

Estrategia de mantenimiento basado en RCM, incorporando el análisis de modos de falla, efectos y criticidad (FMECA), de la trituradora móvil RM RUBBLE MÁSTER RG 80GO

Jose Mario Romero Olmedo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

Juan Pablo Flórez Mera

PhD. en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Primeramente, dedico este trabajo a Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y las oportunidades para culminar esta etapa.

A mi familia, mi esposa y mi hija por ser el pilar que sostiene cada uno de mis sueños.

A mi madre y a mi padre, cuyo amor, sacrificio y apoyo incondicional han sido la base de mi formación y el motor que me impulsa a seguir creciendo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	10
1. Objetivos.....	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos.....	12
2. Generalidades	13
2.1 Localización geográfica corredor Barichara-Zapatoca.....	14
2.2 Ubicación trituradora Rubble Master 80GO!	15
2.3 Contextualización operacional	16
2.4 Estado actual del mantenimiento	17
2.5 Descripción equipo	19
3. Marco Teórico	21
3.1 Metodología RCM.....	22
3.2 Análisis de modos y efectos de fallas críticas (FMECA).....	25
3.3 Indicadores de gestión en mantenimiento	26
3.3.1 Confiabilidad	26
3.3.2 Disponibilidad	26
3.3.3 Mantenibilidad.....	26
4. Descripción de la Metodología.....	27
4.1 Recopilación y manejo de la información	28
4.1.1 Documentación existente.....	29

4.1.2 Jerarquización de sistemas y equipos	29
4.2 Jerarquización del riesgo	30
4.2.1 Alcance de la matriz de criticidad	31
4.2.2 Criterios de evaluación	31
4.2.3 Resultados del proceso de AC	33
5. Desarrollo de la metodología RCM.....	34
5.1 Tratamiento y recopilación de la información.....	35
5.1.1 Definición de fronteras e interfases	36
5.1.2 Especificaciones técnicas	37
5.2 Proceso mantenimiento centrado en confiabilidad.....	39
5.2.1 Funciones del sistema.....	39
5.2.2 Fallas funcionales	39
5.2.3 Modos de falla	40
5.2.4 Falla oculta	41
5.2.5 Efectos de falla y jerarquización del riesgo.....	42
5.2.6 Selección de tareas de mantenimiento.....	46
6. Indicadores de gestión	49
6.1 Indicadores de mantenimiento.....	49
6.1.1 Confiabilidad	50
6.1.2 Mantenibilidad.....	50
6.1.3 Disponibilidad	51
6.2 Indicadores de costos.....	52
6.2.1 Costo de la mano de obra de mantenimiento.....	52

6.2.2 Eficiencia de costo de mantenimiento (ECM).....	52
7. Conclusiones.....	53
Referencias Bibliográficas.....	56

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Departamento de Santander	14
Figura 2. Trayecto proyectado tramo vial que comunica a Zapatoca-Galán-Barichara	15
Figura 3. Localización trituradora Rubble Master 80GO!	15
Figura 4. Trituradora Rubble Master RM 80 GO!	19
Figura 5. Trituradora Rubbe Mastrer 80GO!	21
Figura 6. Proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad.....	23
Figura 7. Proceso de gestión del mantenimiento propuesto	28
Figura 8. Resultados análisis de criticidad	33
Figura 9. Componentes cámara de trituración.....	35
Figura 10. Limites e interfases del elemento de estudio	36
Figura 11. Dimensiones principales de la máquina.....	37
Figura 12. Canal vibratorio.....	37
Figura 13. Motor Diesel	38
Figura 14. Trituradora de impacto	38
Figura 15. Fallas funcionales del sistema en estudio	40
Figura 16. Modos de falla cámara de trituración.....	41
Figura 17. Falla Oculta	42
Figura 18. Efectos de falla y jerarquización del riesgo falla funcional 1A	44
Figura 19. Efectos de falla y jerarquización del riesgo	45
Figura 20. Selección de tareas de mantenimiento nivel de riesgo alto.....	46

Figura 21. Selección de tareas de mantenimiento Nivel de riesgo medio.....	47
Figura 22. Selección de tareas de mantenimiento nivel de riesgo bajo.....	48

Resumen

Título: Estrategia de mantenimiento basado en RCM, incorporando el análisis de modos de falla, efectos y criticidad (FMECA), de la trituradora móvil RM RUBBLE MÁSTER RG 80GO*.

Autor: Jose Mario Romero Olmedo**

Palabras Clave: RCM, FMECA, Petreo, Trituradora, Averías, Blindaje, Pantalla.

Descripción:

Este trabajo presenta el desarrollo de un modelo integral de gestión de mantenimiento basado en la metodología RCM (Reliability Centered Maintenance) aplicado a la trituradora móvil Rubble Master 80GO!, empleando criterios de riesgo, análisis de modos de falla (FMEA/FMECA), efectos y criticidad. El objetivo fue trascender de un esquema de mantenimiento correctivo o preventivo genérico, usualmente heredado de las recomendaciones del fabricante, hacia una estrategia moderna que optimice la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad del equipo en condiciones reales de operación.

El modelo de mantenimiento propuesto se estructuró en dos grandes fases: la primera fase incluyó la caracterización técnica y operativa de los sistemas y componentes de la trituradora, la recopilación de datos históricos de fallas y reparaciones, y la ejecución de un análisis de criticidad que permitió priorizar los sistemas con mayor impacto en la disponibilidad de la planta. La segunda fase correspondió a la aplicación del proceso RCM, en la que se desarrolló el análisis FMECA para identificar y clasificar modos de falla potenciales, evaluar su frecuencia, severidad y detectabilidad, y finalmente construir el árbol de decisión que derivó en tareas de mantenimiento óptimas.

Como resultado, se obtuvo un plan de mantenimiento más robusto, que incorpora actividades preventivas, predictivas y a condición, reduciendo la dependencia de tareas correctivas y minimizando el riesgo de paradas no programadas. Este enfoque permitió focalizar esfuerzos en el sistema de cámara de trituración, para lograr una mejora sustancial en la planificación de recursos técnicos y en la confiabilidad del proceso de producción.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento Director: Juan Pablo Flórez Mera, PhD. en Ingeniería Mecánica

Abstract

Title: Maintenance strategy based on RCM, incorporating failure modes, effects, and criticality analysis (FMECA), for the rm rubble master RG 80GO MOBILE CRUSHER*

Author: Jose Mario Romero Olmedo**

Key Words: RCM, FMECA, Aggregate, Crusher, Failures, Liners, Screens.

Description:

This work presents the development of a comprehensive maintenance management model based on the Reliability Centered Maintenance (RCM) methodology, applied to the Rubble Master 80GO! mobile crusher. The approach uses risk criteria, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA/FMECA), and criticality evaluation. The main objective was to move beyond a purely corrective or generic preventive maintenance scheme, usually inherited from the manufacturer's recommendations, toward a modern strategy that optimizes the reliability, availability, and maintainability of the equipment under real operating conditions.

The proposed maintenance model was structured in two major phases. The first phase included the technical and operational characterization of the crusher's systems and components, the collection of historical data on failures and repairs, and the execution of a criticality analysis that allowed prioritizing the systems with the greatest impact on plant availability. The second phase involved the implementation of the RCM process, which included the development of the FMECA analysis to identify and classify potential failure modes, evaluate their frequency, severity, and detectability, and finally construct the decision tree that led to the definition of optimal maintenance tasks.

As a result, a more robust maintenance plan was obtained, incorporating preventive, predictive, and condition-based activities, reducing reliance on corrective actions and minimizing the risk of unplanned downtime. This approach allowed focusing efforts on the crushing chamber system, achieving a substantial improvement in the planning of technical resources and the reliability of the production process.

* Work of Grade

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento Director: Juan Pablo Flórez Mera, PhD. en Ingeniería Mecánica

Introducción

La gestión eficiente del mantenimiento en equipos orienta a las empresas a incrementar la productividad y continuidad operativa de proyectos de infraestructura (Moubray, 2004; Mobley, 2002). En el caso del consorcio Constructor GM Santander, la trituradora móvil RM Rubble Máster RG 80GO constituye un activo de gran importancia e interés para el procesamiento de materiales pétreos. Sin embargo, se ha observado que la estrategia de mantenimiento de la compañía presenta limitaciones debido a que se enfoca en correcciones y mantenimientos de rutina (Smith & Hawkins, 2004), sin considerar criterios técnicos asociados al comportamiento real de las partes ni al impacto operativo de sus fallas (ISO 55000, 2014).

