrecarga cíclica.	1	B	1	N	N	N	S	S	S	-Análisis Vibración engane -Monitores temperatura aceite -Análisis de aceite (ISO + partículas metálicas) -Verificación sistema Lubricación -Control viscosidad y densidad aceite -Reacondicionamiento de engranajes / overhaul	Temperatura = Diario Vibraciones = Mensual Aceite = Mensual Lubricación = Mensual	-Operaciones -Confiable -Mantenimiento	
1		B		2	Desalineación del acopleparalela (>0.2 mm) o angular (>0.3-0.5°).	1	B	2	N	N	N	S	S	S	-Alineación láser de acoples -Análisis vibración axial -Monitores temperatura rodamientos -Inspección acople -Verificación pernos y bases -Corrección de alineación	Temperatura = Diario Vibraciones = Mensual Inspección = Trimestral Alineación = Semestral	-Operaciones -Confiable -Mantenimiento	
1		B		3	Lubricación deficiente del reductor debido nivel bajo de aceite, contaminación con agua >0.1%, falla en bomba auxiliar o filtros colmatados.	1	B	3	N	N	N	S	S	S	-Monitoreo Temperatura aceite -Verificación Nivel aceite -Análisis de aceite -Inspección Filtros -Bomba auxiliar -Cambio aceite	Temperatura = Diario Nivel = Semanal Aceite = Mensual Filtros = Mensual	-Operaciones -Confiable -Mantenimiento	
2	Permitir la regulación de la velocidad de rotación, el torque aplicado y la respuesta del sistema ante variaciones de carga, asegurando una operación estable y controlada del HPGR	A	No permite regular velocidad ni torque.	1	Falla total del VFD, falla en IGBT, sobrevoltaje, armónicos excesivos o falla de refrigeración.	2	A	1	N	N	N	S	S	S	-Monitoreo alarmas VFD -Monitoreo de temperatura VFD -Inspección sistema Refrigeración -Análisis calidad de energía -Inspección de conexiones -Mantenimiento VFD	Alarmas = Continuo Temperatura = Diario Refrigeración = Mensual Energía = Trimestral	-Operaciones -Confiable -Mantenimiento	
2		B	Regulación inestable.	1	Sensor de torque descalibrado: Deriva electrónica >5%, mala señal analógica (4-20 mA), interferencia electromagnética.	2	B	1	S	N	N	S	S	S	-Calibración sensor de torque -Verificación señal 4-20 mA -Comparación variables (torque vs presión) -Inspección cableado y conexiones	Tendencias = Mensual Señal = Trimestral Calibración = Semestral	- Instrumentación -Confiable	
3	Prevenir daños al equipo y riesgos operacionales mediante sistemas de protección ante sobrecargas, bloqueos o fallas en la transmisión de potencia.	A	No actúan protecciones ante sobrecarga.	1	Protección térmica inoperativa,Termistores dañados o puenteados, relé mal configurado.	3	A	1	S	S	N	S	S	S	-Prueba funcional de protección térmica -Verificación termistores -Chequeo configuración relé -Comparación temperatura vs disparo -Inspección cableado	Prueba funcional = Trimestral Verificación = Semestral Monitoreo = Mensual	- Instrumentación -Confiable	
3		B	Protección con respuesta tardía.	1	Relé térmico fuera de ajuste como configurado por encima de 115% In.	3	B	1	S	S	N	S	S	S	-Prueba funcional relé térmico -Verificación setpoints de relé -Comparación corriente/disparo -Monitoreo temperatura de motor -Calibración relés	Temperatura = Continuo Comparación = Mensual Pruebas = Trimestral Calibración = Anual	-Operaciones - Instrumentación -Mantenimiento eléctrico	
4	Debe optimizar el consumo energético del equipo, garantizando una transmisión eficiente de potencia con mínimas pérdidas mecánicas	A	Pérdidas excesivas de potencia.	1	Dientes de engranajes fracturados o desgaste >30% del perfil.	4	A	1	N	S	N	S	S	S	-Análisis vibraciones del gearbox -Monitoreo de consumo energético -Análisis de aceite y partículas metálicas -Monitoreo temperatura gearbox -Inspección boroscopia de engranajes -Overhaul o reemplazo de engranajes	Energía = Diario Temperatura = Diario Vibraciones = Mensual Aceite = Mensual Boroscopia = Anual	-Operaciones -Confiable -Mantenimiento	
4		B	Pérdidas mecánicas progresivas.	1	Desgaste superficial de engranajes, como se le conoce como Microspitting generalizado.	4	B	1	N	N	N	S	S	S	-Análisis de vibraciones del gearbox -Monitoreo de consumo energético (kWh/t) -Análisis de aceite y ferografía -Monitoreo de temperatura del reductor -Verificación de viscosidad y lubricación -Inspección boroscópica de engranajes	Energía = Diario Temperatura = Diario Vibraciones = Mensual Aceite = Mensual Boroscopia = Anual	-Operaciones -Confiable -Mantenimiento	

Tabla 22
Matriz SIS hidráulico de fuerza

				HOJA DE DECISIÓN RCM		SISTEMA / ACTIVO SUB- SISTEMA/ COMPONENTE				SISTEMA N SUB-SISTEMA N		Facilitador		Fecha		Hoja De																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
EQUIPO: SISTEMA HIDRAULICO DE FUERZA				Referencia de Información		Evaluación de las consecuencias		H1 H2 H3		Tareas "A falta de"		Tareas Propuestas		Frecuencia Inicial		A realizar por																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
								S1 S2 S3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
AREA : MOLENDA								O1 O2 O3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
FUNCION				FALLA FUNCIONAL		MODO DE FALLA(causa de falla)		EFECTO DE FALLA		F		FF		MF		H		S		E		O		N1		N2		N3		H4		H5		S4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1	Generar y regular la presión hidráulica necesaria para aplicar la fuerza de compresión requerida entre los rodillos del HPGR, asegurando una adecuada reducción del tamaño del mineral.			A	Generar y regular presión de compresión.	1	Falla de bomba hidráulica,Gripado por contaminación, cavitación, falla de sello mecánico, desgaste severo de pistones o daño en motor eléctrico de accionamiento.	La pérdida total de presión en el circuito (por debajo del 10% de la presión nominal) deja a los rodillos sin fuerza de compresión efectiva, provocando que la presión específica caiga por debajo del mínimo operativo (por ejemplo, <50 MPa), lo que hace que el HPGR entre en condición de protección y se detenga automáticamente, con una consecuencia operacional directa de producción igual a 0 t/h.	1	A	1	N	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S

3.14.1. Tareas de mantenimiento obtenidas

La aplicación de la metodología Reliability Centered Maintenance (RCM) permitió definir las actividades de mantenimiento más apropiadas para mitigar los modos de falla identificados en los tres sistemas de mayor criticidad del HPGR. A partir del análisis realizado, las tareas fueron organizadas de acuerdo con la estrategia de mantenimiento que mejor responde a las características de cada modo de falla, clasificándose en actividades predictivas, preventivas, inspecciones programadas, búsqueda de fallas y acciones orientadas al rediseño cuando estas resultaron técnicamente justificadas.

El mayor número de tareas correspondió al mantenimiento predictivo, lo cual se relaciona con las condiciones de operación del HPGR y con la importancia de anticipar el deterioro de sus componentes críticos. La detección temprana de anomalías permite planificar las intervenciones antes de que ocurra una falla funcional, disminuyendo la probabilidad de paradas imprevistas y contribuyendo a mantener una mayor disponibilidad operacional del equipo.

Tabla 23

Tipo de tarea RCM

Tipo de tarea RCM	Cantidad
Mantenimiento predictivo (monitoreo de condición)	23
Inspecciones programadas	8
Mantenimiento preventivo programado	5
Búsqueda de fallas (Failure Finding)	1
Rediseño / mejora de ingeniería	1
Total	38

Tabla 24

Tipo de tarea

Tipo de tarea	Cantidad	%
Predictivo	23	60,5 %
Inspecciones	8	21,1 %
Preventivo	5	13,2 %
Failure Finding	1	2,6 %
Rediseño	1	2,6 %
Total	38	100 %

3.14.2. Tareas de mantenimiento obtenidas

Como resultado de la aplicación de la metodología Reliability Centered Maintenance (RCM), se definieron 38 tareas de mantenimiento para controlar los modos de falla

identificados en los sistemas críticos del HPGR. Estas tareas fueron clasificadas de acuerdo con la estrategia de mantenimiento más conveniente para cada caso, agrupándose en actividades predictivas, inspecciones programadas, mantenimiento preventivo, búsqueda de fallas (Failure Finding) y acciones de rediseño.

Del total de tareas obtenidas, 23 corresponden al mantenimiento predictivo, lo que representa el 60,5 %. Este resultado muestra que la propuesta se orienta principalmente al monitoreo de la condición de los componentes críticos mediante técnicas como el análisis de vibraciones, el monitoreo de temperatura, el análisis de aceite, la medición de la presión del sistema hidráulico y la aplicación de ensayos no destructivos. La alta proporción de este tipo de actividades se debe a la criticidad del HPGR, donde resulta más conveniente detectar el deterioro de los componentes antes de que se presente una falla que obligue a detener el equipo.

Las inspecciones programadas representan el 21,1 % de las tareas definidas. Estas actividades están dirigidas a verificar periódicamente el estado de componentes como elementos estructurales, pernos, sellos, mangueras, sistemas de lubricación y otros elementos cuya condición puede evaluarse mediante inspecciones visuales o pruebas funcionales, permitiendo identificar oportunamente posibles anomalías.

Por su parte, el mantenimiento preventivo concentra el 13,2 % de las tareas propuestas. Dentro de esta categoría se incluyen actividades planificadas como el reemplazo de componentes con una vida útil conocida, la recalibración de equipos y la ejecución de mantenimientos mayores programados para conservar el desempeño del HPGR.

Asimismo, se definió una tarea de búsqueda de fallas (Failure Finding), cuyo propósito es comprobar periódicamente el correcto funcionamiento de dispositivos de protección que, durante la operación normal, pueden presentar fallas que no son fácilmente detectables. De igual manera, se planteó una acción de rediseño para eliminar una causa de falla recurrente que no puede controlarse únicamente mediante actividades de mantenimiento.

En términos generales, la distribución de las tareas evidencia que la propuesta de mantenimiento se orienta principalmente hacia un enfoque basado en condición. Esto permite anticipar la aparición de fallas, planificar las intervenciones con mayor oportunidad y reducir la ocurrencia de paradas no programadas, contribuyendo así a mejorar la confiabilidad, la disponibilidad y el desempeño operativo del HPGR.

3.14.3. Metodología empleada

Para este análisis se utiliza un enfoque cualitativo–cuantitativo basado en criterios empleados en investigaciones y tesis sobre gestión de mantenimiento en plantas de procesamiento. Los parámetros evaluados son:

Probabilidad de falla, considerando el comportamiento histórico del equipo y la severidad de sus condiciones de operación.

Impacto en la producción, atendiendo al tiempo perdido ante una detención imprevista.

Riesgo para el personal, especialmente en componentes asociados a energía hidráulica y transmisión.

Costo de reparación o reemplazo, tomando como referencia los repuestos críticos del equipo.

Tiempo promedio de recuperación (MTTR), según experiencias documentadas en plantas con equipos similares.

Cada criterio se valora en una escala que permite clasificar el nivel de criticidad general del HPGR.

3.15. Resultados del análisis

Los resultados obtenidos indican que el HPGR presenta una criticidad alta, debido a que su detención afecta de manera directa la capacidad de producción. Este resultado es consistente con estudios previos donde las plantas que emplean HPGR dependen del flujo continuo hacia etapas como la molienda o la clasificación.

Los hallazgos más relevantes son:

El riesgo de falla en los rodillos es significativo debido a las altas presiones y a la abrasión del mineral.

El sistema hidráulico tiene impacto elevado por ser responsable del ajuste de fuerza y apertura de la zona de compresión.

La transmisión y el motor principal representan un punto crítico por su costo y el tiempo requerido para reemplazos mayores.

El impacto económico de una parada no programada es alto, especialmente en operaciones donde el HPGR actúa como cuello de botella.

Estos aspectos justifican la necesidad de un plan de mantenimiento estructurado y preventivo.

3.15.1. Clasificación de componentes críticos

Con base en la evaluación, los componentes del HPGR se agrupan en tres niveles:

Críticos (alta prioridad): rodillos, sistema hidráulico, rodamientos principales, motor, transmisión y sistema de control

Importantes (prioridad media): sellos, sistema de lubricación, líneas hidráulicas secundarias y elementos estructurales.

No críticos (baja prioridad): cubiertas de protección, barandas y elementos auxiliares.

Esta clasificación permite definir el tipo de estrategia de mantenimiento a aplicar para cada componente, alineando recursos y tiempos de intervención con la importancia real del equipo.

3.15.2 Implicancias para el plan de mantenimiento

Al ser un equipo de alta criticidad, el HPGR requiere:

Rutinas de inspección frecuentes, especialmente en rodillos, rodamientos y sistemas hidráulicos.

Mantenimiento predictivo, aprovechando tecnologías como análisis de vibraciones, monitoreo de presión y revisión de temperatura.

Gestión de repuestos críticos, asegurando la disponibilidad de componentes de mayor impacto.

Capacitación constante del personal, dado que tareas inadecuadas pueden acelerar el desgaste o provocar fallas.

Con esta información, el plan de mantenimiento puede orientarse a reducir la probabilidad de fallas inesperadas y mantener el nivel de confiabilidad que exige la operación.

3.15.3 Integración de Lean Maintenance en la propuesta de mantenimiento

La aplicación de la metodología RCM permitió reconocer las funciones más críticas del HPGR, así como los principales modos de falla asociados y las actividades de mantenimiento más convenientes para mantener la confiabilidad operativa del equipo. No obstante, establecer tareas de mantenimiento no asegura por sí mismo una ejecución eficiente de las intervenciones, especialmente en equipos de elevada criticidad, donde los tiempos de parada, la gestión de recursos y la coordinación de las actividades influyen directamente en la continuidad de la producción.

Bajo este enfoque, la propuesta desarrollada incorpora los principios de Lean Maintenance como complemento de la metodología RCM, buscando optimizar la ejecución de

las labores de mantenimiento, minimizar desperdicios operacionales y elevar la disponibilidad del HPGR dentro del proceso de conminución.

La combinación de ambas metodologías permite plantear un sistema de mantenimiento orientado no solo a garantizar la confiabilidad técnica del equipo, sino también a incrementar la eficiencia operativa de las intervenciones. Mientras el RCM establece qué actividades deben ejecutarse de acuerdo con la criticidad y las consecuencias de las fallas, Lean Maintenance aporta herramientas para mejorar la planificación, organización y ejecución de dichas actividades.

3.15.3.1 Identificación de desperdicios en las actividades de mantenimiento

Durante el análisis de las actividades de mantenimiento vinculadas al HPGR se detectaron diversas situaciones que ocasionan pérdidas operativas y reducen la eficiencia en la ejecución de las intervenciones. Estas condiciones están asociadas a desperdicios operacionales reconocidos dentro de la filosofía Lean, los cuales repercuten de manera directa en los tiempos de detención y en la disponibilidad operativa del equipo.

Entre los desperdicios más relevantes identificados destacan las demoras originadas por la falta de disponibilidad de repuestos críticos, los desplazamientos innecesarios del personal para localizar herramientas y materiales, los retrabajos derivados de procedimientos no estandarizados y los tiempos improductivos generados durante la ejecución de mantenimientos correctivos no programados.

Tabla 25

Identificación de desperdicios

Desperdicio Lean	Situación identificada
Espera	Demoras por disponibilidad de repuestos críticos
Movimiento innecesario	Búsqueda de herramientas y equipos
Sobreproceso	Inspecciones repetitivas sin estandarización
Defectos	Retrabajos por actividades incorrectas
Inventario	Falta o exceso de repuestos críticos
Paradas no planificadas	Intervenciones correctivas de emergencia

La detección de estos desperdicios permite enfocar la propuesta hacia una gestión de mantenimiento más eficiente, orientada a disminuir los tiempos improductivos y optimizar el aprovechamiento de los recursos disponibles.