El presente proyecto se plantea como respuesta a la recurrencia de fallas operativas y la consecuente pérdida de tiempo productivo, factores que han promovido una gestión predominantemente reactiva del mantenimiento (Mobley, 2002). Esta situación ha derivado en paradas no programadas, disminución en los niveles de producción, incrementos en los costos debido a la adquisición urgente de repuestos, así como ineficiencias en la logística de reparación (Wireman, 2012). Adicionalmente, se identifica la ausencia de una metodología sistemática para la priorización de las tareas de mantenimiento en función del riesgo asociado a cada subsistema (Moubray, 2004), lo que limita una asignación óptima de los recursos humanos y materiales disponibles (ISO 55000, 2014).

En el portafolio de activos de la empresa, la planta de trituración es el equipo que presenta el mayor nivel de desgaste. Cada detención no programada implica un sobre costo directo, ya que la falta de material disponible para la obra obliga a recurrir a proveedores externos para adquirir

base y subbase a precios significativamente más altos, afectando la rentabilidad del proyecto (Mobley, 2002). En este contexto, surge la necesidad de implementar una metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) adaptada a las condiciones reales de operación de la trituradora RM 80GO. Esta metodología permitiría identificar y clasificar los modos de falla más críticos del equipo, evaluar sus consecuencias técnicas y operativas, y establecer estrategias de intervención

proactiva que aseguren la disponibilidad, confiabilidad y seguridad del equipo en el entorno de trabajo del consorcio (Moubray, 2004) (Smith & Hawkins, 2004). La ausencia de un enfoque basado en el análisis sistemático de modos de falla puede limitar la eficiencia operativa y aumentar el riesgo técnico asociado a la operación (ISO 31000, 2018), esto es sin duda una debilidad técnica que puede dificultar la sostenibilidad del mantenimiento y la eficiencia global del proyecto constructivo. Por lo tanto, se plantea como problema central:

¿Cómo puede la estrategia de mantenimiento basada en confiabilidad (RCM), apoyada en el análisis de modos de falla, efectos y criticidad, mejorar la disponibilidad, confiabilidad y eficiencia operativa de la trituradora móvil RM Rubble Master RG 80GO del consorcio Constructor GM Santander? A los que se plantea como respuesta/hipótesis: el uso de la metodología RCM, integrando a su vez modos de falla y criticidad, entre otros aspectos de interés, permite mejorar significativamente los indicadores de mantenimiento de la trituradora RM 80GO —específicamente en términos de disponibilidad, reducción de paradas no planificadas y optimización de recursos técnicos— en las operaciones del consorcio Constructor GM Santander.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Diseñar una estrategia de mantenimiento basada en la metodología RCM, que incorpore el análisis de modos de falla, efectos y criticidad (FMECA), para la trituradora móvil RM Rubble Máster RG 80GO del consorcio Constructor GM Santander.

1.2 Objetivos específicos

Caracterizar técnica y operativamente los principales sistemas y componentes de la trituradora móvil RM 80GO, mediante la revisión de manuales del fabricante, datos operativos históricos y registros de mantenimiento, con el fin de establecer la base funcional para el análisis de modos de falla.

Identificar y clasificar los modos de falla potenciales de los componentes críticos del equipo, utilizando la metodología FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis), para priorizar aquellos eventos que representan mayor riesgo para la disponibilidad y la seguridad operacional.

Evaluar la criticidad de cada modo de falla considerando parámetros como frecuencia, severidad y detectabilidad, mediante matrices de riesgo y análisis cualitativo-cuantitativo, para definir los niveles de intervención requeridos en cada subsistema.

Establecer una estrategia de mantenimiento basada en confiabilidad (RCM) que establezca acciones preventivas, predictivas o correctivas según la criticidad de los componentes, para reducir las paradas no planificadas y optimizar la planificación de recursos técnicos en el entorno operativo del consorcio Constructor GM Santander.

2. Generalidades

El Consorcio Constructor GM Santander tiene adjudicado dentro de sus proyectos Construcción, mejoramiento y mantenimiento de infraestructura para conectar territorios gobiernos y poblaciones nacionales- Corredor Barichara-Zapatoca. Esta iniciativa busca dar solución a la dificultad de intercomunicación terrestre en las vías secundarias del departamento de Santander, una problemática que ha generado mayores tiempos de viaje, altos costos de mantenimiento vehicular, congestión en las vías y limitaciones en la movilidad entre cabeceras municipales de varias provincias. Las consecuencias más críticas de esta situación afectan directamente a la población, especialmente a personas con movilidad reducida, y se agravan por la polución generada por el polvo de las vías sin pavimentar, que ha derivado en un incremento de enfermedades respiratorias en niños, jóvenes y adultos mayores.

En temporada de lluvias la situación empeora, pues las pendientes y el material de las vías generan deslizamientos que limitan el transporte, afectando la comercialización de productos, el acceso a educación y salud, e incrementando la deserción escolar, la morbilidad y la pobreza. Actualmente, los tramos a intervenir presentan un ancho promedio de 5 metros, sin pavimentar y

con malas condiciones geométricas, lo que dificulta la movilidad vehicular y el tránsito seguro de personas con discapacidad.

2.1 Localización geográfica corredor Barichara-Zapatoca

Figura 1.

Departamento de Santander



Nota. Tomado de: DANE

Figura 2.

Trayecto proyectado tramo vial que comunica a Zapatoaca-Galán-Barichara



Nota. Tomado de: Google Earth

2.2 Ubicación trituradora Rubble Master 80GO!**Figura 3.**

Localización trituradora Rubble Master 80GO!



Nota. Tomado de: Google Maps

2.3 Contextualización operacional

Para llevar a cabo las actividades de construcción, mejoramiento y mantenimiento del corredor vial, es necesario ejecutar una serie de procesos que aseguren la correcta disposición y compactación de los materiales pétreos. El procedimiento inicia con la extracción de la piedra del río, realizada mediante retroexcavadoras u otra maquinaria de movimiento de tierra, que permiten retirar el material de forma eficiente y segura. Una vez extraída, la piedra se deposita en volquetas, las cuales se encargan de transportarla hasta la planta de trituración.

En la máquina trituradora, el material pasa por un proceso de reducción de tamaño, donde mediante impacto o compresión se obtiene la granulometría adecuada de acuerdo con los requerimientos de la obra. Posteriormente, la piedra triturada es clasificada en diferentes calibres mediante cribas, con el fin de disponer de un material homogéneo que garantice estabilidad y resistencia en la vía. Una vez clasificado, un cargador frontal traslada el material a los acopios, donde se almacena temporalmente según su tamaño y tipo. Desde allí, nuevamente las volquetas realizan el transporte del material hasta el frente de obra.

En el sitio de intervención, la motoniveladora cumple la función de distribuir y extender uniformemente el material sobre la superficie de la vía, generando un espesor adecuado y una correcta conformación de la capa de rodadura. Finalmente, el vibrocompactador se encarga de aplicar el grado de compactación requerido, siguiendo las especificaciones técnicas del proyecto, con el objetivo de garantizar la resistencia estructural de la vía y su durabilidad frente a las condiciones climáticas y el tránsito vehicular.

De esta manera, cada etapa (desde la extracción hasta la compactación) se integra en un ciclo productivo que busca asegurar la calidad de la obra y la sostenibilidad de la infraestructura vial en el tiempo.

2.4 Estado actual del mantenimiento

En la actualidad, la extracción de materiales pétreos desarrolla sus operaciones bajo un esquema de mantenimiento correctivo, es decir, se intervienen los equipos únicamente cuando estos presentan una falla que interrumpe la operación. Las jornadas de trabajo oscilan entre 6 y 8 horas diarias, durante 6 días a la semana, lo que supone un nivel de exigencia considerable para la maquinaria. Sin embargo, al no contar con estrategias preventivas o predictivas, cualquier avería inesperada se traduce en paradas no programadas que afectan directamente la continuidad de la producción, reducen la eficiencia operativa e incrementan los costos de operación.

El procedimiento de atención a una falla sigue una secuencia poco estructurada y reactiva. En primera instancia, el operador del equipo es quien detecta la anomalía durante el proceso de trituración, notificando de inmediato la detención al Jefe de Planta. Posteriormente, el jefe comunica la situación al Supervisor de Mantenimiento, quien se desplaza al área afectada para realizar una inspección preliminar con el objetivo de identificar el tipo de daño, el sistema involucrado y la magnitud de la afectación. Una vez localizado el problema, se procede a contactar a diferentes proveedores externos, quienes realizan un diagnóstico más detallado que permite definir con precisión los repuestos requeridos. A partir de este diagnóstico se emite una cotización del servicio, la cual debe ser validada por el área de compras, verificando en primera instancia si los repuestos pueden adquirirse en el mercado local. Cuando estos no se encuentran disponibles

en el país, se gestionan procesos de importación, lo que genera retrasos significativos en la atención de la falla y prolonga los tiempos de inactividad de los equipos.

Si el área de compras aprueba la solicitud y autoriza el gasto, se procede con el pago correspondiente al proveedor, quien a partir de ese momento inicia la gestión de los repuestos. Una vez se dispone de los componentes, se agenda la visita técnica de reparación, que en la mayoría de los casos se realiza directamente en el lugar de operación del equipo. No obstante, cuando la falla requiere trabajos de mayor complejidad como rectificación de superficies, fabricación de piezas o procesos de torneado, los componentes averiados deben ser desmontados y trasladados a un taller metalmecánico externo de confianza, lo cual aumenta el tiempo de indisponibilidad de la maquinaria y genera una mayor dependencia de servicios de terceros.

Un aspecto crítico es que la empresa no cuenta con un sistema formal de gestión del mantenimiento. Las decisiones respecto a procedimientos, reparaciones y repuestos se toman de manera consensuada y verbal entre el Jefe de Planta y el Supervisor de Mantenimiento, sin protocolos estandarizados ni registros documentales que permitan un seguimiento histórico de las intervenciones. Esta ausencia de trazabilidad impide la generación de indicadores de desempeño, dificulta la identificación de patrones de falla y limita la posibilidad de planificar mantenimientos programados. En consecuencia, las paradas de los equipos resultan totalmente imprevistas, los tiempos de reparación son inciertos y los costos adicionales impactan directamente en la rentabilidad del proceso productivo.

En cuanto a las labores rutinarias, como la lubricación y los ajustes mecánicos básicos, tampoco existe un cronograma formal. Estas tareas se realizan de forma esporádica, aproximadamente dos veces por semana o en los momentos en que el operario percibe la necesidad de intervenir el equipo. Este enfoque empírico, basado en la experiencia del personal y no en

parámetros técnicos o recomendaciones del fabricante, provoca que la maquinaria opere bajo un esquema reactivo, con alta probabilidad de reincidencia en fallas, prolongados tiempos de inactividad y sobrecostos derivados de intervenciones correctivas que pudieron haberse evitado con un adecuado plan de mantenimiento preventivo.

2.5 Descripción equipo

El equipo al que será objeto de estudio fue seleccionado debido a la baja disponibilidad del mismo y a los altos costos mantenimientos correctivos que se presenta mediante su operación.

La trituradora Rubble Master RM 80 GO es una trituradora de impacto móvil altamente productiva y compacta, diseñada para triturar una amplia variedad de materiales en el mismo sitio de trabajo. Su diseño robusto y el principio RM GO facilitan una operación segura, sencilla y eficiente, ideal para aplicaciones como construcción, demolición y reciclaje de escombros.

Figura 4.

Trituradora Rubble Master RM 80 GO



El proceso de trituración de materiales pétreos con la Rubble Master RM 80 GO está conformado por un conjunto de sistemas mecánicos, hidráulicos y eléctricos que operan de manera integrada para obtener diferentes productos terminados, tales como base triturada, subbase triturada y piedra filtro, garantizando un flujo de producción eficiente y continuo.

Esta trituradora móvil, de origen austriaco, está equipada con un motor diésel de 164 kW (220 HP) y tiene una capacidad de procesamiento de hasta 160 toneladas por hora, dependiendo de la naturaleza del material y de la configuración del sistema de trituración. Su diseño compacto, robusto y versátil permite operar en distintos entornos de obra con un consumo optimizado de combustible y un alto rendimiento operativo.

El ciclo de producción inicia con la alimentación del material en la tolva de carga, donde un cargador frontal de llantas deposita la materia prima. Desde la tolva, el material es conducido hacia la cámara de trituración de impacto, en la cual un rotor equipado con martillos y blindajes ejerce fuerzas dinámicas que fragmentan las rocas sobredimensionadas hasta alcanzar la granulometría deseada. Posteriormente, el material reducido es transportado mediante un sistema de bandas transportadoras, impulsadas por accionamientos hidráulicos y eléctricos, hasta la criba vibratoria (unidad MS/OS opcional). Esta criba se encarga de la clasificación granulométrica a través de mallas calibradas que permiten separar los productos en tamaños comerciales habituales: 2 ½ pulgada (base), 1 ½ pulgada (subbase) y ¾ pulgada (piedra filtro).

Finalmente, el material clasificado es evacuado por medio de las bandas de descarga, pasando a los acopios designados o directamente a los vehículos de transporte. Este flujo productivo permite optimizar tiempos, reducir costos de manipulación y garantizar la calidad de los agregados requeridos en proyectos de construcción y mejoramiento vial.

3. Marco Teórico

La presente investigación se desarrolla con un enfoque aplicado, cuyo propósito es optimizar la gestión de mantenimiento de la trituradora móvil Rubble Master RM 80 GO a través de la implementación de la metodología RCM (Reliability-Centered Maintenance). El punto de partida consiste en la identificación y caracterización de los diferentes sistemas que integran el equipo, seguido por un análisis de criticidad que permite establecer cuáles de ellos representan mayor relevancia para la operación.

Figura 5.

Trituradora Rubbe Mastrer 80GO



A partir de esta jerarquización, se plantea una secuencia metodológica que incluye el análisis funcional de cada sistema, la detección de fallas funcionales y modos de falla, la evaluación de efectos y consecuencias, y la aplicación de criterios de criticidad. Como resultado,

se diseñan estrategias de mantenimiento basadas en riesgo, enfocadas en mejorar la confiabilidad, disminuir paradas no planificadas y prolongar la vida útil operativa de la trituradora.

3.1 Metodología RCM

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) es una metodología orientada a definir las necesidades de mantenimiento de un activo físico en su entorno de operación específico. De acuerdo con la norma UNE-EN 13306:2011, el mantenimiento se entiende como el conjunto de actividades técnicas, administrativas y de gestión que, a lo largo del ciclo de vida de un elemento, buscan conservarlo o restaurarlo para que cumpla con la función prevista. Dicha función, denominada *función requerida*, corresponde a las acciones o combinaciones de acciones que el activo debe realizar para garantizar un servicio esperado, lo que varía según el contexto de operación (Bravo Fernandez, 2015, pág. 27).

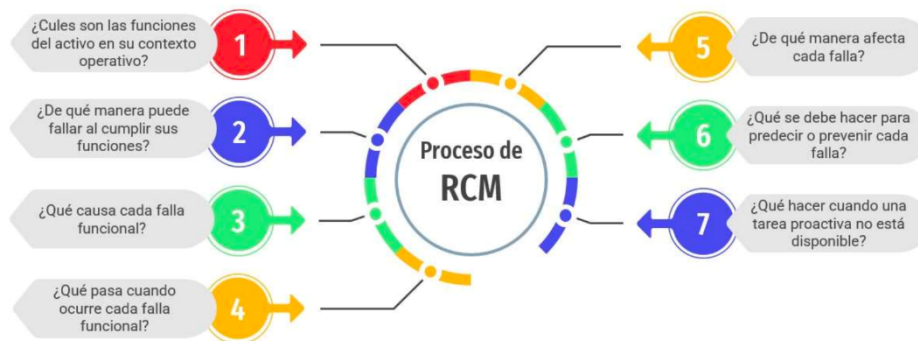
El proceso de RCM se estructura en torno a siete preguntas fundamentales (Moubray, 2004, pág. 12):

1. ¿Cuáles son las funciones y parámetros de desempeño del activo en su contexto operacional? (funciones)
2. ¿De qué manera deja de cumplir dichas funciones? (fallas funcionales)
3. ¿Qué causa cada falla funcional? (modos de falla)
4. ¿Qué ocurre cuando se presenta cada falla? (efectos de falla)
5. ¿Por qué es relevante dicha falla? (consecuencias de falla)
6. ¿Qué acciones pueden adoptarse para prevenir o predecir la ocurrencia? (tareas proactivas)

7. ¿Qué medidas deben tomarse si no se encuentra una tarea proactiva efectiva? (tarea de búsqueda de fallas, rediseño o RTF)

Figura 6.

Proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad



Nota. Tomado de: Modelo gerencial de mantenimiento basado en RCM, empleando criterio de riesgo, modos de falla, efectos y criticidad para el Centro Comercial Mayales Plaza

Cada una de estas etapas se desarrolla de forma sistemática:

Funciones y los parámetros de funcionamiento. Se definen las funciones que el activo debe cumplir y los límites de desempeño esperados. Estas funciones pueden clasificarse en:

Funciones primarias. Justifican la adquisición del activo e incluyen aspectos como capacidad, producción, velocidad, calidad y servicio.