3.15.3.2 Aplicación de herramientas Lean Maintenance

Con la finalidad de fortalecer las estrategias de mantenimiento establecidas mediante la metodología RCM, se plantea la incorporación de herramientas Lean enfocadas en optimizar la ejecución de las actividades críticas asociadas al HPGR.

3.15.3.3 Desarrollo de la propuesta de implementación Lean

La incorporación de herramientas Lean Maintenance dentro del plan de mantenimiento propuesto para el HPGR se establece como un complemento operativo del análisis RCM desarrollado previamente. Mientras la metodología RCM permitió determinar las funciones críticas del equipo, los modos de falla y las actividades de mantenimiento más apropiadas para conservar su confiabilidad, Lean Maintenance contribuye a optimizar la ejecución de dichas actividades mediante la reducción de desperdicios operacionales y el fortalecimiento de la planificación del mantenimiento.

La propuesta se encuentra enfocada en reducir los tiempos improductivos durante las intervenciones de mantenimiento, optimizar la disponibilidad de recursos y estandarizar las actividades asociadas a los sistemas críticos del HPGR, principalmente aquellos relacionados con los rodillos, el sistema de transmisión y el sistema hidráulico de fuerza.

La implementación planteada contempla la aplicación de herramientas Lean directamente en actividades reales de mantenimiento ejecutadas en equipos HPGR, considerando como referencia las problemáticas recurrentes identificadas en procesos de conminución de alta presión, donde las paradas no programadas y las fallas en componentes críticos ocasionan importantes pérdidas en la disponibilidad operacional del equipo.

La aplicación de esta metodología contribuirá a disminuir los tiempos destinados a la búsqueda de herramientas y materiales, además de mejorar el orden y la limpieza de las zonas de intervención, permitiendo que las actividades de mantenimiento se ejecuten de manera más ágil y segura.

Dentro de las acciones propuestas se incluyen las siguientes:

- Clasificación de herramientas de acuerdo con su especialidad y función.
- Implementación de estaciones de trabajo organizadas.
- Identificación visual de equipos, componentes y conexiones hidráulicas.
- Control y organización del almacenamiento de repuestos críticos.
- Estandarización de las áreas destinadas al mantenimiento.

3.15.3.3.1 Implementación de metodología 5S en actividades de mantenimiento

La aplicación de la metodología 5S se plantea inicialmente en las áreas de mantenimiento vinculadas al HPGR, especialmente en los espacios destinados al almacenamiento de herramientas hidráulicas, instrumentos de medición, equipos de monitoreo vibracional y repuestos considerados críticos para la operación.

Durante las actividades de mantenimiento relacionadas con el cambio de studs, inspecciones del sistema hidráulico o monitoreo de rodamientos, gran parte de los tiempos improductivos suele generarse por la búsqueda de herramientas, el traslado de equipos y la preparación de materiales antes de iniciar las intervenciones. Por esta razón, se propone la implementación de estaciones de trabajo organizadas y kits de mantenimiento definidos previamente de acuerdo con el tipo de actividad a ejecutar.

La propuesta contempla las siguientes acciones:

- Clasificación de herramientas de acuerdo con su especialidad mecánica, hidráulica y predictiva.
- Implementación de paneles visuales que faciliten la rápida identificación de herramientas.
- Codificación visual de líneas hidráulicas y conexiones consideradas críticas.
- Organización de repuestos críticos según la frecuencia de intervención.
- Definición de áreas específicas para equipos de monitoreo y sistemas de lubricación.

Por ejemplo, durante las inspecciones programadas del sistema hidráulico, el personal podría contar anticipadamente con kits organizados que incluyan manómetros calibrados, conexiones hidráulicas, herramientas especializadas y formatos de inspección, evitando pérdidas de tiempo relacionadas con la preparación y búsqueda de materiales durante la ejecución de la intervención.

La implementación de esta herramienta contribuiría a reducir tiempos improductivos, mejorar las condiciones de seguridad durante las actividades de mantenimiento y disminuir errores asociados a la manipulación de herramientas y componentes.

3.15.3.3.2 Implementación de principios SMED para reducción de tiempos de parada

Debido a la elevada criticidad operacional del HPGR dentro del circuito de conminución, las actividades de mantenimiento mayor generan una influencia directa sobre la

continuidad de la producción en planta. Entre las intervenciones de mayor impacto se encuentran el cambio de rodillos, reemplazo de studs, alineamiento mecánico y mantenimiento del sistema hidráulico, debido a que demandan tiempos prolongados de parada del equipo.

Las etapas que se deben seguir para la implementación del SMED son:

- Identificación de actividades críticas.
- Separación de actividades internas y externas.
- Conversión de actividades internas en externas.
- Estandarización de secuencias de trabajo.
- Optimización del tiempo total de intervención.

Con el objetivo de disminuir estos tiempos de intervención, se propone la aplicación de principios SMED (Single Minute Exchange of Die), mediante la diferenciación entre actividades internas y externas durante la ejecución del mantenimiento.

La propuesta considera como actividades externas aquellas que pueden desarrollarse antes de detener el HPGR, entre las cuales se incluyen:

- Preparación anticipada de herramientas y equipos de izaje.
- Verificación de disponibilidad de repuestos críticos.
- Revisión previa de procedimientos de intervención.
- Coordinación anticipada entre las áreas de mantenimiento y operaciones.
- Preparación de kits hidráulicos y herramientas de torque antes de la intervención.

Por otro lado, las actividades internas corresponden a tareas que necesariamente deben ejecutarse con el equipo detenido, tales como:

- Desmontaje de rodillos.
- Reemplazo de studs.
- Alineamiento de componentes mecánicos.
- Torqueo estructural.
- Verificación operacional posterior a la intervención.

Como ejemplo, durante un mantenimiento relacionado con el cambio de rodillos, la propuesta establece que los equipos de izaje, herramientas de torqueo y repuestos necesarios sean preparados previamente a la parada programada, con la finalidad de reducir tiempos improductivos durante la ejecución del trabajo.

Asimismo, la secuencia de actividades podría ser estandarizada mediante procedimientos previamente definidos, permitiendo disminuir tiempos asociados tanto a la coordinación como a la ejecución de las intervenciones.

La implementación de la metodología SMED contribuiría a reducir el MTTR del HPGR y minimizar el impacto operacional generado por mantenimientos programados y correctivos de gran magnitud.

3.15.3.3.3 Implementación de gestión visual y monitoreo operacional

La propuesta contempla la implementación de herramientas de gestión visual enfocadas en el seguimiento permanente de las variables críticas del HPGR, con el propósito de mejorar la detección temprana de desviaciones operacionales y facilitar la toma de decisiones por parte del personal de mantenimiento y operaciones.

La gestión visual planteada considera los siguientes elementos:

- Tableros de condición operacional del equipo.
- Indicadores visuales de presión hidráulica.
- Seguimiento de vibraciones en rodamientos.
- Monitoreo de temperatura en componentes críticos.
- Indicadores de consumo energético específico (kWh/t).
- Estado operacional de los sistemas auxiliares.

La información obtenida mediante las actividades de monitoreo predictivo podría representarse a través de tendencias operacionales y rangos de alarma definidos para cada sistema crítico del equipo.

Por ejemplo, un incremento progresivo de vibración axial en los rodamientos o variaciones anormales de presión hidráulica podrían detectarse de manera anticipada mediante indicadores visuales, permitiendo programar intervenciones antes de que se produzca una falla funcional de mayor severidad.

La implementación de herramientas de gestión visual contribuiría al fortalecimiento del mantenimiento predictivo y a una mejor supervisión operacional del HPGR.

3.15.3.3.4 Estandarización de actividades de mantenimiento

Con el objetivo de reducir la variabilidad durante las intervenciones y aumentar la confiabilidad de las actividades ejecutadas, se propone el desarrollo de procedimientos estandarizados para las principales labores de mantenimiento del HPGR.

- La propuesta contempla la elaboración de los siguientes documentos y herramientas:
- Checklists de inspección.
- Procedimientos de intervención.
- Secuencias estandarizadas para desmontaje y montaje.
- Formatos destinados al monitoreo predictivo.
- Rutas de inspección programadas.

La estandarización estaría enfocada principalmente en las actividades críticas identificadas mediante la metodología RCM, entre las cuales destacan:

- Inspecciones del sistema hidráulico.
- Monitoreo de vibraciones.
- Inspecciones estructurales mediante ensayos no destructivos (END).
- Análisis de aceite del sistema de transmisión.
- Verificación de alineamiento y torqueo.

Por ejemplo, durante las inspecciones hidráulicas, el personal podría seguir una secuencia previamente definida para verificar presión, temperatura, condición de acumuladores y estado de válvulas, permitiendo mantener uniformidad en las inspecciones y mejorar la trazabilidad de la información obtenida.

La aplicación de procedimientos estandarizados contribuiría a disminuir errores operacionales, elevar la calidad de las intervenciones y fortalecer la confiabilidad de las actividades de mantenimiento.

3.15.3.4 Beneficios esperados

La integración de las metodologías RCM y Lean Maintenance permitirá establecer una estrategia de mantenimiento enfocada tanto en la confiabilidad técnica del HPGR como en la eficiencia operacional de las actividades de mantenimiento asociadas al equipo.

Se espera que la aplicación de herramientas Lean contribuya a disminuir los tiempos improductivos durante las intervenciones, optimizar el uso de recursos disponibles y mejorar la planificación de las actividades críticas relacionadas con el HPGR.

De igual manera, la implementación de procedimientos estandarizados y herramientas de gestión visual fortalecerá las actividades de mantenimiento predictivo y facilitará la identificación temprana de desviaciones operacionales.

Entre los principales beneficios esperados destacan los siguientes:

- Reducción de tiempos de parada programados y no programados.

- Disminución del MTTR asociado a intervenciones críticas.
- Incremento de la disponibilidad operacional del HPGR.
- Reducción de fallas repetitivas en componentes críticos.
- Optimización del consumo energético específico.
- Mejora de la confiabilidad del sistema hidráulico y del sistema de transmisión.
- Fortalecimiento de las actividades de mantenimiento predictivo.
- Mayor control operacional de las variables críticas del proceso.

3.15.4 Propuesta Aplicación de metodología SMED en Mantenimiento HPGR

3.15.4.1 Selección de actividad crítica

Como parte de la propuesta de integración entre las metodologías RCM y Lean Maintenance, se desarrolló una propuesta técnica orientada a la aplicación de la metodología SMED en una actividad crítica del HPGR.

La actividad seleccionada corresponde al cambio de rodillos del HPGR, debido a que constituye una de las intervenciones con mayor influencia sobre la disponibilidad operacional del equipo y sobre el tiempo medio de reparación (MTTR).

La selección de esta actividad se fundamenta en el análisis RCM realizado previamente, en el cual se identificaron diversos modos de falla asociados a:

- Desgaste acelerado de studs.
- Desgaste irregular en el recubrimiento de los rodillos.
- Contacto no uniforme entre rodillos.
- Desalineamiento mecánico.
- Incremento progresivo de vibraciones axiales.

Estas condiciones originan la necesidad de ejecutar intervenciones mayores programadas relacionadas con el desmontaje, alineamiento y reemplazo de componentes pertenecientes al sistema de rodillos.

Debido a la elevada criticidad del HPGR dentro del circuito de molienda, una parada prolongada durante el cambio de rodillos puede generar pérdidas significativas en la capacidad de procesamiento y afectar de manera directa la continuidad operacional de la planta.

3.15.4.2 Situación actual del mantenimiento

Durante los mantenimientos mayores del sistema de rodillos, una parte importante del tiempo de intervención suele destinarse a actividades que no aportan valor directo al proceso

de reparación, como la búsqueda de herramientas, coordinación del personal, espera de equipos de izaje y preparación de materiales.

En condiciones convencionales de mantenimiento, muchas de estas actividades se ejecutan una vez detenido el HPGR, lo que incrementa considerablemente el tiempo total de parada del equipo.

Situación actual del cambio de rodillos del HPGR

Tabla 26

Situación actual del cambio de rodillos del HPGR

Actividad	Tipo de actividad	Tiempo estimado
Coordinación de personal	No productiva	30 min
Búsqueda y traslado de herramientas	No productiva	45 min
Preparación de equipos de izaje	No productiva	40 min
Verificación de repuestos	No productiva	30 min
Desmontaje de guardas	Productiva	50 min
Desmontaje del rodillo	Productiva	180 min
Limpieza y verificación	Productiva	45 min
Montaje de rodillo	Productiva	170 min
Alineamiento y torqueo	Productiva	120 min
Verificación operacional	Productiva	40 min

Tiempo total estimado de la intervención: 750 minutos (12,5 horas).

A partir de esta evaluación, se identifica que una proporción considerable del tiempo total de parada está asociada a actividades que podrían ejecutarse previamente a la detención del equipo.

3.15.4.3 Aplicación propuesta de metodología SMED

La metodología SMED plantea la reducción de los tiempos de intervención mediante la diferenciación entre actividades internas y externas.

Las actividades internas son aquellas que requieren obligatoriamente la detención del equipo para su ejecución, mientras que las actividades externas pueden desarrollarse previamente sin afectar la operación normal del HPGR.

Con base en este enfoque, se propone reorganizar las actividades de mantenimiento relacionadas con el cambio de rodillos de la siguiente manera.

Tabla 27
Clasificación SMED de actividades

Actividad	Clasificación propuesta
Coordinación de personal	Externa
Preparación de herramientas	Externa
Preparación de equipos de izaje	Externa
Verificación de repuestos	Externa
Revisión de procedimientos	Externa
Desmontaje de guardas	Interna
Desmontaje del rodillo	Interna
Limpieza y verificación	Interna
Montaje de rodillo	Interna
Alineamiento y torqueo	Interna
Verificación operacional	Interna

La propuesta establece que las actividades externas sean ejecutadas antes de la parada programada del HPGR, mediante una planificación anticipada coordinada entre las áreas de mantenimiento y operaciones.

Asimismo, se plantea la implementación de kits organizados de herramientas, procedimientos estandarizados para desmontaje y montaje, así como secuencias de intervención previamente definidas.

Entre las principales acciones propuestas destacan las siguientes:

- Preparación anticipada de herramientas y equipos de torqueo.
- Disponibilidad previa de repuestos críticos.
- Coordinación anticipada de equipos de izaje.
- Uso de checklists estandarizados.

- Definición de secuencias de desmontaje y montaje.
- Asignación previa de responsabilidades al personal involucrado.

3.15.4.4 Escenario propuesto con aplicación SMED

La reorganización de las actividades mediante la metodología SMED permitiría disminuir los tiempos improductivos relacionados con esperas, búsqueda de herramientas y coordinación de actividades durante la parada del equipo.

Escenario propuesto con aplicación SMED

Tabla 28

Escenario propuesto con aplicación SMED

Actividad	Tiempo estimado actual	Tiempo propuesto
Coordinación de personal	30 min	5 min
Búsqueda y traslado de herramientas	45 min	10 min
Preparación de equipos de izaje	40 min	10 min
Verificación de repuestos	30 min	5 min
Desmontaje de guardas	50 min	45 min
Desmontaje del rodillo	180 min	160 min
Limpieza y verificación	45 min	35 min
Montaje de rodillo	170 min	150 min
Alineamiento y torqueo	120 min	100 min
Verificación operacional	40 min	30 min

Tiempo total actual: 750 minutos (12,5 horas)

Tiempo total propuesto: 550 minutos (9,2 horas)

Reducción estimada del tiempo de intervención: 200 minutos

La simulación desarrollada permite estimar una reducción aproximada del 26,7% en el tiempo total de intervención asociado al cambio de rodillos del HPGR.