Funciones secundarias. Relacionadas con seguridad, eficiencia, confort, cumplimiento normativo, impacto ambiental, integridad estructural, economía de operación y apariencia.

Fallas Funcionales. Se consideran fallas funcionales todos los estados en que el activo no logra cumplir una función dentro de los parámetros establecidos, incluyendo fallas parciales donde el desempeño es insuficiente o inaceptable.

Modos de Falla. Se identifican todos los eventos que pueden provocar una falla funcional, abarcando desgaste natural, errores humanos, defectos de diseño o mantenimiento inadecuado. Es esencial describir la causa con suficiente detalle para evitar enfocarse únicamente en síntomas en lugar de en la raíz del problema.

Efecto de Falla. Se documenta qué ocurre cuando la falla se presenta, incluyendo la evidencia disponible, riesgos de seguridad o ambientales, impacto en la producción, daños físicos y acciones requeridas para restablecer el servicio.

Consecuencia de la Falla. RCM prioriza el análisis de consecuencias sobre el evento técnico en sí. Estas se clasifican en cuatro categorías:

Fallas ocultas: No tienen impacto directo, pero pueden provocar fallas múltiples y graves si no se detectan.

Consecuencias de seguridad y medio ambiente: Pueden poner en riesgo la integridad de personas o generar incumplimientos regulatorios.

Consecuencias operativas: Afectan producción, calidad, servicio o costos.

Consecuencias no operativas: Se limitan al costo de la reparación sin impacto adicional. Son estas consecuencias las que fuertemente influyen el intento de prevenir cada falla. En otras palabras, si una falla tiene serias consecuencias, se hará un gran esfuerzo para intentar evitarla. Por otro lado, si tiene consecuencias leves o no las tiene, quizás se decida no hacer más mantenimiento de rutina que una simple limpieza y lubricación básicas.

3.2 Análisis de modos y efectos de fallas críticas (FMECA)

El FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) es una metodología sistemática establecida en la norma SAE J1739 que permite clasificar los efectos de las fallas y calcular el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) (Campos-López & et al., 2019).

Según Goble (2010, p. 87), citado por Ortiz Useche et al. (2013, p. 91), esta técnica identifica posibles problemas mediante el análisis de modos de falla y sus efectos, abordando los componentes de forma jerárquica.

Para cada elemento se enlistan los modos de falla conocidos, se describen sus efectos, se evalúa la severidad y se proponen medidas para evitar o mitigar los impactos. Complementariamente, el Índice Compuesto de Riesgo (ICR) pondera la severidad (promedio de consecuencias en seguridad, medio ambiente y costos) y la frecuencia de ocurrencia, priorizando los sistemas que, además de ser severos, presentan ocurrencia frecuente.

Los parámetros del ICR son:

Consecuencia en seguridad (CS): nivel de riesgo para la integridad física de los operadores.

Consecuencia ambiental (CA): grado de afectación al medio ambiente (derrames, emisiones, ruido).

Costo estimado de impacto (CI): suma de gastos de reparación, repuestos y pérdidas de producción.

3.3 Indicadores de gestión en mantenimiento

Los indicadores de gestión constituyen métricas derivadas del registro y análisis de actividades a lo largo del ciclo de vida del activo. Estos permiten medir desempeño, identificar desviaciones y definir acciones de mejora continua.

Según la norma ISO 14224 (International Organization For Standardization, 2016), los conceptos clave para evaluar el mantenimiento son:

3.3.1 Confiabilidad

Probabilidad de que un activo o componente realice su función requerida en condiciones establecidas durante un periodo de tiempo definido.

3.3.2 Disponibilidad

Probabilidad de que el activo se encuentre en condiciones de cumplir su función en un momento o intervalo específico, considerando que dispone de los recursos necesarios.

3.3.3 Mantenibilidad

Probabilidad de restaurar un componente a condiciones operativas dentro de un tiempo establecido, usando personal calificado, procedimientos y recursos adecuados.

Un indicador relevante en este estudio es la **Disponibilidad**, calculada como: $D = \frac{MTBF}{(MTBF + TTR)}$,

donde:

MTBF (Mean Time Between Failures): tiempo promedio entre fallas, obtenido dividiendo el tiempo total de operación entre el número de fallas.

MTTR (Mean Time To Repair): tiempo promedio de reparación, calculado dividiendo el tiempo total de intervención entre el número de reparaciones realizadas.

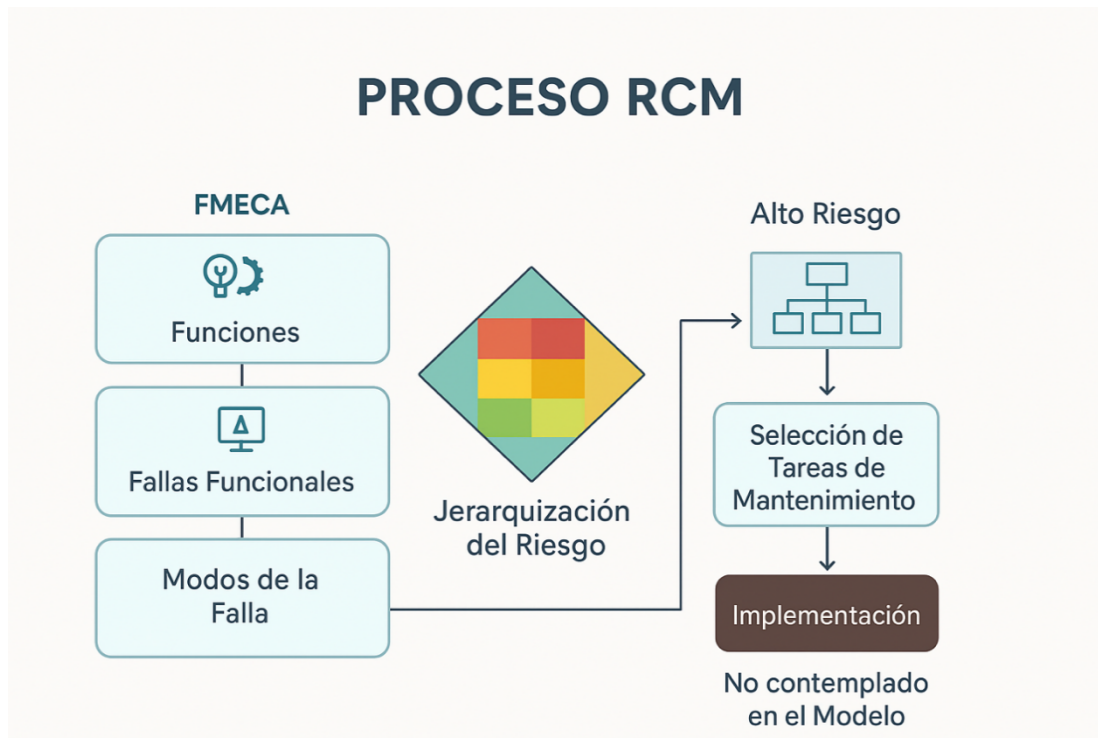
4. Descripción de la Metodología

En este capítulo se expone el procedimiento metodológico utilizado para el análisis de criticidad de los sistemas de la trituradora móvil Rubble Master RM 80 GO. El propósito de este análisis es identificar, dentro de los sistemas funcionales del equipo, cuáles representan mayor nivel de riesgo considerando tres factores clave: impacto ambiental, costos de mantenimiento y frecuencia de fallas.

Posteriormente, se abordan las etapas propias de la metodología RCM, que incluyen el análisis de modos de falla, efectos y criticidad, para finalmente establecer una priorización de riesgos. Este ordenamiento de criticidad es la base para proponer estrategias de mantenimiento enfocadas en garantizar la confiabilidad y la reducción de paradas no planificadas.

Figura 7.

Proceso de gestión del mantenimiento propuesto



Es importante destacar que, aunque la metodología considera inicialmente todos los sistemas del equipo, la aplicación práctica en este trabajo se concentra únicamente en aquellos sistemas que, tras el proceso de jerarquización, fueron clasificados como críticos. El objetivo es dejar un modelo claro y replicable, que el área de mantenimiento pueda aplicar posteriormente al resto de los activos de la planta.

4.1 Recopilación y manejo de la información

Para responder adecuadamente a las preguntas planteadas por la norma RCM y garantizar la correcta implementación de la metodología, es indispensable contar con información completa

y confiable sobre el equipo. Por esta razón, antes de iniciar el análisis formal, se incluyó una fase de recopilación y validación de datos.

Esta información comprende planos mecánicos, manuales de operación, especificaciones técnicas y cualquier documento que defina el contexto de operación del equipo. Asimismo, se consideraron entrevistas con el personal de mantenimiento, con el fin de documentar los problemas recurrentes, el desempeño real de los sistemas y las expectativas de operación.

4.1.1 Documentación existente

El Consorcio Constructor GM Santander dispone actualmente del manual de operación y de las especificaciones técnicas, documentos que fueron utilizados como referencia para la caracterización inicial de los sistemas funcionales de la trituradora.

4.1.2 Jerarquización de sistemas y equipos

Previo al análisis de criticidad, fue necesario definir el nivel de detalle con el que se abordaría el estudio, así como los límites de cada sistema. En esta investigación, el activo fue desglosado en los siguientes sistemas:

- S01A – Sistema de Alimentación
- S02T – Sistema de Trituración
- S03C – Sistema de Cribado
- S04H – Sistema Hidráulico
- S05P – Sistema Potencia

- S06E – Sistema Eléctrico
- S07CA – Sistema de Control y Automatización
- S08R – Sistema de Rodaje
- S09CH – Sistema Chasis

Esta división permite analizar cada sistema de manera individual, facilitando la identificación de riesgos específicos.

4.2 Jerarquización del riesgo

La gestión del riesgo en equipos de trituración es esencial para asegurar la continuidad operativa, reducir costos de mantenimiento y proteger la seguridad de los trabajadores. A través del análisis de criticidad es posible detectar y priorizar los sistemas cuyo fallo puede ocasionar los impactos más severos en términos de seguridad, producción y economía.

En este estudio se realizó el análisis de criticidad de la trituradora Rubble Master RM 80 GO, un equipo de uso frecuente en el procesamiento de escombros, agregados y materiales reciclados. El análisis se desarrolló con un enfoque académico, apoyado en normativa técnica y literatura especializada, con el objetivo de construir un modelo de priorización robusto y fácilmente aplicable en entornos operativos reales.

4.2.1 Alcance de la matriz de criticidad

El análisis tuvo como meta evaluar el nivel de criticidad de cada sistema mediante un enfoque cuantitativo basado en el Número de Prioridad de Riesgo (RPN). Con ello, se busca priorizar las intervenciones de mantenimiento preventivo y correctivo, reduciendo la probabilidad de fallas graves y maximizando la disponibilidad operativa.

Para el cálculo de la criticidad se integraron los siguientes criterios: frecuencia de falla, impacto en la seguridad de los operadores, afectación ambiental y costos asociados a las paradas no planificadas.

4.2.2 Criterios de evaluación

Para cada sistema se evaluaron los siguientes parámetros, en escala de 1 a 5:

Frecuencia de fallas (F): mide la probabilidad de ocurrencia:

1 = Muy baja probabilidad (≤ 1 vez/año)

2 = Baja probabilidad (1 vez/año)

= Media probabilidad (2–3 vez/año)

4= Alta probabilidad (4–5 vez/año)

5 = Muy frecuente (≥ 5 vez/año).

Consecuencia en seguridad (CS): grado de riesgo para el personal:

1 = Sin riesgo para la seguridad.

2 = Riesgo menor, lesiones leves tratables en sitio.

3 = Riesgo moderado, lesiones que requieren atención médica.

4 = Riesgo alto, potencial de lesiones graves o permanentes.

5 = Riesgo crítico, posibilidad de fatalidades.

Consecuencia ambiental (CA): impacto sobre el medio ambiente:

1 = Sin impacto ambiental.

2 = Impacto menor, reversible y localizado.

3 = Impacto moderado, requiere acción correctiva menor.

4 = Impacto alto, requiere acción correctiva mayor o notificación a autoridades.

5 = Impacto muy alto, daños graves al medio ambiente o sanciones legales.

Costo estimado de impacto (CI): incluye gastos de reparación y pérdidas de producción:

1 = Menos de \$2.000.000 COP.

2 = Entre \$2.000.001 y \$8.000.000 COP.

3 = Entre \$8.000.001 y \$20.000.000 COP.

4 = Entre \$20.000.001 y \$40.000.000 COP.

5 = Más de \$40.000.000 COP.

Cálculo del índice compuesto de riesgo (ICR): El Índice Compuesto de Riesgo (ICR) se calculó promediando CS, CA y CI, multiplicando luego por F. La interpretación de resultados fue la siguiente:

$$ICR = F \times \left(\frac{CS + CA + CI}{3} \right)$$

$ICR \geq 16 \rightarrow$ Crítico (acción inmediata).

$12 \leq ICR < 16 \rightarrow$ Alto (plan de acción a corto plazo).

$\leq ICR < 12 \rightarrow$ Medio (controles y medidas preventivas periódicas).

$ICR < 8 \rightarrow$ Bajo (monitoreo).

4.2.3 Resultados del proceso de AC

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la figura 8 después de haber realizado los pasos alcanzando como resultado la jerarquización de los sistemas de acuerdo con el riesgo que presenta para el equipo.

Figura 8.

Resultados análisis de criticidad

Código	Sistema	F	CS	CA	CI	ICR	Nivel
S01A	Sistema de Alimentación	3	4	2	3	9.0	Medio
S02T	Sistema de Trituración	4	5	2	5	16.0	Critico
S03C	Sistema de Cribado	3	3	2	3	8.0	Medio
S04H	Sistema Hidráulico	3	4	4	4	8	Medio
S05P	Sistema Potencia (motor)	3	4	2	4	10.0	Medio
S06E	Sistema Eléctrico	3	4	2	3	9.0	Medio
S07CA	Sistema Control y Automatización	3	5	2	4	11.0	Alto
S08R	Sistema de Rodaje	2	3	2	3	5.33	Bajo
S09CH	Sistema Chasis	2	4	2	3	6.0	Bajo

Los resultados obtenidos permitieron jerarquizar los sistemas según su nivel de riesgo. La mayor parte de ellos (55,56%) fueron clasificados como de criticidad media, mientras que un 22,22% se ubicó en criticidad baja. Los sistemas con criticidad alta y crítica representaron el 11,11% cada uno, lo que facilita la identificación de las áreas que requieren atención prioritaria en la planificación de mantenimiento.

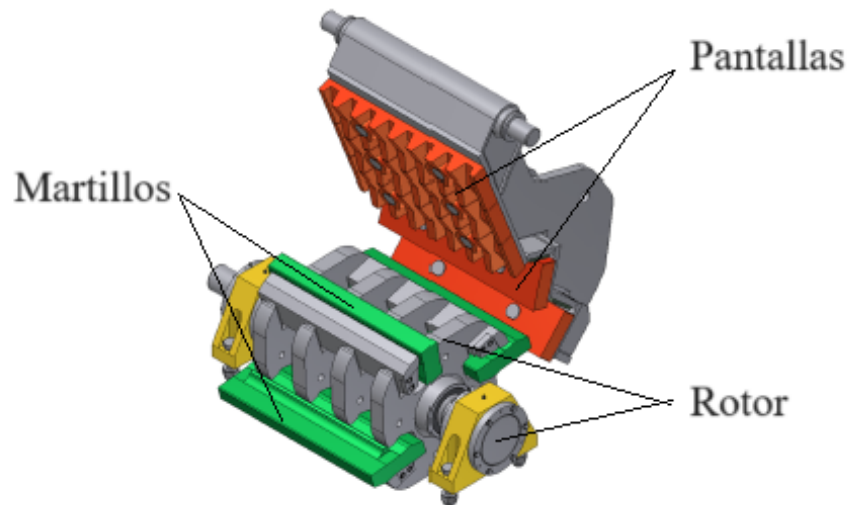
5. Desarrollo de la metodología RCM

En el presente capítulo se establecen los conceptos fundamentales para la aplicación adecuada de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) al equipo seleccionado para este estudio: la trituradora Rubble Master RM 80 GO. El procedimiento de RCM inicia con la definición detallada del sistema, sus fronteras físicas y operativas, así como su clasificación taxonómica. Una vez delimitado el alcance, se identifican las funciones principales y complementarias del equipo, seguidas por el análisis de las fallas funcionales que pueden impedir el cumplimiento de dichas funciones. A partir de esta información se elabora un Análisis de Modos, Efectos y Criticidad de Falla (FMECA), herramienta que permite priorizar las acciones de mantenimiento con base en el nivel de riesgo que cada modo de falla representa para la operación continua, la seguridad de los trabajadores y la protección ambiental.