3.15.4.5 Impacto en el MTTR

El Tiempo Medio de Reparación (MTTR) representa uno de los principales indicadores de mantenibilidad asociados al desempeño del mantenimiento.

En el escenario actual, las actividades improductivas incrementan significativamente el tiempo total requerido para restablecer la operación del HPGR después de una intervención mayor.

Mediante la aplicación de metodología SMED, la reducción de actividades improductivas permitiría disminuir el MTTR asociado al cambio de rodillos.

Comparación estimada del MTTR

Tabla 29

Comparación estimada del MTTR

Escenario	Tiempo total de intervención
Situación actual	12,5 horas
Escenario con SMED	9,2 horas

La reducción estimada del MTTR contribuiría a incrementar la disponibilidad operacional del HPGR y a disminuir las pérdidas de producción relacionadas con mantenimientos programados y correctivos de gran magnitud.

De igual manera, la aplicación de la metodología SMED permitiría optimizar el uso de recursos, reducir tiempos improductivos durante las intervenciones y mejorar la planificación de las actividades de mantenimiento.

3.15.4.6 Relación entre SMED y el análisis RCM desarrollado

La aplicación propuesta de la metodología SMED se plantea como un complemento directo del análisis RCM desarrollado previamente en la investigación.

Mientras que el análisis RCM permitió identificar los modos de falla críticos y establecer las tareas de mantenimiento necesarias para preservar la confiabilidad del HPGR, la metodología SMED contribuye a optimizar la ejecución de dichas actividades mediante la reducción de tiempos improductivos durante las intervenciones.

De esta manera, ambas metodologías se integran dentro de una estrategia de mantenimiento orientada tanto a la confiabilidad operacional del equipo como a la eficiencia en la ejecución de las actividades de mantenimiento.

La integración propuesta permite que las tareas definidas mediante RCM puedan desarrollarse con menores tiempos de parada, una mejor coordinación operativa y un mayor control de los recursos utilizados durante las intervenciones.

3.15.5 Matriz integradora RCM – Lean Maintenance

Matriz integradora de estrategias RCM y herramientas Lean Maintenance aplicadas al HPGR

Tabla 30

Matriz integradora de estrategias RCM y herramientas Lean Maintenance

Sistema crítico HPGR	Modo de falla identificado mediante RCM	Consecuencia operacional identificada	Estrategia RCM propuesta	Desperdicio identificado	Herramienta Lean aplicada	Desarrollo de implementación	Impacto esperado
Rodillos	Desgaste acelerado de studs	Incremento del P80 y reducción de eficiencia de molienda	Inspección periódica y monitoreo de desgaste	Tiempo improductivo durante inspecciones	5S	Implementación de kits organizados de inspección y herramientas específicas	Reducción de tiempo de intervención
Rodillos	Cambio de rodillos	Parada prolongada del HPGR	Mantenimiento programado	Paradas extensas	SMED	Preparación externa de herramientas, equipos y repuestos antes de la parada	Disminución del MTTR
Sistema hidráulico	Fugas internas y pérdida de presión	Variación de presión y reducción de capacidad de molienda	Inspección predictiva y monitoreo hidráulico	Retrasos durante mantenimiento	Estandarización	Checklists y secuencias definidas de inspección	Mayor confiabilidad
Sistema hidráulico	Falla de acumuladores	Incremento de cargas dinámicas y daño estructural	Verificación periódica de presión y precarga	Falta de control visual	Gestión visual	Indicadores visuales de condición y presión	Detección temprana

Transmisión	Desgaste de engranajes	Incremento de vibración y pérdida de eficiencia mecánica	Monitoreo vibracional y análisis de aceite	Retrabajos por fallas tardías	Gestión visual	Seguimiento de tendencias vibracionales y temperatura	Reducción de fallas severas
Rodamientos	Incremento de vibración axial	Fatiga acelerada y reducción de vida útil	Monitoreo predictivo	Variabilidad en inspecciones	Estandarización	Rutas de inspección y formatos definidos	Mayor control operacional
Estructura	Fisuras estructurales	Riesgo de pérdida de integridad estructural	END programado	Coordinación deficiente	Planificación Lean	Programación coordinada entre mantenimiento y operaciones	Menor tiempo de parada
Sistema de transmisión	Desalineación de acoples	Incremento de vibración y sobrecarga de rodamientos	Verificación periódica de alineamiento	Tiempo muerto por preparación			

3.15.6 Beneficios esperados de la propuesta integradora

La integración de las metodologías RCM y Lean Maintenance permitirá establecer una estrategia de mantenimiento enfocada no solo en la confiabilidad técnica del HPGR, sino también en la eficiencia operacional de las actividades ejecutadas durante las intervenciones de mantenimiento.

Se proyecta que la aplicación de herramientas Lean contribuya a disminuir los tiempos improductivos durante las intervenciones, optimizar el aprovechamiento de los recursos disponibles y mejorar la planificación de las actividades críticas relacionadas con el equipo.

De igual manera, la implementación de procedimientos estandarizados y herramientas de gestión visual permitirá fortalecer las actividades de mantenimiento predictivo, facilitando además la identificación temprana de desviaciones operacionales antes de que estas generen fallas de mayor impacto

Entre los principales beneficios esperados se encuentran los siguientes:

- Disminución de tiempos de parada programados y no programados.
- Reducción del MTTR en intervenciones críticas.
- Incremento de la disponibilidad operacional del HPGR.
- Disminución de fallas repetitivas en componentes críticos.
- Optimización del consumo energético específico del proceso.
- Mejora de la confiabilidad del sistema hidráulico y del sistema de transmisión.
- Fortalecimiento de las estrategias de mantenimiento predictivo.
- Mayor control operacional de las variables críticas del proceso.

3.15.7 Indicadores de seguimiento propuestos

Con la finalidad de evaluar el impacto de la metodología SMED sobre el mantenimiento del HPGR, se propone la utilización de indicadores de desempeño orientados a medir la mantenibilidad, disponibilidad y eficiencia operacional del equipo.

La aplicación de SMED se enfoca principalmente en la reducción de tiempos improductivos durante mantenimientos críticos, especialmente en actividades relacionadas con cambio de rodillos, alineamiento mecánico y mantenimiento del sistema hidráulico de fuerza.

Los indicadores propuestos permitirán evaluar el impacto potencial de la propuesta sobre los tiempos de intervención y sobre la continuidad operacional del proceso de conminución.

Tabla 31*Indicadores de seguimiento propuestos*

Indicador	Fórmula	Situación actual estimada	Escenario propuesto con SMED	Impacto esperado
MTTR	Tiempo total reparación / número de fallas	12,5 h	9,2 h	Reducción de 26,4%
Disponibilidad operacional	MTBF / (MTBF + MTTR)	92,3%	94,2%	Incremento de disponibilidad
Tiempo improductivo	Tiempo no productivo / tiempo total	19,3%	5,4%	Disminución significativa
Cumplimiento mantenimiento programado	OT ejecutadas / OT programadas	78%	92%	Mejora de planificación
Utilización efectiva de recursos	Tiempo productivo / tiempo total intervención	80,7%	94,6%	Mejor aprovechamiento operativo
Tiempo de preparación de intervención	Tiempo preparación / tiempo total	145 min	30 min	Reducción de tiempos muertos

Interpretación de los resultados propuestos

Los resultados estimados permiten observar que la aplicación de la metodología SMED contribuiría a disminuir de manera importante los tiempos improductivos relacionados con actividades previas y complementarias durante las intervenciones de mantenimiento del HPGR.

La reducción estimada del MTTR, desde 12,5 horas hasta aproximadamente 9,2 horas, representa una mejora cercana al 26 %, generando un impacto directo sobre la disponibilidad operacional del equipo y favoreciendo la continuidad del proceso de molienda.

De igual manera, la disminución de tiempos asociados a preparación de materiales, coordinación operativa y organización de recursos permitiría incrementar el nivel de utilización efectiva del personal y de los equipos involucrados en las intervenciones, reduciendo tiempos muertos relacionados con esperas, búsqueda de herramientas y coordinación de actividades.

Desde una perspectiva operacional, la reducción de la duración de las intervenciones permitiría disminuir las pérdidas de producción ocasionadas por la detención del HPGR, considerando que este equipo constituye uno de los componentes de mayor criticidad dentro del circuito de conminución.

3.15.8 Impacto operacional estimado de la aplicación SMED

La implementación propuesta de la metodología SMED sobre actividades críticas de mantenimiento del HPGR permitiría generar mejoras operacionales relacionadas con la disponibilidad, mantenibilidad y eficiencia en la ejecución de las intervenciones.

En condiciones convencionales de mantenimiento, una parte considerable del tiempo de parada durante intervenciones mayores se encuentra asociada a actividades no productivas que podrían desarrollarse previamente mediante una adecuada planificación y organización de recursos.

La reorganización de actividades internas y externas permitiría disminuir tiempos improductivos relacionados con:

- Espera de herramientas.
- Coordinación del personal.
- Preparación de equipos de izaje.
- Verificación de disponibilidad de repuestos.
- Validación de procedimientos de intervención.
- Organización y acondicionamiento del área de trabajo.

En el caso específico del cambio de rodillos del HPGR, la reducción estimada de aproximadamente 3,3 horas de parada representaría un impacto significativo sobre la continuidad operacional de la planta.

Considerando un escenario referencial donde el HPGR procese aproximadamente 2400 t/h, una disminución de 3,3 horas en el tiempo de parada permitiría evitar pérdidas cercanas a:

Producción recuperada estimada

$$2400 \text{ t/h} \times 3.3 \text{ h} = 7920 \text{ Ton}$$

Este resultado permite evidenciar el impacto potencial que tendría la optimización de las actividades de mantenimiento sobre la capacidad de procesamiento de la planta.

Asimismo, la reducción del MTTR contribuiría a incrementar la disponibilidad operacional del equipo, disminuyendo el impacto económico asociado a paradas prolongadas y favoreciendo una mayor estabilidad operacional del circuito de molienda.

3.15.9 Cronograma propuesto de implementación Lean Maintenance

Con la finalidad de establecer una secuencia ordenada para la aplicación de herramientas Lean Maintenance, se propone el siguiente cronograma referencial de implementación.

Tabla 32*Cronograma referencial de implementación*

Etapas	Actividad propuesta	Duración estimada
Etapas 1	Diagnóstico inicial y levantamiento de información	2 semanas
Etapas 2	Identificación de desperdicios en mantenimiento	1 semana
Etapas 3	Organización de herramientas mediante 5S	3 semanas
Etapas 4	Desarrollo de checklists y procedimientos estandarizados	2 semanas
Etapas 5	Clasificación de actividades internas y externas mediante SMED	2 semanas
Etapas 6	Implementación de kits de mantenimiento	2 semanas
Etapas 7	Capacitación del personal de mantenimiento	1 semana
Etapas 8	Implementación de gestión visual	2 semanas
Etapas 9	Seguimiento de indicadores KPI	Permanente

3.4.13 Flujograma simplificado de aplicación SMED

Situación convencional

Parada del HPGR → búsqueda de herramientas → coordinación de personal → preparación de equipos → desmontaje → montaje → alineamiento → arranque

Escenario propuesto con SMED

Preparación externa → coordinación previa → herramientas listas → parada programada → desmontaje directo → montaje → alineamiento → arranque

3.16. Propuesta del plan de mantenimiento Integrador

3.16.1 Objetivo del Plan

El presente Plan de Mantenimiento Integrador constituye la propuesta técnica desarrollada para mejorar la gestión del mantenimiento del Molino de Rodillos de Alta Presión (HPGR), integrando la metodología Reliability Centered Maintenance (RCM) con herramientas de Lean Maintenance. Su finalidad es fortalecer la confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad del equipo, además de promover una ejecución más eficiente de las actividades de mantenimiento.

La elaboración del plan se sustenta en los resultados obtenidos durante la evaluación de criticidad y en el análisis desarrollado mediante la metodología RCM, a partir de los cuales se identificaron los sistemas críticos del HPGR y se definieron las tareas de mantenimiento más

adecuadas para controlar sus principales modos de falla. Sobre esta base, se incorporaron herramientas Lean orientadas a mejorar la planificación, organización y ejecución de las intervenciones, reduciendo tiempos improductivos y favoreciendo un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles.

Como parte de la propuesta, se incluye la aplicación de la metodología SMED sobre el cambio de rodillos del HPGR, además de indicadores de desempeño, un cronograma de implementación, la asignación de responsables y un esquema de seguimiento que permita evaluar la eficacia de las estrategias planteadas. En conjunto, estos elementos conforman una propuesta de mantenimiento orientada a mejorar el desempeño operativo del equipo y promover un proceso de mejora continua.

3.16.2 Alcance

El presente Plan de Mantenimiento Integrador se desarrolla para el Molino de Rodillos de Alta Presión (HPGR) y se enfoca en los sistemas que, de acuerdo con la evaluación de criticidad realizada en esta investigación, presentan la mayor influencia sobre el desempeño del equipo. En ese contexto, la propuesta comprende el Sistema de Rodillos y Estructura, el Sistema de Accionamiento y Transmisión y el Sistema Hidráulico de Fuerza, debido a que una falla en cualquiera de ellos compromete directamente la continuidad operativa y la confiabilidad del HPGR.

El alcance del plan considera la aplicación de la metodología Reliability Centered Maintenance (RCM) para analizar las funciones de estos sistemas, identificar sus fallas funcionales y modos de falla, evaluar sus consecuencias y establecer las tareas de mantenimiento más adecuadas para preservar su desempeño. Sobre esta base, se incorporan herramientas de Lean Maintenance con el objetivo de mejorar la planificación y ejecución de las intervenciones, mediante la aplicación de 5S, gestión visual, estandarización de procedimientos y la metodología SMED, esta última enfocada en la optimización del proceso de cambio de rodillos por tratarse de una de las actividades con mayor incidencia sobre el tiempo de parada del equipo.

Asimismo, la propuesta incluye la definición de indicadores clave de desempeño (KPI), la asignación de responsables, un cronograma referencial de actividades y un esquema de seguimiento que permita evaluar el comportamiento del plan a través de indicadores relacionados con la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad del HPGR.

Es importante precisar que esta investigación corresponde a una propuesta técnica, por lo que no contempla la implementación del plan en una operación minera ni la validación experimental de las estrategias planteadas. En ese sentido, los resultados asociados a la aplicación de Lean Maintenance, como la reducción estimada del tiempo de intervención mediante SMED y la mejora proyectada de los indicadores de mantenimiento, se sustentan en una simulación técnica basada en el análisis desarrollado y en tiempos de referencia para las principales actividades de mantenimiento del HPGR.

Finalmente, la propuesta no considera modificaciones en el diseño del equipo, cambios en los sistemas de automatización, rediseños mecánicos ni un análisis económico detallado de su implementación. Su alcance se limita al desarrollo de un modelo de gestión del mantenimiento que integra los principios del RCM y Lean Maintenance, con el propósito de servir como base para futuras aplicaciones y procesos de validación en entornos industriales.

Aplica para:

- Rodillos y estructura
- Sistema hidráulico
- Accionamiento y transmisión

3.16.3 Estructura del Plan de mantenimiento integrador

El Plan de Mantenimiento Integrador fue estructurado siguiendo una secuencia lógica que combina los principios de la ingeniería de confiabilidad con herramientas de mejora continua. Este enfoque permite que las decisiones de mantenimiento se fundamenten en el nivel de riesgo de los sistemas del HPGR y que su ejecución se desarrolle de manera más eficiente. La estructura del plan comprende desde la identificación de los sistemas críticos hasta el seguimiento de los resultados mediante indicadores de desempeño.

La primera etapa corresponde a la evaluación de criticidad mediante la metodología Risk-Based Criticality Assessment (RBCA), la cual permitió priorizar los sistemas de acuerdo con el riesgo asociado a sus fallas. Como resultado de este análisis se identificaron el Sistema de Rodillos y Estructura, el Sistema de Accionamiento y Transmisión y el Sistema Hidráulico de Fuerza como los sistemas de mayor criticidad, estableciendo así la base para el desarrollo del plan de mantenimiento.

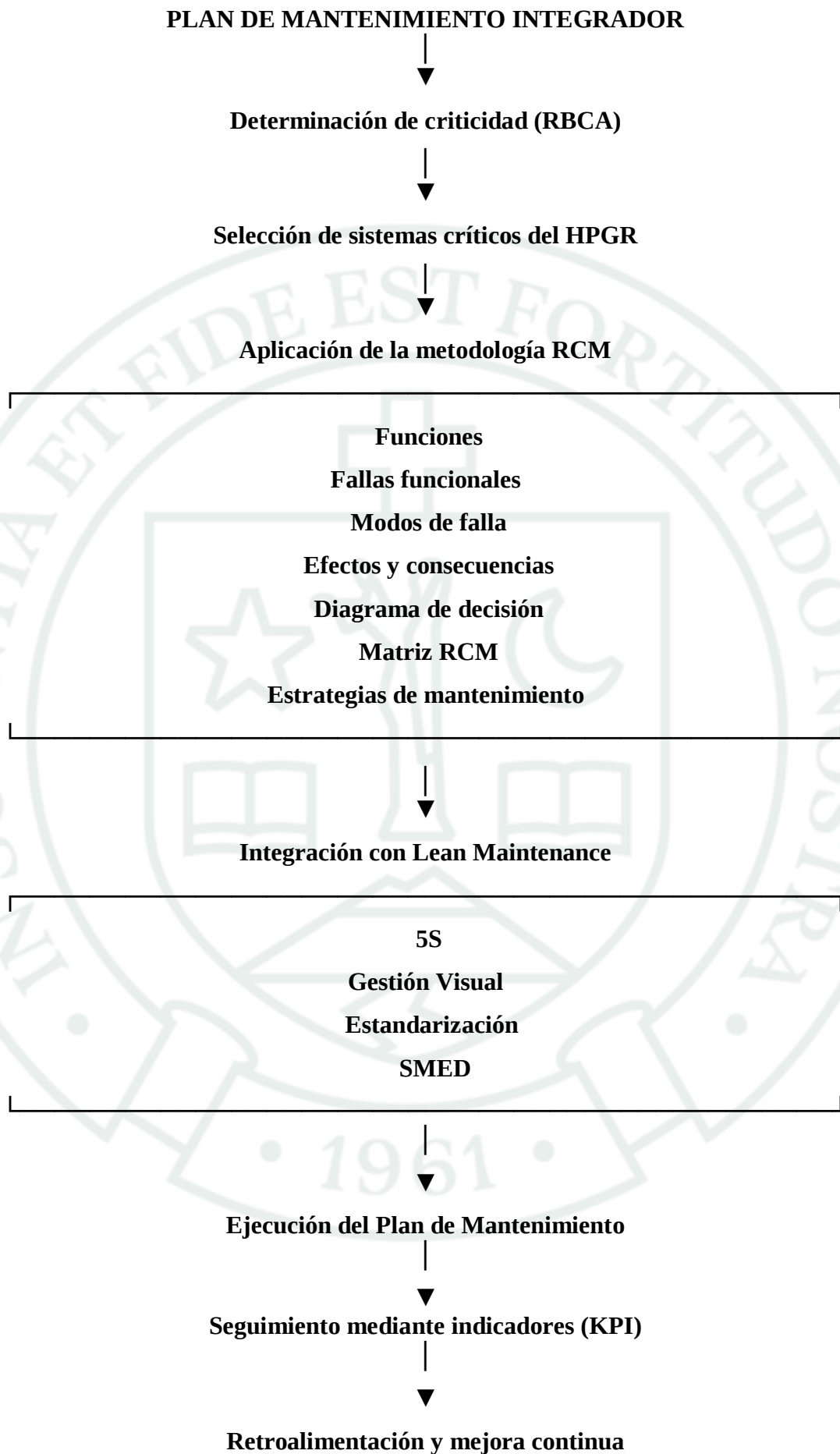
A continuación, se aplicó la metodología Reliability Centered Maintenance (RCM) para analizar las funciones de cada sistema, identificar las fallas funcionales y los modos de falla, evaluar sus consecuencias y definir las tareas de mantenimiento más apropiadas. Este análisis permitió establecer estrategias de mantenimiento predictivo, preventivo, inspecciones programadas, búsqueda de fallas y acciones de rediseño cuando fueron técnicamente justificadas.

Con el propósito de mejorar la ejecución de las actividades definidas mediante el RCM, el plan incorpora herramientas de Lean Maintenance, entre ellas la metodología 5S, la gestión visual, la estandarización de procedimientos y SMED. La integración de estas herramientas busca reducir actividades que no agregan valor, disminuir tiempos improductivos y mejorar la organización de las intervenciones de mantenimiento.

Como parte de la propuesta, la metodología SMED se aplicó al proceso de cambio de rodillos del HPGR, por tratarse de una de las actividades con mayor tiempo de parada del equipo. La simulación desarrollada permitió evidenciar el potencial de esta herramienta para reducir el tiempo de intervención y mejorar el indicador MTTR, optimizando la ejecución del mantenimiento sin modificar el diseño del equipo.

Finalmente, el plan incorpora un conjunto de indicadores clave de desempeño (KPI) para evaluar la eficacia de las estrategias propuestas. Estos indicadores permiten realizar el seguimiento de aspectos relacionados con la disponibilidad, la confiabilidad, la mantenibilidad, el cumplimiento del mantenimiento programado y los tiempos de intervención, proporcionando información que facilite la mejora continua del proceso de mantenimiento.

En conjunto, la estructura planteada integra la evaluación de criticidad, el análisis RCM y las herramientas de Lean Maintenance en una propuesta orientada a fortalecer la gestión del mantenimiento del HPGR y mejorar su desempeño operativo.



3.16.4 Estrategias de mantenimiento obtenidas mediante la aplicación del RCM

La aplicación de la metodología **Reliability Centered Maintenance (RCM)** permitió definir las estrategias de mantenimiento más adecuadas para gestionar los modos de falla identificados en los sistemas críticos del HPGR. La selección de las tareas se realizó considerando las consecuencias que cada falla puede generar sobre la operación, la seguridad, la confiabilidad y los costos de mantenimiento, con el propósito de preservar las funciones del equipo y reducir la probabilidad de interrupciones en el proceso de conminución.

Como resultado del análisis se establecieron **38 tareas de mantenimiento**, las cuales fueron clasificadas según la estrategia más apropiada para cada modo de falla. La distribución obtenida muestra un claro predominio de actividades orientadas al mantenimiento basado en condición, priorizando el monitoreo continuo de los componentes críticos con el fin de identificar oportunamente su deterioro y programar las intervenciones antes de que se produzca una falla funcional.

Tabla 33

Clasificación de las estrategias de mantenimiento obtenidas mediante RCM

Estrategia de mantenimiento	Cantidad	Participación (%)
Mantenimiento predictivo	23	60,5
Inspecciones programadas	8	21,1
Mantenimiento preventivo	5	13,2
Búsqueda de fallas (Failure Finding)	1	2,6
Rediseño o mejora de ingeniería	1	2,6
Total	38	100

Análisis de las estrategias de mantenimiento propuestas

La distribución de las tareas definidas mediante la metodología Reliability Centered Maintenance (RCM) evidencia que el mantenimiento predictivo constituye la estrategia predominante dentro del plan, representando el 60,5 % del total de actividades. Esta tendencia está relacionada con las condiciones de operación del HPGR, cuyos componentes críticos experimentan un desgaste progresivo que puede detectarse mediante técnicas de monitoreo antes de que se produzca una falla funcional.

Las tareas predictivas comprenden actividades como el análisis de vibraciones, el monitoreo de temperatura, el análisis de aceite, el control de la presión del sistema hidráulico y la evaluación del estado de componentes sometidos a desgaste. La aplicación de estas técnicas permite identificar oportunamente el deterioro de los equipos y planificar las intervenciones con anticipación, reduciendo la probabilidad de paradas no programadas y favoreciendo una mayor confiabilidad del HPGR.

Las inspecciones programadas, que representan el 21,1 % de las tareas, están orientadas a verificar periódicamente la condición de componentes como pernos estructurales, sellos, mangueras, conexiones, sistemas de lubricación y otros elementos cuya condición puede evaluarse mediante inspecciones visuales o pruebas funcionales.

Por su parte, el mantenimiento preventivo corresponde al 13,2 % de las actividades propuestas e incluye intervenciones programadas sobre componentes con una vida útil conocida, tales como el reemplazo de filtros, elementos de desgaste y la ejecución de mantenimientos periódicos en equipos auxiliares.

Adicionalmente, el análisis permitió definir una tarea de búsqueda de fallas (*Failure Finding*), destinada a verificar el funcionamiento de dispositivos de protección cuya pérdida de función no es fácilmente identificable durante la operación normal. Asimismo, se planteó una acción de rediseño para corregir una causa de falla recurrente que no puede eliminarse únicamente mediante actividades de mantenimiento.

3.16.4.1 Relación de las estrategias con los sistemas críticos

Las estrategias definidas fueron adaptadas a las características de cada sistema crítico del HPGR. En el Sistema de Rodillos y Estructura predominan las tareas predictivas y las inspecciones programadas, debido a la necesidad de controlar el desgaste de los studs, el estado de los rodillos, la integridad estructural y la condición de los rodamientos principales.

En el Sistema de Accionamiento y Transmisión, las actividades se enfocan principalmente en el monitoreo de vibraciones, el análisis de aceite de los reductores, la inspección de acoplamientos y el mantenimiento preventivo de los componentes sometidos a altos esfuerzos mecánicos.

Para el Sistema Hidráulico de Fuerza, la estrategia combina tareas predictivas relacionadas con el monitoreo de presión, temperatura y condición del fluido hidráulico, junto con inspecciones periódicas de válvulas, cilindros, acumuladores y líneas hidráulicas, complementadas por actividades preventivas que contribuyen a mantener la estabilidad del sistema.

En conjunto, la distribución de las estrategias refleja que las tareas de mantenimiento fueron definidas de acuerdo con las funciones, condiciones de operación y mecanismos de deterioro de cada sistema, permitiendo priorizar los recursos sobre aquellos componentes cuyo desempeño tiene mayor influencia en la confiabilidad y disponibilidad del HPGR.

3.16.5 Integración de la metodología RCM con Lean Maintenance

La aplicación de la metodología Reliability Centered Maintenance (RCM) permitió definir las estrategias de mantenimiento necesarias para controlar los modos de falla identificados en los sistemas críticos del HPGR. No obstante, la eficacia de estas estrategias no depende únicamente de una adecuada selección de las tareas, sino también de la forma en que las intervenciones son planificadas, organizadas y ejecutadas durante el mantenimiento.

Con el propósito de fortalecer este proceso, la presente propuesta incorpora herramientas de Lean Maintenance como complemento del análisis realizado mediante RCM. Mientras esta metodología permite determinar las actividades de mantenimiento más apropiadas para preservar las funciones del equipo, Lean Maintenance aporta herramientas orientadas a mejorar la ejecución de dichas actividades, reduciendo tiempos improductivos, eliminando actividades que no agregan valor y promoviendo una mejor organización de los recursos.

La integración de ambos enfoques permite que las estrategias definidas mediante el RCM se desarrollen dentro de un proceso de mantenimiento más estandarizado y eficiente. De esta manera, las tareas predictivas, preventivas y las inspecciones programadas no solo buscan controlar los modos de falla del HPGR, sino que también se ejecutan bajo criterios de mejora continua que contribuyen a incrementar la mantenibilidad y la disponibilidad del equipo.

A partir de las necesidades identificadas durante el análisis RCM, se seleccionaron las herramientas de Lean Maintenance que presentan mayor aporte para la ejecución de las actividades de mantenimiento, estableciendo una relación entre cada estrategia propuesta y las herramientas de mejora continua consideradas dentro del plan.

Tabla 34*Integración de la metodología RCM con Lean Maintenance*

Estrategia RCM	Herramienta Lean	Objetivo
Predictivo	Gestión visual	Facilitar el seguimiento de variables críticas
Preventivo	5S	Reducir tiempos de preparación
Inspecciones	Procedimientos estandarizados	Disminuir la variabilidad
Cambio de rodillos	SMED	Reducir el MTTR
Todas las actividades	Estandarización	Mejorar la ejecución

3.16.5.1 Criterios de Integración

Confiabilidad: Las tareas definidas mediante la metodología RCM constituyen la base técnica del plan de mantenimiento, asegurando que cada actividad esté orientada al control de un modo de falla previamente identificado y contribuya a preservar las funciones del HPGR.

Eliminación de desperdicios: Las actividades de mantenimiento fueron revisadas para identificar tiempos improductivos relacionados con esperas, desplazamientos innecesarios, búsqueda de herramientas, demoras logísticas y reprocesos, con el propósito de reducir estas pérdidas y mejorar la eficiencia de las intervenciones.

Estandarización: Las actividades consideradas críticas fueron organizadas mediante procedimientos de trabajo estandarizados, con el fin de disminuir la variabilidad en su ejecución, facilitar la repetibilidad de las intervenciones y reducir la dependencia de la experiencia del personal.

Mejora continua: El desempeño del plan será evaluado mediante indicadores clave de desempeño (KPI), cuya información permitirá realizar un seguimiento periódico de los resultados y actualizar las estrategias de mantenimiento cuando las condiciones de operación del HPGR lo requieran.

3.16.5.2 Matriz de integración RCM – Lean Maintenance

Tabla 35

Matriz de integración RCM – Lean Maintenance

Resultado obtenido mediante RCM	Problema identificado durante la ejecución	Herramienta Lean aplicada	Resultado esperado
Monitoreo de vibraciones de rodamientos	Retrasos en la toma y registro de datos	Gestión Visual	Registro estandarizado y reducción del tiempo de inspección
Análisis periódico de aceite	Variabilidad en la ejecución del procedimiento	Estandarización	Uniformidad en la toma y análisis de muestras
Inspección de studs y superficie de rodillos	Búsqueda de herramientas e instrumentos	5S	Disminución de tiempos improductivos
Cambio de rodillos	Elevado MTTR durante la intervención	SMED	Reducción del tiempo de cambio de rodillos
Inspección de válvulas hidráulicas	Omisión de verificaciones	Check List estandarizado	Mayor confiabilidad de la inspección
Inspección de mangueras hidráulicas	Falta de secuencia definida	Trabajo estandarizado	Reducción de errores durante la inspección
Cambio de filtros hidráulicos	Espera por materiales	Gestión Visual + 5S	Disponibilidad inmediata de repuestos
Monitoreo de presión hidráulica	Registro manual disperso	Gestión Visual	Seguimiento más rápido de tendencias

Interpretación de la matriz

La matriz de integración muestra que las herramientas de Lean Maintenance no reemplazan las estrategias definidas mediante la metodología RCM, sino que las complementan al mejorar la forma en que las actividades de mantenimiento son ejecutadas.