En el caso particular de la Rubble Master RM 80 GO, los resultados del estudio de criticidad mostraron que el sistema de trituración (cámara de trituración) es el de mayor relevancia para el proceso productivo, debido a su influencia directa en la continuidad operacional, en la integridad mecánica del equipo y en la seguridad industrial. Por ello, este sistema se establece como el eje central del análisis RCM, de modo que las estrategias de mantenimiento derivadas se fundamenten en criterios técnicos robustos y sigan las mejores prácticas en gestión de activos industriales.

Figura 9.

Componentes cámara de trituración



Nota. Tomado de: Manual RM 80GO Operating instructions V.2.

5.1 Tratamiento y recopilación de la información

En esta sección se realiza la caracterización integral de la cámara de trituración, comenzando por la definición de sus límites físicos y funcionales y de las interfaces con otros sistemas de la máquina. A partir de ello se identifican las funciones primarias y secundarias en el contexto real de operación, lo que constituye la base para el análisis de fallas funcionales y la formulación de planes de mantenimiento orientados a maximizar la confiabilidad del sistema.

5.1.1 Definición de fronteras e interfases

En la figura 10 se esquematizan las fronteras e interfaces que limitan el elemento de estudio.

Límite del sistema:

Martillos

Rotor

Cilindro Hidráulico

Pantallas

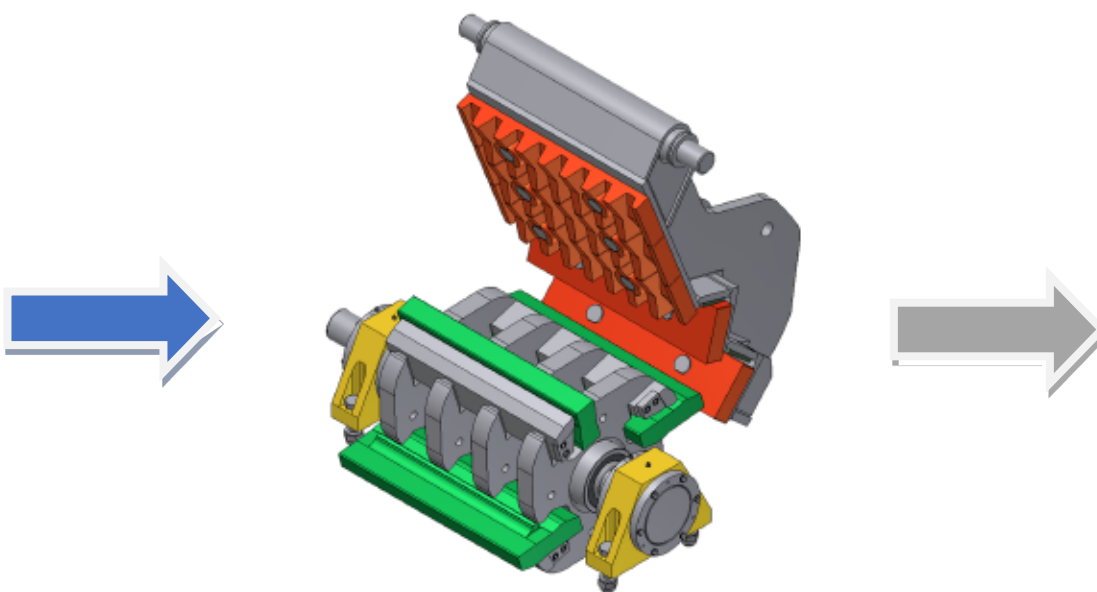
Interfases:

Entrada material petreo

Salida de material triturado

Figura 10.

Limites e interfases del elemento de estudio



5.1.2 Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas corresponden a los parámetros nominales de operación del sistema, recopilados de la placa de características y documentación del fabricante. Las figuras 11, 12, 13 y 14 presentan en detalle los datos técnicos de la trituradora Rubble Master RM 80 GO, que servirán como referencia en el análisis de desempeño y en la detección de desviaciones operativas.

Figura 11.

Dimensiones principales de la máquina

Longitud máxima:	10.280 mm
Ancho máximo:	2.300 mm
Altura de descarga:	2.730 mm
Altura de alimentación:	2.670 mm
anchura máxima (con cinta de descarga lateral):	3.550 mm

Nota. Tomado de: Manual RM 80GO! Operating instructions V.2.

Figura 12.


Canal vibratorio

Capacity:	2.6 m ³
Feed height:	2,880 mm
Effective cross-section of feed intake:	2,980 mm x 1,990 mm
Weight:	3,210 kg
Wear plates on ground:	Hardox 400
Prescreening:	Welded mesh conical screen
Screen widths:	Standard 30/50
Screen surface:	1,050 mm x 800 mm
Options:	Subfloor – can be bolted onto existing welded mesh
Vibrator motor	3.1 kW / 400 V / 50 Hz

Nota. Tomado de: Manual RM 80GO! Operating instructions V.2.

Figura 13.*Motor Diesel*

Speed:	1,800 rpm
Power rating:	164 kW
Tank capacity:	280 l
Engine oil quantity:	approx. 33 l motor oil (type: 10W-40, see utility specifications in the John Deere instruction manual)
Engine coolant quantity:	approx. 25 l coolant

	Factory filling: Fuchs Fricofin permanent coolant, monoethylen glycol based to a temperature of - 38 °C.
---	--

Nota. Tomado de: Manual RM 80GO! Operating instructions V.2.

Figura 14.*Trituradora de impacto***Crusher unit**

Manufacturer:	RUBBLE MASTER HMH GmbH
Inlet opening:	860 x 650 mm
No. of hammers:	2 / 4
Power rating:	160 t/h
Feed material size:	max. 650 mm
Final grain:	cubic shape, up to 70 mm
Crushing gap (hydraulically adjustable):	3 - 8 cm
Impact arm adjustment (upper pivot point, hydraulically adjustable):	105 mm

- Part of the crusher housing is integrated into the framework
- Compact hydraulic crushing gap adjustment
- Crusher housing opens hydraulically
- Hammers changed by hand or using hammer changing device
- Integrated release system

Nota. Tomado de: Manual RM 80GO! Operating instructions V.2.

5.2 Proceso mantenimiento centrado en confiabilidad

A continuación, se describe el proceso de implementación de la metodología RCM, siguiendo las etapas conceptuales explicadas en el capítulo anterior y aplicándolas específicamente al sistema de trituración.

5.2.1 Funciones del sistema

Transformar material pétreo de gran tamaño en fragmentos menores mediante impacto y manteniendo un flujo continuo de producción de material triturado.

5.2.2 Fallas funcionales

Se identifican las fallas funcionales con mayor probabilidad de impedir que el sistema cumpla su propósito. En la figura 15 se presentan las funciones del sistema y las condiciones de falla funcional asociadas.

Figura 15.*Fallas funcionales del sistema en estudio*

SISTEMAS	FUNCION	F	FALLO FUNCIONAL
CAMARA DE TRITURACION	Transformar material pétreo de gran tamaño en fragmentos menores mediante impacto y manteniendo un flujo continuo de producción de material triturado	1A	No transforma el material pétreo
		1B	No mantiene un flujo continuo de producción de material triturado según lo requerido.

5.2.3 Modos de falla

En la figura 16 se relacionan los modos de falla identificados para cada falla funcional de la cámara de trituración

Figura 16.

Modos de falla cámara de trituración

SISTEMAS	FUNCION	F	FALLO FUNCIONAL	FF	MODOS DE FALLA
CAMARA DE TRITURACION	Transformar material pétreo de gran tamaño en fragmentos menores mediante impacto y manteniendo un flujo continuo de producción de material triturado.	1A	No transforma el material pétreo	1A1	Ausencia material para triturar
				1A2	Material Atascado
				1A3	
				1A4	Rotor no gira
				1A5	Rotor gira a velocidad baja
				1A6	Material por fuera de especificaciones
				1A7	No acopla el embrague
				1A8	Bloqueos de seguridad activos
		1B	No mantiene un flujo continuo de producción de material triturado según lo requerido.	1B1	Ausencia o poco material para triturar
				1B2	Martillos excesivamente desgastados
				1B3	Martillos estan partido
				1B4	Pantallas excesivamente desgastados
				1B5	Pantallas partidas
				1B6	Distancia entre martillos y blindajes muy cerrados
				1B7	Rotor gira a velocidad baja
				1B8	Paradas frecuentes por protecciones
				1B9	Cilindros hidráulico sin presión para ajustar pantallas
				1B10	Velocidad baja de la banda de descarga

5.2.4 Falla oculta

En la siguiente figura 17 con apoyo del operador se identifica si los modos de fallas son detectables o no.