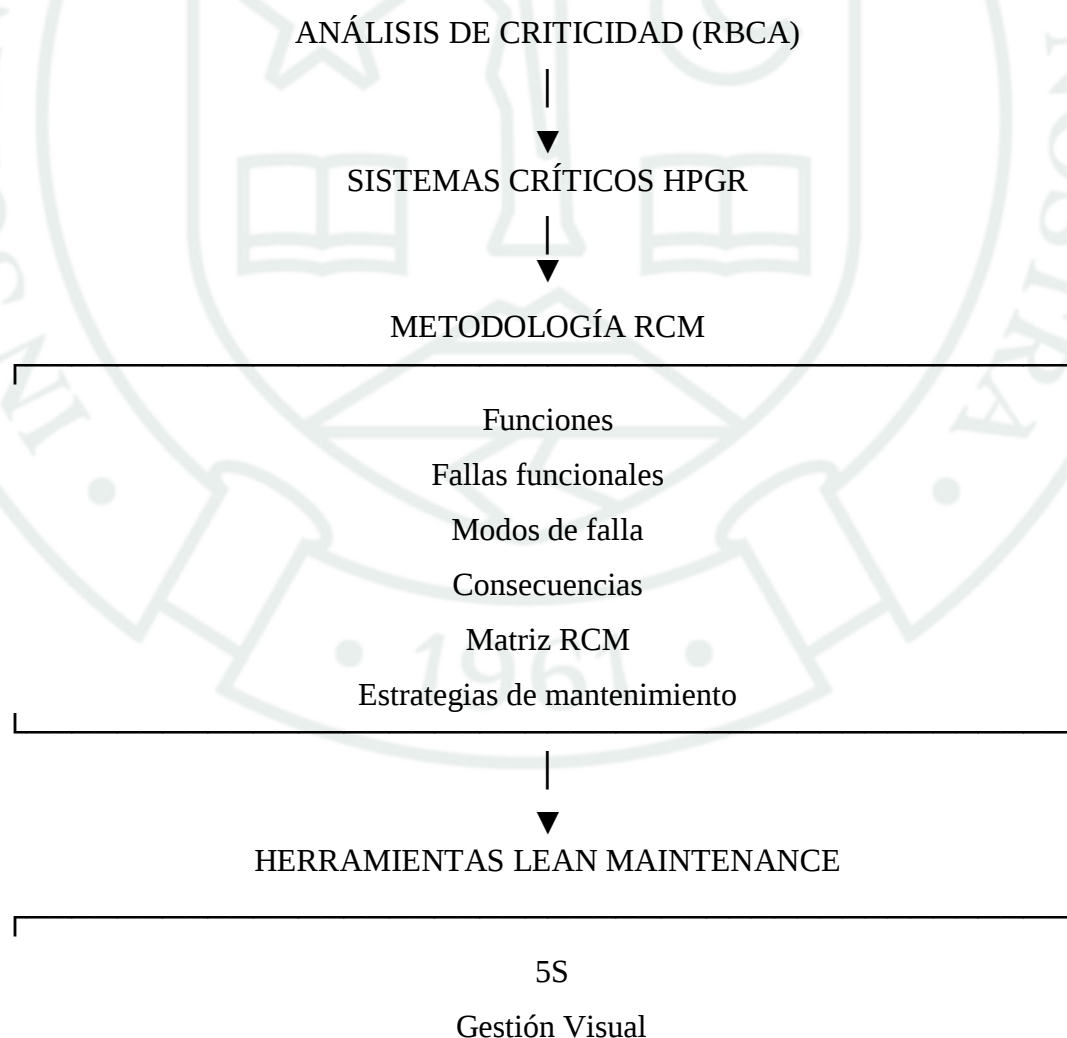
En el caso de las tareas predictivas, se mantienen los criterios establecidos durante el análisis de confiabilidad, incorporando procedimientos estandarizados, herramientas de gestión visual y mejoras en la organización del trabajo que contribuyen a reducir tiempos improductivos y hacer más eficientes las intervenciones.

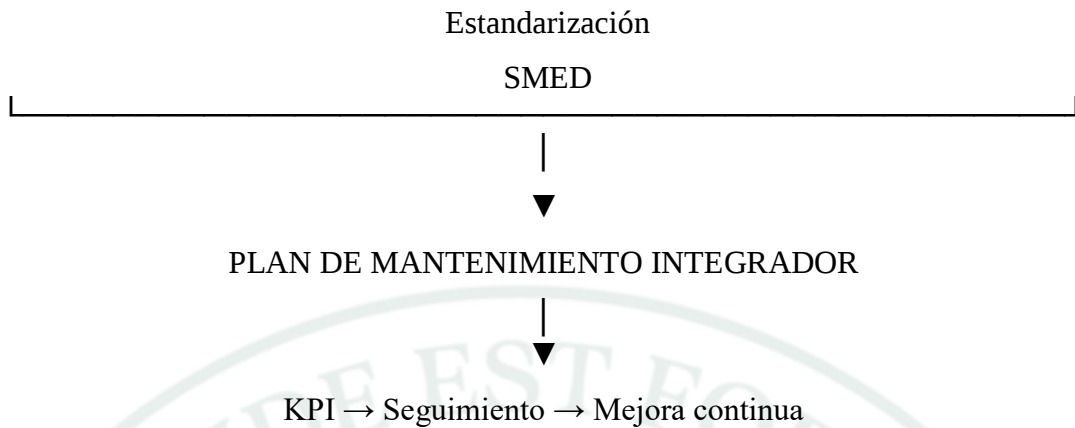
De manera similar, las actividades preventivas y las inspecciones programadas se fortalecen mediante la aplicación de herramientas como 5S y Gestión Visual, favoreciendo una mejor organización de las áreas de trabajo, una mayor disponibilidad de herramientas y una ejecución más uniforme de las actividades de mantenimiento.

Por su parte, la metodología SMED constituye el principal punto de integración entre ambos enfoques, ya que se aplica sobre una actividad crítica previamente identificada mediante el análisis RCM, con el objetivo de disminuir el tiempo de intervención sin modificar la estrategia de mantenimiento definida para el equipo.

En conjunto, la propuesta integra los principios de confiabilidad del RCM con las herramientas de mejora continua de Lean Maintenance, dando lugar a un modelo de mantenimiento que busca no solo controlar los modos de falla, sino también optimizar la ejecución de las intervenciones y fortalecer el desempeño operativo del HPGR.

3.16.5.3 Esquema de integración metodológica





3.16.6 Desarrollo de la metodología integradora propuesta

La metodología integradora propuesta combina los principios de Reliability Centered Maintenance (RCM) y Lean Maintenance con el propósito de desarrollar un plan de mantenimiento orientado a mejorar la confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad del HPGR. La propuesta parte del análisis de confiabilidad realizado mediante RCM y lo complementa con herramientas Lean que permiten optimizar la planificación y ejecución de las actividades de mantenimiento.

A diferencia de aplicar ambas metodologías por separado, el enfoque planteado establece una secuencia de trabajo en la que las estrategias obtenidas mediante el RCM constituyen la base técnica del plan, mientras que Lean Maintenance contribuye a reducir desperdicios, estandarizar procesos y mejorar la eficiencia de las intervenciones.

La metodología se desarrolla a través de siete etapas consecutivas, las cuales se describen a continuación.

Etapas 1. Selección y delimitación del sistema

La primera etapa consiste en definir el equipo objeto de estudio y establecer el alcance del análisis. En esta investigación se seleccionó el Molino de Rodillos de Alta Presión (HPGR), debido a su importancia dentro del circuito de conminución y a la influencia que tiene sobre la continuidad operativa de la planta.

En esta fase se recopila la información técnica necesaria para el desarrollo del estudio, incluyendo manuales del fabricante, planos, historial de mantenimiento, registros de fallas, procedimientos de trabajo e información operacional del equipo.

Etapa 2. Análisis funcional del equipo

Una vez delimitado el sistema, se realiza el análisis funcional siguiendo la metodología RCM. En esta etapa se identifican las funciones principales y secundarias del HPGR, los niveles de desempeño esperados y las fallas funcionales que pueden afectar su operación. Esta información constituye la base para el análisis posterior de los modos de falla.

Etapa 3. Identificación de modos y efectos de falla

En esta etapa se analizan los principales modos de falla que pueden presentarse en los sistemas críticos del HPGR, evaluando sus causas, efectos y consecuencias sobre la operación, la seguridad, los costos de mantenimiento y la continuidad del proceso. La información obtenida permite establecer cuáles requieren una estrategia específica de mantenimiento.

Etapa 4. Definición de las estrategias de mantenimiento

Con base en los resultados del análisis RCM se seleccionan las estrategias de mantenimiento más adecuadas para cada modo de falla. Según las características de cada caso, las tareas pueden corresponder a mantenimiento predictivo, preventivo, inspecciones programadas, búsqueda de fallas o acciones de rediseño cuando estas resulten técnicamente justificadas.

Etapa 5. Integración de herramientas Lean Maintenance

Una vez definidas las tareas de mantenimiento, se incorporan herramientas de Lean Maintenance para mejorar la forma en que estas actividades son ejecutadas. La propuesta contempla la aplicación de 5S, gestión visual, estandarización de procedimientos, organización de herramientas mediante kits de trabajo y la metodología SMED para optimizar el cambio de rodillos del HPGR.

Estas herramientas complementan las estrategias obtenidas mediante el RCM, permitiendo reducir tiempos improductivos, mejorar la organización de las intervenciones y aprovechar de manera más eficiente los recursos disponibles.

Etapa 6. Elaboración del Plan de Mantenimiento Integrador

Los resultados obtenidos mediante el RCM y Lean Maintenance se consolidan en un único plan de mantenimiento que incluye las actividades programadas, sus frecuencias de ejecución, los recursos requeridos, los procedimientos estandarizados, los formatos de inspección y los indicadores necesarios para el seguimiento del mantenimiento.

Etapa 7. Evaluación de los beneficios esperados

Finalmente, se realiza una evaluación técnica de los beneficios esperados de la propuesta mediante indicadores relacionados con la disponibilidad, la confiabilidad, la mantenibilidad, el MTBF, el MTTR, el tiempo de intervención y el cumplimiento del plan de mantenimiento. Asimismo, se considera la simulación de la aplicación de SMED en el cambio de rodillos del HPGR, con el fin de estimar el impacto potencial de esta herramienta sobre la reducción de los tiempos de intervención y la mejora del desempeño operativo del equipo.

3.16.7 Diseño del plan de mantenimiento integrador

El Plan de Mantenimiento Integrador constituye el resultado de la metodología desarrollada en la presente investigación, al combinar las estrategias definidas mediante Reliability Centered Maintenance (RCM) con herramientas de Lean Maintenance. Esta integración permite no solo establecer las actividades de mantenimiento necesarias para preservar las funciones del HPGR, sino también mejorar la forma en que dichas actividades son planificadas y ejecutadas, favoreciendo un uso más eficiente de los recursos disponibles.

La propuesta toma como base los resultados obtenidos durante el análisis RCM, considerando las funciones del equipo, los modos de falla identificados y las tareas de mantenimiento definidas para controlar los mecanismos de deterioro de los sistemas críticos. Sobre esta base se incorporan herramientas Lean orientadas a reducir tiempos

improductivos, estandarizar las intervenciones y mejorar la organización del proceso de mantenimiento.

El plan se estructura en cinco componentes que actúan de manera complementaria para fortalecer la gestión del mantenimiento del HPGR.

Estrategias de mantenimiento basadas en RCM. Comprenden las actividades predictivas, preventivas, inspecciones programadas, tareas de búsqueda de fallas y acciones de rediseño definidas durante el análisis de confiabilidad. Estas estrategias constituyen la base técnica del plan y fueron seleccionadas considerando las consecuencias asociadas a cada modo de falla.

Herramientas de Lean Maintenance. Incluyen la aplicación de 5S, SMED, gestión visual, procedimientos estandarizados y la organización de herramientas y repuestos mediante kits de mantenimiento. Su finalidad es optimizar la ejecución de las actividades definidas por el RCM, reduciendo desperdicios y mejorando la eficiencia de las intervenciones.

Planificación y programación del mantenimiento. En este componente se establecen las frecuencias de intervención, los recursos requeridos, los responsables de las actividades y la coordinación con las áreas involucradas, con el propósito de asegurar una adecuada ejecución del mantenimiento.

Procedimientos estandarizados. Se desarrollan procedimientos y formatos de trabajo que permitan ejecutar las actividades de manera uniforme, facilitando el control de las intervenciones, la capacitación del personal y la trazabilidad de la información generada durante el mantenimiento.

Seguimiento mediante indicadores. El desempeño del plan será evaluado mediante indicadores relacionados con la disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad, cumplimiento del programa de mantenimiento, MTBF, MTTR y reducción de los tiempos de intervención, permitiendo realizar un seguimiento continuo de los resultados obtenidos.

En conjunto, estos componentes conforman un plan de mantenimiento que integra los principios de confiabilidad del RCM con las herramientas de mejora continua de Lean

Maintenance, proporcionando una propuesta orientada a incrementar la disponibilidad del HPGR, optimizar la ejecución de las intervenciones y fortalecer la gestión del mantenimiento.

Tabla 36

Seguimiento mediante indicadores

Componente del Plan	Resultado obtenido mediante RCM	Herramienta Lean Maintenance integrada	Aplicación en el HPGR	Beneficio esperado
Inspecciones programadas	Definición de inspecciones para componentes críticos según modos de falla identificados	Gestión Visual	Uso de listas de verificación estandarizadas, señalización de puntos de inspección y tableros de seguimiento	Disminución de omisiones durante las inspecciones y mejora del control operacional
Mantenimiento preventivo	Actividades preventivas establecidas para evitar la ocurrencia de fallas funcionales	Trabajo Estandarizado	Elaboración de procedimientos estandarizados para cada actividad preventiva	Mayor uniformidad en la ejecución y reducción de la variabilidad entre técnicos
Mantenimiento predictivo	Monitoreo de variables de condición (vibración, temperatura, presión, lubricación)	Gestión Visual	Visualización de tendencias e indicadores de condición para facilitar la toma de decisiones	Detección temprana de fallas potenciales
Cambio de rodillos	Actividad crítica definida por el análisis RCM debido a su impacto sobre la disponibilidad	SMED	Separación de actividades internas y externas, preparación previa de herramientas y secuencia optimizada del cambio de rodillos	Reducción del tiempo de intervención y disminución del tiempo de parada del equipo
Gestión de herramientas	Recursos requeridos para ejecutar las actividades de mantenimiento	5S	Organización, clasificación e identificación de herramientas mediante paneles	Reducción del tiempo empleado en búsqueda de herramientas

			y ubicaciones definidas	
Gestión de repuestos	Repuestos críticos identificados mediante el análisis de criticidad	Gestión Visual + 5S	Identificación visual y almacenamiento organizado de repuestos críticos	Reducción de tiempos de espera por materiales
Programación del mantenimiento	Frecuencias de mantenimiento definidas por RCM	Planificación Lean	Coordinación anticipada de recursos, materiales y personal antes de cada intervención	Mayor cumplimiento del programa de mantenimiento
Ejecución de actividades	Tareas técnicas derivadas del análisis RCM	Eliminación de desperdicios	Identificación y eliminación de tiempos muertos, desplazamientos innecesarios y reprocesos durante la intervención	Incremento de la productividad del mantenimiento
Control del desempeño	Indicadores de confiabilidad y mantenibilidad	Gestión Visual de KPI	Seguimiento mediante tableros de indicadores (MTBF, MTTR, Disponibilidad, Cumplimiento del PM)	Mejora continua basada en información objetiva
Mejora continua	Retroalimentación del desempeño del plan	Kaizen	Revisión periódica de resultados e implementación de acciones de mejora	Optimización permanente del Plan de Mantenimiento Integrador

3.16.8 Validación de la propuesta

La validación de la propuesta metodológica tuvo como propósito verificar que el Plan de Mantenimiento Integrador desarrollado en la presente investigación constituye una alternativa técnicamente consistente para fortalecer la gestión del mantenimiento de los molinos de rodillos de alta presión (HPGR).

Dado que el estudio corresponde al diseño de una propuesta y no contempla su implementación en una operación industrial, la validación se realizó mediante un análisis de consistencia técnica, sustentado en los resultados obtenidos durante la aplicación de la metodología Reliability Centered Maintenance (RCM) y en la incorporación de

herramientas de Lean Maintenance. Este procedimiento permitió evaluar la coherencia de la propuesta con los principios de confiabilidad, mantenibilidad y mejora continua considerados en la investigación.