Figura 17.

Falla Oculta

SISTEMAS	FUNCION	F	FALLO FUNCIONAL	FF	MODOS DE FALLA	FALLA OCULTA
CAMARA DE TRITURACION	Transformar material pétreo de gran tamaño en fragmentos menores mediante impacto y manteniendo un flujo continuo de producción de material triturado	1A	No transforma el material pétreo	1A1	Ausencia o falta de material para triturar	NO
				1A2	Material Atascado	NO
				1A3	Rotor no gira	NO
				1A4	Rotor gira a velocidad baja	NO
				1A5	Material por fuera de especificaciones	NO
				1A6	No acopla el embrague	NO
				1A7	Bloqueos de seguridad activos	NO
		1B	No mantiene un flujo continuo de producción de material triturado según lo requerido.	1B1	Ausencia o poco material para triturar	NO
				1B2	Martillos excesivamente desgastados	SI
				1B3	Martillos estan partido	NO
				1B4	Pantallas excesivamente desgastados	SI
				1B5	Pantallas partidas	NO
				1B6	Distancia entre martillos y blindajes muy cerrados	NO
				1B7	Rotor gira a velocidad baja	NO
				1B8	Paradas frecuentes por protecciones	SI
1B9	Cilindros hidráulico sin presión para ajustar pantallas	SI				
1B10	Velocidad baja de la banda de descarga	NO				

5.2.5 Efectos de falla y jerarquización del riesgo

Se realiza la jerarquización de riesgos de los modos de falla, combinando su frecuencia de ocurrencia con la gravedad de las consecuencias en la operación, la seguridad y el medio ambiente. Este análisis permite identificar las áreas prioritarias para la implementación de acciones de

mantenimiento preventivo y predictivo, optimizando el uso de recursos humanos y financieros. (Aguilar-Otero & et al., 2010).

Los criterios de ponderación de frecuencia e impacto se mantienen de acuerdo con lo establecido en el numeral 4.4.2. Los resultados del análisis para la cámara de trituración se presentan en las figuras 18 y 19, sirviendo como base para la toma de decisiones en el plan maestro de mantenimiento.

Figura 18.

Efectos de falla y jerarquización del riesgo falla funcional 1A

FF	MODOS DE FALLA	FALLA OCULTA	EVIDENCIA	CONSEC. SOBRE MA Y	Frecuencia	Nivel del riesgo	Ambiental	Seguridad	Economico	ICR
1A1	Ausencia o falta de material para triturar	NO	El operador observa que el rotor gira libre y que no sale material triturado por la banda de descarga.	No hay consecuencias en las personas, ni en el medio ambiente	1	BAJO	2	2	2	2
1A2	Material Atascado	NO	El operador observa que el material se quedó trabado, no está triturando nada.	Puede haber consecuencias en las personas por golpes o atrapamiento de extremidades, incremento en las emisiones de gases hacia el medio ambiente	4	ALTO	3	3	3	12
1A3	Rotor no gira	NO	El operador observa represamiento o de material en la entrada de la cámara y no se ve material saliendo por la banda de descarga.	Riesgo de atrapamiento o golpes durante la remoción de material, No hay consecuencias en el medio ambiente	3	MEDIO	4	3	4	11
1A4	Rotor gira a velocidad baja	NO	El operador observa una disminución notoria en las revoluciones del rotor, no sube las revoluciones y deja de triturar.	No hay consecuencias en las personas, ni en el medio ambiente	3	MEDIO	3	3	3	9
1A5	Material por fuera de especificaciones	NO	Operador evidencia material de gran tamaño que obstaculiza el ingreso de material para triturar.	Riesgo de atrapamiento o golpes durante la remoción de material, No hay consecuencias en el medio ambiente	3	BAJO	2	3	2	7
1A6	No acopla el embrague	NO	Al momento de arrancar el equipo, el motor gira pero el rotor de la cámara de trituración no inicia movimiento.	No hay consecuencias en las personas, ni en el medio ambiente	3	MEDIO	3	2	3	8
1A7	Bloqueos de seguridad activos	NO	El operador observa que la cámara de trituración no arranca, se queda bloqueada por una alarma de seguridad.	No hay consecuencias en las personas, ni en el medio ambiente	2	BAJO	2	1	2	3,3

Figura 19.

Efectos de falla y jerarquización del riesgo

FF	MODOS DE FALLA	FALLA OCULTA	EVIDENCIA	CONSEC. SOBRE MA Y	Frecuencia	Nivel del riesgo	Ambiental	Seguridad	Economico	ICR
1B1	Ausencia o poco material para triturar	NO	El operador observa que el rotor gira libre y que el material triturado sale de manera intermitente o en pequeñas cantidades por la banda de descarga.	No hay consecuencias en las personas, ni en el medio ambiente	3	BAJO	2	2	2	6
1B2	Martillos excesivamente desgastados	SI	El operador observa que el material que bota la cámara sale de similar tamaño lo que hace que retorne nuevamente a la cámara para volver a repasar nuevamente.	No hay consecuencias en las personas, ni en el medio ambiente	4	ALTO	3	3	4	13,3
1B3	Martillos estan partido	NO	El operador observa la máquina tiene golpeteo como si hubiera algo suelto dentro y el material no sale parejo, a ratos salen de menor tamaño y luego bota piedras similar o de igual tamaño al que ingresa a la cámara.	Riesgo golpes durante la remoción de martillos, No hay consecuencias en el medio ambiente	3	ALTO	5	3	5	13
1B4	Pantallas excesivamente desgastados	SI	El operador escucha un golpeteo raro, como si las piedras pegaran directo en el metal.	Riesgo de atrapamiento o golpes durante la remoción de martillos, No hay consecuencias en el medio ambiente	4	ALTO	3	3	3	12
1B5	Pantallas partidas	NO	El operador escucha un golpeteo de metal con metal, como si hubiera suelto algo por dentro y observa que la piedra esta saliendo grande.	Riesgo de atrapamiento o golpes durante la remoción de martillos, No hay consecuencias en el medio ambiente	2	BAJO	4	3	4	7,3
1B6	Distancia entre martillos y blindajes muy cerrados	NO	El operador observa acumulación de material dentro de la cámara.	No hay consecuencias en las personas, ni en el medio ambiente	3	MEDIO	3	2	3	8
1B7	Rotor gira a velocidad baja	NO	El operador observa una disminución notoria en las revoluciones del rotor, no sube las revoluciones y deja de triturar.	Riesgo de atrapamiento o golpes durante la remoción de material, No hay consecuencias en el medio ambiente	3	MEDIO	3	3	3	9
1B8	Paradas frecuentes por protecciones	SI	El operador observa en la pantalla del tablero de control codigos de fallas que detienen (paran) y no dejan trabajar seguido e interrumpen el flujo continuo de material triturado.	No hay consecuencias en las personas, ni en el medio ambiente	4	MEDIO	3	2	3	10,7
1B9	Cilindros hidráulico sin presión para ajustar pantallas	SI	El operador observa que el material que bota la cámara sale de similar tamaño lo que hace que retorne nuevamente a la cámara para volver a repasar nuevamente.	No hay consecuencias en las personas, presenta un impacto ambiental por la presencia de posible fuga de residuos peligrosos (aceites).	3	MEDIO	3	3	3	9
1B10	Velocidad baja de la banda de descarga	NO	El operador observa que se está acumulando piedra en la cámara porque la banda de descarga está muy lenta y no saca el material triturado a tiempo.	No hay consecuencias en las personas, ni en el medio ambiente	4	MEDIO	3	2	2	9,3

5.2.6 Selección de tareas de mantenimiento

En las figuras 20, 21 y 22 se presentan los resultados de aplicar el diagrama de decisión y selección de tareas de mantenimiento.

Figura 20.