La evaluación se desarrolló considerando tres aspectos principales: la consistencia técnica del plan, la integración entre las metodologías empleadas y los beneficios operacionales esperados.

En primer lugar, se verificó que las actividades de mantenimiento propuestas se encuentran directamente sustentadas en el análisis RCM, por lo que cada tarea responde a un modo de falla previamente identificado y a sus respectivas consecuencias sobre la operación del HPGR. Esto asegura que las estrategias incluidas en el plan cuentan con un fundamento técnico y se orientan al control de los mecanismos de deterioro más relevantes.

En segundo lugar, se evaluó la integración entre el RCM y Lean Maintenance. Mientras el primero permitió definir las estrategias de mantenimiento para preservar las funciones del equipo, el segundo aportó herramientas orientadas a optimizar la ejecución de dichas actividades mediante la reducción de desperdicios, la estandarización de procedimientos y una mejor organización de las intervenciones.

Finalmente, se analizaron los beneficios operacionales esperados de la propuesta. La incorporación de herramientas como 5S, SMED, gestión visual y procedimientos estandarizados permite proyectar mejoras en la planificación del mantenimiento, una reducción de tiempos improductivos durante las intervenciones y un uso más eficiente de los recursos disponibles.

En conjunto, estos resultados evidencian que la propuesta metodológica mantiene coherencia entre sus fundamentos teóricos, el análisis desarrollado y las estrategias planteadas, constituyendo una alternativa técnicamente viable para fortalecer la gestión del mantenimiento de equipos HPGR.

3.16.9 Evaluación del cumplimiento de los objetivos

Con el propósito de comprobar el alcance de la investigación, se evaluó el cumplimiento de los objetivos específicos planteados al inicio del estudio. Los resultados obtenidos muestran que la metodología propuesta permitió desarrollar un Plan de Mantenimiento Integrador sustentado en criterios de confiabilidad y mejora continua, cumpliendo con los objetivos establecidos para la investigación.

En primer lugar, se identificaron los sistemas con mayor criticidad del HPGR mediante la aplicación del método Risk-Based Criticality Assessment (RBCA), lo que permitió seleccionar los sistemas prioritarios para el desarrollo del análisis RCM.

Posteriormente, el análisis de confiabilidad permitió identificar las funciones, fallas funcionales, modos de falla, efectos y consecuencias de los sistemas críticos, definiéndose las estrategias de mantenimiento técnicamente más adecuadas para controlar los mecanismos de deterioro identificados.

Finalmente, las estrategias obtenidas mediante el RCM fueron complementadas con herramientas de Lean Maintenance, integrando acciones orientadas a optimizar la ejecución del mantenimiento mediante la aplicación de 5S, SMED, gestión visual y estandarización de procedimientos. Como resultado, se formuló un Plan de Mantenimiento Integrador que combina criterios de confiabilidad con herramientas de mejora continua, dando cumplimiento al objetivo general de la investigación.

Tabla 37

Evaluación del cumplimiento de los objetivos

Objetivo específico	Evidencia desarrollada en la investigación	Nivel de cumplimiento
Identificar los modos de falla del molino HPGR mediante la metodología RCM	Se realizó el análisis funcional, la identificación de fallas funcionales y el análisis de modos y efectos de falla (FMEA), permitiendo determinar los componentes críticos del equipo.	Cumplido
Determinar las estrategias de mantenimiento más adecuadas para los modos de falla identificados	Se seleccionaron tareas preventivas, predictivas e inspecciones de acuerdo con los criterios establecidos por la metodología RCM.	Cumplido
Integrar herramientas Lean Maintenance al proceso de mantenimiento	Se incorporaron herramientas como 5S, SMED, gestión visual y trabajo estandarizado para optimizar la ejecución de las actividades de mantenimiento.	Cumplido
Diseñar un Plan de Mantenimiento Integrador para molinos HPGR	Se desarrolló un plan que integra las estrategias obtenidas mediante RCM con herramientas Lean Maintenance, definiendo actividades, responsables, frecuencias e indicadores de seguimiento.	Cumplido

3.16.10 Beneficios esperados de la propuesta

La aplicación del **Plan de Mantenimiento Integrador** permitirá generar beneficios tanto en el ámbito técnico como en la gestión operativa del mantenimiento del HPGR. Desde la perspectiva de la confiabilidad, las estrategias definidas mediante la metodología **RCM** contribuirán a controlar los modos de falla identificados, disminuyendo la probabilidad de fallas imprevistas y favoreciendo una mayor disponibilidad del equipo.

En cuanto a la mantenibilidad, la incorporación de herramientas de Lean Maintenance permitirá optimizar la ejecución de las actividades de mantenimiento mediante la estandarización de procedimientos, una mejor organización de los recursos y la reducción de tiempos improductivos durante las intervenciones.

De manera complementaria, la aplicación de la metodología SMED en actividades críticas, como el cambio de rodillos, permitirá reorganizar las tareas previas y las que requieren la detención del equipo, favoreciendo una disminución del tiempo de intervención mediante una adecuada planificación y preparación de herramientas, materiales y personal.

Por otro lado, el seguimiento del plan mediante indicadores de desempeño facilitará la evaluación continua de los resultados obtenidos, proporcionando información que apoye la toma de decisiones y el proceso de mejora continua de la gestión del mantenimiento.

En conjunto, estos beneficios reflejan el potencial de la propuesta para fortalecer la gestión del mantenimiento del HPGR, optimizar la ejecución de las intervenciones y contribuir a una operación más confiable y eficiente.

Tabla 38

Beneficios esperados de la propuesta

Aspecto	Beneficio esperado
Confiabilidad	Reducción de fallas funcionales en sistemas críticos
Disponibilidad	Disminución de tiempos de parada
Mantenibilidad	Reducción del MTTR y mejora de la ejecución del mantenimiento
Productividad	Menor tiempo improductivo durante las intervenciones
Gestión	Mejor planificación y control mediante KPI
Recursos	Uso más eficiente de herramientas, repuestos y personal

CONCLUSIONES

1. El diagnóstico del estado actual de la actividad de mantenimiento del equipo HPGR permitió determinar que el cambio de rodillos presenta un tiempo de intervención estimado de 750 minutos (12,5 horas), de los cuales 145 minutos, equivalentes al 19,3 %, corresponden a actividades no productivas relacionadas con la coordinación del personal, búsqueda y traslado de herramientas, preparación de equipos de izaje y verificación de repuestos. Estos resultados evidencian que una parte del tiempo de parada está asociada a actividades que pueden ser planificadas y preparadas previamente, constituyendo una oportunidad de mejora mediante la organización anticipada de los recursos y la optimización de las actividades de intervención.
2. El análisis de criticidad permitió determinar el grado de importancia de los sistemas que conforman el equipo HPGR, obteniéndose índices de criticidad de 25 para el sistema de Rodillos y Estructura, 20 para el sistema de Accionamiento y Transmisión y 16 para el sistema Hidráulico de Fuerza, mientras que los sistemas de Lubricación, Enfriamiento y Alimentación y Descarga alcanzaron valores de 9, 6 y 4, respectivamente. En función de estos resultados, los tres primeros sistemas fueron priorizados para la aplicación de la metodología RCM, debido a su mayor incidencia potencial sobre la continuidad operacional, seguridad y desempeño del equipo.
3. La aplicación del análisis de Modos de Falla y Efectos como herramienta colaborativa de apoyo a la estrategia RCM permitió establecer las funciones del equipo, identificar las fallas funcionales, modos de falla y sus efectos, y determinar las estrategias de mantenimiento correspondientes para los sistemas críticos del HPGR. Como resultado, se identificaron 115 modos de falla y se establecieron 38 tareas de mantenimiento, distribuidas en 23 tareas de mantenimiento predictivo (60,5 %), 8 inspecciones programadas (21,1 %), 5 tareas de mantenimiento preventivo (13,2 %), 1 tarea de búsqueda de fallas (2,6 %) y 1 acción de rediseño o mejora de ingeniería (2,6 %). La predominancia del mantenimiento predictivo evidencia una orientación hacia el monitoreo de la condición de los componentes críticos y la anticipación de intervenciones antes de la ocurrencia de fallas funcionales.
4. El diseño del Plan de Mantenimiento Integrador permitió articular las estrategias determinadas mediante RCM con herramientas de Lean Maintenance, principalmente 5S, gestión visual, estandarización de procedimientos y SMED, orientadas a reducir actividades que no agregan valor y mejorar la ejecución de las intervenciones. En

particular, la simulación de SMED aplicada al cambio de rodillos permitió estimar una reducción del tiempo de intervención de 750 a 550 minutos, equivalente a pasar de 12,5 a 9,2 horas, lo que representa una disminución de 200 minutos (3,3 horas), equivalente al 26,7 %. Considerando un escenario referencial de procesamiento de 2 400 t/h, esta reducción representa una capacidad de procesamiento potencialmente recuperada de aproximadamente 7 920 toneladas por intervención. Estos resultados corresponden a una estimación derivada de la propuesta y no a una implementación física del plan.

5. El análisis comparativo mostró un impacto económico-operacional favorable debido a la reducción del tiempo de intervención. La propuesta estima disminuir 3,3 horas por cambio de rodillos, equivalente al 26,7 %, lo que, considerando una capacidad referencial de 2 400 t/h, representa 7 920 toneladas de procesamiento potencialmente recuperadas por intervención. Estos resultados evidencian un potencial de mejora en el aprovechamiento de los recursos y una posible reducción de los costos asociados a las paradas; sin embargo, el ahorro monetario definitivo deberá determinarse después de implementar el plan y evaluar los costos de mantenimiento, horas-hombre, fallas no programadas y disponibilidad operacional.
6. La validación técnica de la propuesta permitió comprobar la coherencia entre los fundamentos teóricos, el análisis desarrollado y la estructura del Plan de Mantenimiento Integrador planteado. La metodología propuesta cumple con los objetivos establecidos al integrar criterios de confiabilidad, mantenibilidad y mejora continua, constituyendo una alternativa aplicable para fortalecer la gestión del mantenimiento de molinos HPGR.
7. Finalmente, el Plan de Mantenimiento Integrador desarrollado representa una herramienta de gestión que permite orientar la toma de decisiones mediante actividades técnicamente justificadas e indicadores de seguimiento. Su implementación futura permitiría evaluar cuantitativamente mejoras asociadas a disponibilidad, MTBF, MTTR, cumplimiento del programa de mantenimiento y reducción de tiempos improductivos.
8. La implementación del Plan de Mantenimiento Integrador propuesto permitirá contribuir a la reducción de los costos asociados a la gestión del mantenimiento del molino HPGR, debido a que la metodología planteada prioriza actividades técnicamente justificadas mediante RCM y optimiza su ejecución mediante herramientas Lean Maintenance. La disminución de intervenciones correctivas no planificadas, la reducción de tiempos improductivos durante las actividades de mantenimiento, la mejor

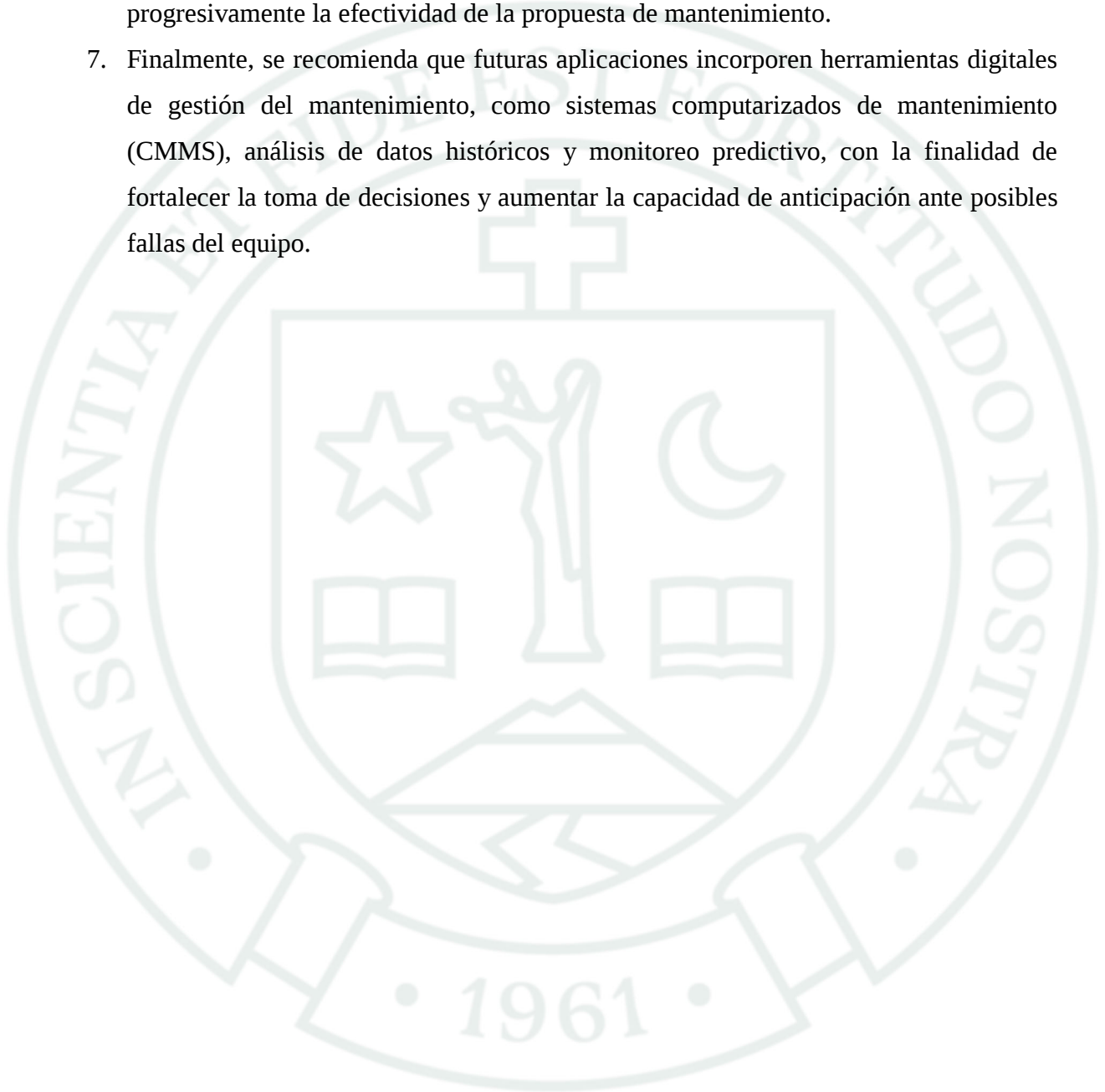
utilización de recursos humanos y materiales, así como la adecuada gestión de repuestos críticos, representan factores que pueden generar una disminución de costos operacionales relacionados con fallas inesperadas y paradas prolongadas del equipo. Si bien la cuantificación económica requiere una etapa posterior de implementación y seguimiento, la propuesta establece las condiciones necesarias para lograr una gestión del mantenimiento más eficiente y económicamente sostenible.



RECOMENDACIONES

1. La implementación del Plan de Mantenimiento Integrador deberá priorizar los sistemas de Rodillos y Estructura, Accionamiento y Transmisión e Hidráulico de Fuerza, debido a que presentaron los mayores índices de criticidad, con valores de 25, 20 y 16, respectivamente. La aplicación inicial en estos sistemas permitirá validar las estrategias de mantenimiento definidas mediante RCM y concentrar los recursos disponibles en los componentes con mayor impacto sobre el desempeño del HPGR.
2. La gestión de las actividades asociadas al cambio de rodillos deberá considerar la preparación anticipada de herramientas, equipos de izaje, repuestos y personal, debido a que el diagnóstico identificó 145 minutos de actividades no productivas, equivalentes al 19,3 % del tiempo total de intervención de 750 minutos. La aplicación de las herramientas de Lean Maintenance propuestas deberá orientarse a reducir estos tiempos y evitar que actividades preparatorias sean ejecutadas durante la parada del equipo.
3. El seguimiento de las 38 tareas de mantenimiento definidas mediante RCM deberá realizarse mediante registros actualizados de ejecución, resultados de inspección y condición de los componentes. Debido a que el 60,5 % de las tareas corresponde a mantenimiento predictivo, será importante fortalecer el registro y análisis de variables de condición para anticipar el deterioro de los componentes críticos y ajustar oportunamente las frecuencias de intervención.
4. La aplicación de SMED, 5S, gestión visual y estandarización de procedimientos deberá validarse mediante mediciones reales durante futuras intervenciones del HPGR. En particular, el cambio de rodillos deberá ser monitoreado tomando como referencia la reducción estimada de 750 a 550 minutos, equivalente a 3,3 horas y 26,7 %, con el propósito de determinar si el beneficio proyectado puede alcanzarse en condiciones reales de operación y mantenerse en el tiempo.
5. La evaluación económica de la propuesta deberá complementarse durante una futura etapa de implementación mediante el registro de costos de mantenimiento, horas-hombre, repuestos, fallas no programadas y tiempos de parada, relacionándolos con los indicadores de disponibilidad y desempeño del HPGR. Este seguimiento permitirá cuantificar monetariamente el beneficio potencial asociado a la reducción de 3,3 horas por intervención y a la capacidad de procesamiento potencialmente recuperada de 7 920 toneladas por intervención, evitando considerar estos valores como ahorros económicos comprobados mientras no se disponga de mediciones reales.

6. El Plan de Mantenimiento Integrador deberá mantenerse como un documento dinámico, de manera que las frecuencias, tareas y recursos definidos puedan ser ajustados a partir de los resultados obtenidos durante las intervenciones del HPGR. La incorporación periódica de información sobre fallas, tiempos de intervención, cumplimiento de tareas y condiciones de los componentes permitirá retroalimentar el análisis RCM y fortalecer progresivamente la efectividad de la propuesta de mantenimiento.
7. Finalmente, se recomienda que futuras aplicaciones incorporen herramientas digitales de gestión del mantenimiento, como sistemas computarizados de mantenimiento (CMMS), análisis de datos históricos y monitoreo predictivo, con la finalidad de fortalecer la toma de decisiones y aumentar la capacidad de anticipación ante posibles fallas del equipo.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alsyouf, I. (2007). The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. *International Journal of Production Economics*, 105(1), 70–78.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.06.057>
- Bermúdez, R., & Rodríguez, A. (2012). *Metodología de la investigación*. Editorial San Marcos.
- Bond, F. C. (1961). Crushing and grinding calculations. *British Chemical Engineering*, 6(6), 378–385.
- Castañeda, C. (1996). *Metodología de la investigación científica*. Trillas.
- Deming, W. E. (1989). *Calidad, productividad y competitividad: La salida de la crisis*. Díaz de Santos.
- Fernández, M. (2017). *Aplicación combinada de RCM y Lean Maintenance en planta cementera* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
- FLSmidth. (2022). High pressure grinding rolls – Efficient grinding [Product overview].
<https://fls.com/en/equipment/grinding/high-pressure-grinding-rolls>
- Global Mining Review. (2019, 15 de agosto). High pressure grinding rolls provide energy savings.
<https://www.globalminingreview.com/handling-processing/15082019/high-pressure-grinding-rolls-provide-energy-savings/>
- Gómez, L. (2018). *Implementación de indicadores de mantenimiento en equipos de chancado* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio UNSA.
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (6.ª ed.). McGraw-Hill.
- Huamán, R. (2020). *Aplicación de Lean Maintenance en talleres metalmecánicos* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Cybertesis UNMSM.
- International Organization for Standardization. (2016). ISO 14224:2016 Petroleum, petrochemical and natural gas industries—Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. International Organization for Standardization.
- 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.ymssp.2005.09.012>

- Klymowsky, R. (2010). High pressure grinding rolls (HPGR). In *Proceedings Minerals Processing '08* (pp. 107–113). The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. <https://www.saimm.co.za/Journal/v110n03p107.pdf>
- Latam FDI. (2024, 27 de enero). The importance of mining in Peru. <https://latamfdi.com/mining-in-peru/>
- Logan, J. (2018). *Research methods for engineering*. Routledge.
- Metso. (2023). HRC™ Series—High pressure grinding rolls (HPGR). <https://www.metso.com/portfolio/hrc-series/>
- Mobley, R. K. (2004). *Maintenance fundamentals* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Morley, C. (2006). High pressure grinding rolls—A technology review. *Minerals Engineering*, 19(3), 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.10.002>
- Morrell, S., Shi, F., & Tavares, L. (2015). Modelling and simulation of mineral processing systems. *Minerals Engineering*, 73, 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.007>
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total productive maintenance*. Productivity Press.
- O'Connor, P. D. T., & Kleyner, A. (2012). *Practical reliability engineering* (5th ed.). Wiley.
- Quispe, A. (2019). *Aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en una planta concentradora* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
- Ramírez, J. (2021). *Gestión del mantenimiento en molinos HPGR en minería peruana* [Tesis de maestría, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio UCSM.
- SAE International. (1999). SAE JA1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes. Society of Automotive Engineers.
- SAE International. (2002). SAE JA1012: A guide to the reliability-centered maintenance (RCM) standard. Society of Automotive Engineers.
- Schönert, K. (1988). A first survey of grinding with high-compression roller mills. *International Journal of Mineral Processing*, 22(1–4), 401–412. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(88\)90072-2](https://doi.org/10.1016/0301-7516(88)90072-2)
- Shingo, S. (1985). *A revolution in manufacturing: The SMED system*. Productivity Press.
- Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2004). *RCM: Gateway to world class maintenance*. Butterworth-Heinemann.
- Smith, R., & Hawkins, B. (2004). *Lean maintenance: Reduce costs, improve quality, and increase market share*. Butterworth-Heinemann.

- Stamatis, D. H. (2003). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution (2nd ed.). ASQ Quality Press.
- Takraf GmbH. (2021). High pressure grinding rolls (HPGR). <https://www.takraf.com/product/high-pressure-grinding-rolls-hpgr/>
- The Institute of Asset Management. (2015). Asset management: An anatomy. The Institute of Asset Management.
- Thyssenkrupp Industrial Solutions. (2014). POLYCOM® high-pressure grinding roll [Brochure]. https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_legacy/UCPthyssenkruppBAIS/assets.files/products___services/mineral_processing/grinding_plants/polycom_en.pdf
- Vara, A. (2015). Metodología de la investigación (3.ª ed.). Editorial San Marcos.
- Wireman, T. (2005). Developing performance indicators for managing maintenance. Industrial Press.
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (1996). Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation. Simon & Schuster.
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation. Free Press.
- Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). The machine that changed the world. Free Press.
- syouf, I. (2007). The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. International Journal of Production Economics, 105(1), 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.06.057>
- Bermúdez, R., & Rodríguez, A. (2012). Metodología de la investigación. Lima: Editorial San Marcos.
- Bond, F. C. (1961). Crushing and grinding calculations. British Chemical Engineering, 6(6), 378–385.
- Castañeda, C. (1996). Metodología de la investigación científica. México: Trillas.
- Deming, W. E. (1989). Calidad, productividad y competitividad: la salida de la crisis. Madrid: Díaz de Santos.
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (6.ª ed.). Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Logan, J. (2018). Research methods for engineering. London: Routledge.
- Morrell, S., Shi, F., & Tavares, L. (2015). Modelling and simulation of mineral processing systems. Minerals Engineering, 73, 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.007>

- Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance* (2.^a ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Schönert, K. (1988). A first survey of grinding with high-compression roller mills. *International Journal of Mineral Processing*, 22(1–4), 401–412.
- Vara, A. (2015). *Metodología de la investigación* (3.^a ed.). Lima: Editorial San Marcos.
- Womack, J., & Jones, D. (2003). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York: Free Press.
- Alsyouf, I. (2007). The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. *International Journal of Production Economics*, 105(1), 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.06.057>
- Fernández, M. (2017). *Aplicación combinada de RCM y Lean Maintenance en planta cementera*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
- Gómez, L. (2018). *Implementación de indicadores de mantenimiento en equipos de chancado*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín]. UNSA Repositorio.
- Huamán, R. (2020). *Aplicación de Lean Maintenance en talleres metalmecánicos*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Cybertesis UNMSM.
- Morrell, S., Shi, F., & Tavares, L. (2015). Modelling and simulation of mineral processing systems. *Minerals Engineering*, 73, 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.007>
- Quispe, A. (2019). *Aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en una planta concentradora*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
- Ramírez, J. (2021). *Gestión del mantenimiento en molinos HPGR en minería peruana*. [Tesis de maestría, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio UCSM.
- Womack, J., & Jones, D. (2003). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York: Free Press.
- Global Mining Review. (2019, agosto 15). High pressure grinding rolls provide energy savings. *Global Mining Review*. <https://www.globalminingreview.com/handling-processing/15082019/high-pressure-grinding-rolls-provide-energy-savings/>
- Latam FDI. (2024, enero 27). The importance of mining in Peru. *LatamFDI*. <https://latamfdi.com/mining-in-peru/>
- Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance* (2.^a ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

- Schönert, K. (1988). A first survey of grinding with high-compression roller mills. *International Journal of Mineral Processing*, 22(1–4), 401–412. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(88\)90072-2](https://doi.org/10.1016/0301-7516(88)90072-2)
- FLSmidth. (2022). High pressure grinding rolls – Efficient grinding (product overview). Retrieved from <https://fls.com/en/equipment/grinding/high-pressure-grinding-rolls>
- Klymowsky, R. (2010). High Pressure Grinding Rolls (HPGR). In *Proceedings Minerals Processing '08* (pp. 107–113). The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Retrieved from <https://www.saimm.co.za/Journal/v110n03p107.pdf>
- Metso. (2023). HRC™ Series – High pressure grinding rolls (HPGR). Retrieved from <https://www.metso.com/portfolio/hrc-series/>
- Takraf GmbH. (2021). High Pressure Grinding Rolls (HPGR). Retrieved from <https://www.takraf.com/product/high-pressure-grinding-rolls-hpgr/>
- Thyssenkrupp Industrial Solutions. (2014). POLYCOM® high-pressure grinding roll (brochure). Retrieved from https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_legacy/UCPthyssenkruppBAIS/assets.files/products___services/mineral_processing/grinding_plants/polycom_en.pdf
- International Organization for Standardization. (2016). ISO 14224:2016 Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. International Organization for Standardization.
- 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.ymssp.2005.09.012>
- Mobley, R. K. (2004). *Maintenance fundamentals* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Morley, C. (2006). High pressure grinding rolls — A technology review. *Minerals Engineering*, 19(3), 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.10.002>
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press.
- O'Connor, P. D. T., & Kleyner, A. (2012). *Practical reliability engineering* (5th ed.). Wiley.
- SAE International. (1999). SAE JA1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes. Society of Automotive Engineers.
- SAE International. (2002). SAE JA1012: A guide to the reliability-centered maintenance (RCM) standard. Society of Automotive Engineers.
- Shingo, S. (1985). *A revolution in manufacturing: The SMED system*. Productivity Press.

- Smith, A. M., & Hinchcliffe, G. R. (2004). RCM: Gateway to world class maintenance. Butterworth-Heinemann.
- Smith, R., & Hawkins, B. (2004). Lean maintenance: Reduce costs, improve quality, and increase market share. Butterworth-Heinemann.
- Stamatis, D. H. (2003). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution (2nd ed.). ASQ Quality Press.
- The Institute of Asset Management. (2015). Asset management: An anatomy. The Institute of Asset Management.
- Wireman, T. (2005). Developing performance indicators for managing maintenance. Industrial Press.
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (1996). Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation. Simon & Schuster.
- Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). The machine that changed the world. Free Press.

ANEXOS

Anexo 1

Sistema estructura rodillo

Código	Sistema	Subsistema	Componente	Modo de falla	Actividad de mantenimiento	Tipo	Frecuencia	Responsable	HH	Recursos	Procedimiento	Lean	KPI
PM-001	Rodillos y estructura	Rodillo fijo	Studs	Desgaste de studs	Inspección visual del desgaste y medición de altura de studs	Predictivo	Semanal	Técnico mecánico	0.5	Vernier, linterna, EPP	INS-001	Gestión Visual	% Cumplimiento
PM-002	Rodillos y estructura	Rodillo fijo	Superficie del rodillo	Desgaste irregular	Inspección superficial y registro fotográfico	Predictivo	Semanal	Técnico mecánico	0.5	Cámara, linterna	INS-002	Gestión Visual	MTBF
PM-003	Rodillos y estructura	Rodillo móvil	Rodillo	Desalineamiento	Verificación de alineación	Preventivo	Mensual	Supervisor mecánico	2	Equipo láser	PROC-003	Trabajo estandarizado	MTTR
PM-004	Rodillos y estructura	Rodamiento	Rodamientos	Sobrecalentamiento	Medición de temperatura mediante termografía	Predictivo	Mensual	Técnico predictivo	1	Cámara termográfica	PROC-004	5S	Temperatura
PM-005	Rodillos y estructura	Rodamientos	Lubricación	Deficiente lubricación	Revisión del estado del lubricante	Preventivo	Mensual	Lubricador	1	Pistola de grasa	PROC-005	5S	Consumo grasa
PM-006	Rodillos y estructura	Bastidor	Estructura	Grietas	Inspección por líquidos penetrantes	Predictivo	Trimestral	Inspector mecánico	2	Kit LP	PROC-006	Gestión Visual	Nº grietas
PM-007	Rodillos y estructura	Bastidor	Pernos	Aflojamiento	Torque de pernos estructurales	Preventivo	Trimestral	Técnico mecánico	2	Torquímetro	PROC-007	Estandarización	% cumplimiento
PM-008	Rodillos y estructura	Rodillo móvil	Sistema de desplazamiento	Atascamiento	Limpieza y verificación del mecanismo	Preventivo	Mensual	Técnico mecánico	1	Herramientas manuales	PROC-008	5S	Disponibilidad
PM-009	Rodillos y estructura	Rodillos	Cambio de rodillos	Desgaste crítico	Cambio programado de rodillos	Correctivo programado	Según condición	Equipo mantenimiento	8	Puente grúa, herramientas hidráulicas	PROC-009	SMED	MTTR
PM-010	Rodillos y estructura	General	Sistema	Vibraciones anormales	Medición y análisis de vibraciones	Predictivo	Mensual	Analista predictivo	1.5	Analizador SKF	PROC-010	Gestión Visual	Vibración RMS

Anexo 2

Sistema hidráulico

Código	Sistema	Subsistema	Componente	Modo de falla	Actividad de mantenimiento	Tipo de mantenimiento	Frecuencia	Responsable	HH	Recursos/Herramientas	Procedimiento	Herramienta Lean	KPI
PM-011	Sistema Hidráulico	Unidad hidráulica	Depósito de aceite	Contaminación del aceite	Muestreo y análisis físicoquímico del aceite	Predictivo	Trimestral	Especialista en lubricación	1	Kit de muestreo	PROC-011	5S	Resultado análisis
PM-012	Sistema Hidráulico	Unidad hidráulica	Aceite hidráulico	Bajo nivel de aceite	Verificación y reposición del nivel de aceite	Preventivo	Semanal	Técnico hidráulico	0.5	Aceite hidráulico, visor de nivel	PROC-012	Gestión Visual	% Cumplimiento
PM-013	Sistema Hidráulico	Sistema de filtrado	Filtro hidráulico	Saturación del filtro	Inspección del indicador de saturación y reemplazo del filtro	Preventivo	Mensual	Técnico hidráulico	1	Filtro nuevo, herramientas manuales	PROC-013	Estandarización	Disponibilidad
PM-014	Sistema Hidráulico	Sistema de bombeo	Bomba hidráulica	Desgaste interno	Medición de presión y caudal de operación	Predictivo	Mensual	Técnico hidráulico	1	Manómetro, caudalímetro	PROC-014	Gestión Visual	Presión
PM-015	Sistema Hidráulico	Sistema de bombeo	Bomba hidráulica	Vibraciones anormales	Análisis de vibraciones de la bomba	Predictivo	Trimestral	Analista predictivo	1.5	Analizador de vibraciones	PROC-015	5S	Vibración RMS
PM-016	Sistema Hidráulico	Cilindros hidráulicos	Sellos	Fugas de aceite	Inspección visual de sellos y conexiones	Predictivo	Semanal	Técnico hidráulico	0.5	Linterna, paños absorbentes	PROC-016	Gestión Visual	Nº fugas
PM-017	Sistema Hidráulico	Cilindros hidráulicos	Vástago	Desgaste o rayaduras	Inspección superficial del vástago	Predictivo	Mensual	Técnico hidráulico	1	Linterna, calibrador	PROC-017	Gestión Visual	% inspecciones
PM-018	Sistema Hidráulico	Acumuladores	Acumulador hidráulico	Pérdida de presión de nitrógeno	Verificación y recarga de presión	Preventivo	Trimestral	Técnico hidráulico	1.5	Kit de carga de nitrógeno	PROC-018	Trabajo estandarizado	Presión acumulador
PM-019	Sistema Hidráulico	Mangueras hidráulicas	Mangueras	Fisuras o desgaste	Inspección visual de mangueras y conexiones	Preventivo	Semanal	Técnico hidráulico	0.5	Linterna	PROC-019	Gestión Visual	Nº defectos
PM-020	Sistema Hidráulico	Válvulas hidráulicas	Válvulas de control	Mal funcionamiento	Verificación de apertura, cierre y respuesta	Preventivo	Mensual	Técnico hidráulico	1	Herramientas manuales	PROC-020	Estandarización	Disponibilidad
PM-021	Sistema Hidráulico	Sistema hidráulico	Tuberías	Fugas en uniones	Inspección de uniones y reapriete	Preventivo	Mensual	Técnico hidráulico	1	Llaves de torque	PROC-021	Trabajo estandarizado	Nº fugas
PM-022	Sistema Hidráulico	Instrumentación	Sensores de presión	Lecturas incorrectas	Calibración de sensores de presión	Preventivo	Semestral	Instrumentista	2	Calibrador de presión	PROC-022	Estandarización	Exactitud
PM-023	Sistema Hidráulico	Instrumentación	Transmisores	Falla de señal	Verificación funcional de transmisores	Preventivo	Semestral	Instrumentista	1	Multímetro	PROC-023	Gestión Visual	Disponibilidad

PM-024	Sistema Hidráulico	Unidad hidráulica	Sistema completo	Sobrecalentamiento	Inspección de temperatura del sistema mediante termografía	Predictivo	Mensual	Técnico predictivo	1	Cámara termográfica	PROC-024	5S	Temperatura
PM-025	Sistema Hidráulico	General	Sistema hidráulico	Pérdida de rendimiento	Inspección integral del sistema y actualización de registros	Preventivo	Trimestral	Supervisor de mantenimiento	2	Checklist de inspección	PROC-025	Lean Daily Management	Cumplimiento del plan



Anexo 3

Sistema accionamiento transmisión

Código	Sistema	Subsistema	Componente	Modo de falla	Actividad de mantenimiento	Tipo de mantenimiento	Frecuencia	Responsable	H/H	Recursos/Herramientas	Procedimiento	Herramienta Lean	KPI
PM-026	Accionamiento y Transmisión	Motor eléctrico	Estator	Sobrecalentamiento	Inspección mediante termografía infrarroja	Predictivo	Mensual	Técnico predictivo	1	Cámara termográfica	PROC-026	Gestión Visual	Temperatura
PM-027	Accionamiento y Transmisión	Motor eléctrico	Bobinado	Degradación del aislamiento	Medición de resistencia de aislamiento	Predictivo	Semestral	Técnico eléctrico	2	Megóhmetro	PROC-027	Trabajo estandarizado	Resistencia de aislamiento
PM-028	Accionamiento y Transmisión	Motor eléctrico	Rodamientos	Desgaste	Análisis de vibraciones	Predictivo	Mensual	Analista predictivo	1.5	Analizador de vibraciones	PROC-028	5S	Vibración RMS
PM-029	Accionamiento y Transmisión	Motor eléctrico	Ventilador	Obstrucción	Limpieza del sistema de ventilación	Preventivo	Mensual	Técnico eléctrico	1	Aire comprimido	PROC-029	5S	Temperatura
PM-030	Accionamiento y Transmisión	Motor eléctrico	Bornes	Aflojamiento	Verificación y reapriete de conexiones eléctricas	Preventivo	Trimestral	Técnico eléctrico	1	Torquímetro	PROC-030	Estandarización	% Cumplimiento
PM-031	Accionamiento y Transmisión	Acoplamiento	Acoplamiento flexible	Desalineamiento	Verificación mediante alineación láser	Preventivo	Trimestral	Técnico mecánico	2	Equipo láser	PROC-031	Trabajo estandarizado	MTTR
PM-032	Accionamiento y Transmisión	Acoplamiento	Elemento elástico	Desgaste	Inspección visual del elemento flexible	Preventivo	Mensual	Técnico mecánico	0.5	Linterna	PROC-032	Gestión Visual	% Inspecciones
PM-033	Accionamiento y Transmisión	Reductor	Engranajes	Desgaste de dientes	Análisis de vibraciones y ruido	Predictivo	Mensual	Analista predictivo	2	Analizador SKF	PROC-033	Gestión Visual	Vibración
PM-034	Accionamiento y Transmisión	Reductor	Aceite lubricante	Contaminación	Muestreo y análisis de aceite	Predictivo	Trimestral	Especialista lubricación	1	Kit de muestreo	PROC-034	5S	ISO de limpieza
PM-035	Accionamiento y Transmisión	Reductor	Nivel de aceite	Bajo nivel	Verificación y reposición del lubricante	Preventivo	Semanal	Lubricador	0.5	Aceite recomendado	PROC-035	Gestión Visual	Nivel aceite
PM-036	Accionamiento y Transmisión	Reductor	Retenes	Fugas	Inspección visual y sustitución cuando corresponda	Preventivo	Mensual	Técnico mecánico	1	Kit de retenes	PROC-036	Gestión Visual	Nº fugas

PM-037	Accionamiento y Transmisión	Ejes	Eje principal	Desgaste	Medición dimensional y verificación de concentricidad	Predictivo	Semestral	Inspector mecánico	2	Micrómetro	PROC-037	Trabajo estandarizado	Desviación
PM-038	Accionamiento y Transmisión	Cojinetes	Cojinete	Sobrecalentamiento	Monitoreo de temperatura	Predictivo	Mensual	Técnico predictivo	1	Cámara térmica	PROC-038	Gestión Visual	Temperatura
PM-039	Accionamiento y Transmisión	Cojinetes	Cojinete	Lubricación deficiente	Relubricación según especificación	Preventivo	Mensual	Lubricador	1	Grasa recomendada	PROC-039	5S	Consumo de grasa
PM-040	Accionamiento y Transmisión	Sistema de transmisión	Tornillería	Aflojamiento	Verificación y torque de fijaciones	Preventivo	Trimestral	Técnico mecánico	1	Torquímetro	PROC-040	Estandarización	% Cumplimiento
PM-041	Accionamiento y Transmisión	Instrumentación	Sensor de vibración	Lecturas erróneas	Calibración del sensor	Preventivo	Anual	Instrumentista	2	Calibrador	PROC-041	Trabajo estandarizado	Exactitud
PM-042	Accionamiento y Transmisión	Instrumentación	Tacómetro	Error de velocidad	Verificación funcional	Preventivo	Semestral	Instrumentista	1	Tacómetro patrón	PROC-042	Gestión Visual	Error (%)
PM-043	Accionamiento y Transmisión	Sistema eléctrico	Cables de potencia	Sobrecalentamiento	Inspección termográfica de conexiones	Predictivo	Trimestral	Técnico eléctrico	1	Cámara termográfica	PROC-043	Gestión Visual	Temperatura
PM-044	Accionamiento y Transmisión	Sistema eléctrico	Tablero eléctrico	Acumulación de polvo	Limpieza e inspección general	Preventivo	Trimestral	Técnico eléctrico	1	Aspiradora industrial	PROC-044	5S	Disponibilidad
PM-045	Accionamiento y Transmisión	General	Sistema completo	Pérdida de eficiencia	Inspección integral y actualización del historial del equipo	Preventivo	Trimestral	Supervisor de mantenimiento	2	Checklist, CMMS	PROC-045	Lean Daily Management	Cumplimiento del plan

Anexo 4

Programa anual mantto

Código	Actividad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PM-001	Inspección de studs	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
PM-004	Termografía de rodamientos		X		X		X		X		X		X
PM-011	Análisis de aceite			X			X			X			X

Anexo 5

Recursos y herramientas

Código	Actividad	Personal	Herramientas	Repuestos	EPP
PM-009	Cambio de rodillos	6 técnicos	Puente grúa, llaves hidráulicas	Rodillos, studs	Casco, guantes, arnés
PM-018	Recarga de acumuladores	2 técnicos	Kit de nitrógeno	Sellos	EPP hidráulico
PM-034	Análisis de aceite	1 especialista	Kit de muestreo	Aceite	Guantes, lentes

Anexo 6

Matriz de repuestos críticos

Componente	Repuesto	Criticidad	Stock mínimo	Tiempo de entrega
Rodillo fijo	Studs	Alta	200	30 días
Rodamientos	Rodamiento principal	Alta	2	45 días
Cilindros hidráulicos	Kit de sellos	Alta	4	20 días
Bomba hidráulica	Kit de reparación	Media	1	30 días
Motor eléctrico	Rodamientos	Media	2	15 días

Anexo 7

Indicadores KPI

Indicador	Fórmula	Meta
Disponibilidad	$\frac{\text{Tiempo operativo}}{\text{Tiempo programado}} \times 100$	$\geq 95 \%$
MTBF	$\frac{\text{Horas operativas}}{\text{Número de fallas}}$	Incrementar
MTTR	$\frac{\text{Horas de reparación}}{\text{Número de reparaciones}}$	Reducir
Cumplimiento del PM	$\frac{\text{OT ejecutadas}}{\text{OT programadas}} \times 100$	$\geq 95 \%$
Backlog	Horas pendientes	≤ 2 semanas

Anexo 8

Formato de inspección

Equipo	Fecha	Inspector	Horómetro
Componente	Estado	Observación	Acción
Rodillo fijo	☐ Bueno ☐ Regular ☐ Malo		
Rodillo móvil	☐ Bueno ☐ Regular ☐ Malo		
Sistema hidráulico	☐ Bueno ☐ Regular ☐ Malo		
Reductor	☐ Bueno ☐ Regular ☐ Malo		
Motor	☐ Bueno ☐ Regular ☐ Malo		

Anexo 9

Matriz de lubricación

Punto de lubricación	Lubricante	Cantidad	Frecuencia	Responsable
Rodamientos del rodillo fijo	Grasa EP2	Según fabricante	Mensual	Lubricador
Reductor	Aceite ISO VG 320	Según nivel	Trimestral	Lubricador
Acoplamiento	Grasa	Según fabricante	Trimestral	Técnico mecánico

Anexo 10

Procedimientos asociados

Código	Procedimiento
PROC-001	Inspección de studs
PROC-002	Inspección superficial de rodillos
PROC-003	Alineación láser
PROC-004	Termografía
PROC-005	Lubricación
PROC-006	Inspección por líquidos penetrantes
PROC-045	Inspección integral del sistema

Anexo 11

Comparación entre la Matriz de Criticidad Convencional y el Análisis de Criticidad Basado en Riesgo (RBCA)

1 Introducción

Con el propósito de validar la selección de los sistemas críticos del HPGR, se realizó una comparación entre la metodología de Matriz de Criticidad Convencional y el Análisis de Criticidad Basado en Riesgo (Risk Based Criticality Analysis - RBCA), metodología utilizada en el desarrollo de la presente investigación.

La finalidad de esta comparación es demostrar que, independientemente del método empleado para determinar la criticidad, los sistemas identificados como prioritarios para la implementación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) corresponden a los mismos componentes del equipo, otorgando consistencia y validez técnica a la propuesta desarrollada.

2 Metodologías comparadas

Matriz de Criticidad Convencional

La Matriz de Criticidad Convencional es una herramienta utilizada para priorizar equipos o sistemas mediante la evaluación de dos variables principales:

- Probabilidad de ocurrencia de la falla.
- Consecuencia de la falla.

La criticidad se obtiene mediante la combinación de ambas variables, permitiendo clasificar los equipos en niveles de criticidad alta, media o baja.

Análisis de Criticidad Basado en Riesgo (RBCA)

El RBCA incorpora los mismos criterios de probabilidad y consecuencia; sin embargo, profundiza el análisis considerando el riesgo asociado a cada modo de falla, evaluando aspectos relacionados con:

- Seguridad.
- Medio ambiente.
- Producción.
- Costos de mantenimiento.
- Disponibilidad del equipo.

Este enfoque permite una priorización más objetiva para seleccionar los sistemas que serán sometidos al análisis RCM.

3 Criterios de comparación

Criterio	Matriz de Criticidad	RBCA
Probabilidad de falla	✓	✓

Criterio	Matriz de Criticidad	RBCA
Consecuencia operacional	✓	✓
Impacto en seguridad	✓	✓
Impacto ambiental	✓	✓
Impacto económico	✓	✓
Evaluación del riesgo	Parcial	Completa
Priorización de sistemas	Alta	Alta

G.4 Resultados obtenidos

Aplicando ambos métodos sobre los principales sistemas del HPGR se obtuvo el siguiente resultado comparativo.

Sistema del HPGR	Matriz de Criticidad	RBCA (tesis)	Coincidencia
Sistema de Rodillos y Estructura	Crítico	Crítico	Sí
Sistema Hidráulico	Crítico	Crítico	Sí
Sistema de Accionamiento y Transmisión	Crítico	Crítico	Sí

G.5 Comparación gráfica

Sistema	Matriz de Criticidad	RBCA
Rodillos y estructura	Alta	Alta
Sistema hidráulico	Alta	Alta
Accionamiento y transmisión	Alta	Alta

Figura G.1. Comparación de los resultados obtenidos mediante la Matriz de Criticidad Convencional y el Análisis de Criticidad Basado en Riesgo (RBCA).

(En Word puedes representar esta comparación con un gráfico de barras, donde ambos métodos muestren el mismo nivel de criticidad para los tres sistemas.)

6 Análisis comparativo

Los resultados muestran que tanto la Matriz de Criticidad Convencional como el Análisis de Criticidad Basado en Riesgo (RBCA) identifican como sistemas prioritarios del HPGR al sistema de rodillos y estructura, al sistema hidráulico y al sistema de accionamiento y transmisión.

La coincidencia entre ambos métodos evidencia que los tres sistemas concentran el mayor impacto sobre la disponibilidad, confiabilidad y continuidad operacional del equipo. No obstante, el RBCA proporciona un mayor nivel de detalle al incorporar el análisis del riesgo asociado a cada modo de falla, permitiendo una priorización más objetiva para la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y de las herramientas Lean Maintenance.

7 Conclusiones

- Ambos métodos identifican los mismos sistemas críticos del HPGR.
- La Matriz de Criticidad constituye una herramienta adecuada para una evaluación inicial de criticidad.
- El RBCA ofrece una evaluación más robusta al considerar el riesgo asociado a los modos de falla.
- La coincidencia de resultados valida la selección de los sistemas críticos utilizada en la presente investigación y respalda técnicamente la aplicación de la metodología RCM sobre dichos sistemas.