Selección de tareas de mantenimiento nivel de riesgo alto

FF	MODOS DE FALLA	EVIDENCIA	CONSEC. SOBRE MA Y SEG.	Nivel del riesgo	ICR	Descripción Tarea	Encargado	Frecuencia
182	Martillos excesivamente desgastados	El operador observa que el material que bota la cámara sale de similar tamaño lo que hace que retorne nuevamente a la cámara para volver a repasar nuevamente.	No hay consecuencias en las personas, ni en el medio ambiente	ALTO	13,3	Realizar una inspección básica (visual) del estado de los martillos. Tomar registro de las horas trabajadas en el día. Realizar toma de medidas de los martillos. Realizar revisión ajuste de los componentes de fijación (tornillos) de martillos. Lubricar los rodamientos del rotor. Rotar los martillos (Según condición). Cambiar los martillos (Según condición). Inspeccionar alineación de rotor. Inspeccionar total de la cámara de trituración	Operador Operador Operador Técnico Técnico Técnico Técnico Técnico	Diario Diario Semanal Semanal Mensual o cada 250h Cada 500h Cada 500h Cada 500h
183	Martillos están partido	El operador observa la máquina tiene golpeteo como si hubiera algo suelto dentro y el material no sale pareja, a ratos salen de menor tamaño y luego bota piedras similar o de igual tamaño al que ingresa a la cámara.	Riesgo golpes durante la remoción de martillos. No hay consecuencias en el medio ambiente	ALTO	13,0	Realizar una inspección básica (visual) del estado de los martillos. Escucha de ruidos anormales Tomar registro de las horas trabajadas en el día. Realizar toma de medidas de los martillos. Realizar revisión ajuste de los componentes de fijación (tornillos) de martillos. Lubricar los rodamientos del rotor. Rotar los martillos según desgaste. Cambiar los martillos según desgaste. Inspeccionar alineación de rotor. Inspeccionar total de la cámara de trituración	Operador Operador Operador Operador Técnico Técnico Técnico Técnico Técnico	Diario Diario Diario Semanal Semanal Mensual o cada 250h Cada 500h Cada 500h Cada 500h
184	Pantallas excesivamente desgastados	El operador escucha un golpeteo raro, como si las piedras pegaran directo en el metal.	Riesgo de atrapamiento o golpes durante la remoción de martillos. No hay consecuencias en el medio ambiente	ALTO	12	Realizar una inspección básica (visual) del estado de las pantallas. Tomar registro de las horas trabajadas en el día. Verificar que la distancia entre pantallas y Martillos. Realizar toma de medidas de las pantallas. Realizar revisión ajuste de los componentes de fijación (tornillos) de las pantallas. Lubricar los rodamientos del rotor. Inspeccionar sistema hidráulico (Cilindro accionador) por fugas. Verificar espesores de las pantallas Cambiar las pantallas (Según condición). Inspeccion total de la cámara de trituración Capacitar operadores y técnicos Inspección visual de material en la cámara cada inicio de turno y cada 2 h de operación.	Operador Operador Operador Operador Técnico Técnico Técnico Técnico Proveedor Operador	Diario Diario Semanal Semanal Semanal Semanal Cada 500h Cada 500h Cada 500h Diario
142	Materiales Aluscasto	El operador observa que el material se quedó trabado, no está triturando nada.	Puede haber consecuencias en las personas por golpes o atrapamiento de extremidades, incremento en las emisiones de gases hacia el medio ambiente	ALTO	11	Limpieza de cámara de trituración para eliminar material acumulado que se pega en las paredes.	Operador	Semanal

Figura 22.

Selección de tareas de mantenimiento nivel de riesgo bajo

FF	MODOS DE FALLA	EVIDENCIA	CONSEC. SOBRE MA Y SEG.	Nivel de riesgo	ICR	Descripción Tarea	Encargado	Frecuencia
185	Pantallas excesivamente desgastados	El operador escucha un golpe rano, como si las piedras pegaran directo en el metal.	Riesgo de atrapamiento o golpes durante la remoción de martillos. No hay consecuencias en el medio ambiente	BAJO	7.3	Realizar una inspección básica (visual) del estado de las pantallas. Tomar registro de las horas trabajadas en el día. Verificar que la distancia entre pantallas y Martillos. Realizar toma de medidas de las pantallas. Realizar revisión ajuste de los componentes de fijación (tornillos) de las pantallas. Lubricar los rodamientos del rotor. Inspeccionar sistema hidráulico (Cilindro accionador) por fugas. Verificar espesores de las pantallas Cambiar las pantallas (Según condición). Inspección total de la cámara de trituración Capacitar operadores y técnicos	Operador Operador Técnico Técnico Técnico Técnico Técnico Técnico Proveedor	Diario Diario Diario Semanal Semanal Semanal Semanal Cada 250h Cada 500h Cada 500h Cada 500h
1A5	Material ingresa por fuera de especificaciones (mayor tamaño)	Operador evidencia material de gran tamaño que obstaculiza el ingreso de material para triturar.	Riesgo de atrapamiento o golpes durante la remoción de material. No hay consecuencias en el medio ambiente	BAJO	7	Monitoreo del sensor de nivel y flujo de material Capacitación al personal	Operador Supervisor Planta	Diario Trimestral
181	Ausencia o poco material para triturar	El operador observa que el rotor gira libre y que el material triturado sale de manera intermitente o en pequeñas cantidades por la banda de descarga.	No hay consecuencias en las personas, ni en el medio ambiente	BAJO	6	Revisar que no existan obstrucciones en el punto de alimentación Revisar en el tablero de control que no haya alarmas por falta de alimentación. Revisar el buen funcionamiento de la banda de alimentación Verificar visualmente el stock de material disponible en la tolva y en la zona de acopio antes de iniciar operaciones.	Operador Operador Operador Operador	Diario Diario Diario Diario
1A7	Bloques de seguridad activos	El operador observa que la cámara de trituración no arranca, se queda bloqueada por una alarma de seguridad.	No hay consecuencias en las personas, ni en el medio ambiente	BAJO	3.3	Observar comportamiento de alarmas y paradas en tablero de control antes de el arranque y la operación. Probar funcionamiento de pulsadores de parada de emergencia Verificar funcionamiento de sensores de sobrecarga Realizar limpieza sensores y conectores eléctricos Realizar simulaciones de disparo de protecciones para confirmar que actúan en el rango correcto.	Operador Operador Operador Técnico Técnico	Diario Semanal Semanal Mensual o Cada 250h Cada 1000h
1A1	Ausencia o falta de material para triturar	El operador observa que el rotor gira libre y no hay salida de material por la banda de descarga.	No hay consecuencias en las personas, ni en el medio ambiente	BAJO	2	Revisar que no existan obstrucciones en el punto de alimentación Revisar en el tablero de control que no haya alarmas por falta de alimentación. Revisar el buen funcionamiento de la banda de alimentación Verificar visualmente el stock de material disponible en la tolva y en la zona de acopio antes de iniciar operaciones.	Operador Operador Operador Operador	Diario Diario Diario Diario

6. Indicadores de gestión

Un indicador puede entenderse como una magnitud cuantitativa que brinda información precisa sobre un aspecto crítico dentro de la organización, sus procesos o el desempeño de las personas. Estos indicadores reflejan el grado de cumplimiento de las expectativas de los clientes en relación con factores como costos, calidad y plazos de entrega. Constituyen herramientas de monitoreo que permiten verificar la eficacia de las acciones ejecutadas y detectar posibles desviaciones entre lo planificado y lo realmente ejecutado (Pertuz, 2020, pág. 209).

Durante el desarrollo de la investigación se identificó que en la planta no existe un sistema formal de gestión de mantenimiento, lo que dificulta la correcta programación de actividades preventivas y predictivas. Esta situación repercute directamente en la eficiencia operativa de la trituradora Rubble Master 80 GO, generando riesgos de paradas no planificadas y disminución de la disponibilidad global del equipo.

6.1 Indicadores de mantenimiento

Los indicadores de mantenimiento y las herramientas de planificación empresarial asociadas al desempeño de los activos son esenciales para evaluar el comportamiento de los equipos, componentes y sistemas de una instalación. Al implementarlos de forma sistemática es posible optimizar la gestión de mantenimiento, orientándola hacia la mejora continua de la operación (Pertuz, 2020, pág. 1).

En este estudio se recomienda incorporar indicadores de confiabilidad (R) y disponibilidad (A), los cuales permiten medir objetivamente el desempeño de los activos. Su aplicación facilita el cálculo de métricas clave como la frecuencia de fallas, el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) y el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF). Estos datos permiten establecer una línea base cuantitativa que sirva de soporte para la toma de decisiones estratégicas en materia de mantenimiento..

6.1.1 Confiabilidad

“La medida de la confiabilidad de un equipo es la frecuencia con la cual ocurren las fallas. Si no hay fallas, el equipo es 100% confiable; si la frecuencia es baja, la confiabilidad del equipo es aceptable, pero si es muy alta, el equipo es poco confiable” (Mora Gutiérrez, s.f., pág. 95). Se relaciona directamente con el TMEF (*Tiempo Medio Entre Fallas*) también conocido por sus siglas en inglés como MTBF (*Mean Time Between Failures*) y se evaluará mediante la siguiente ecuación;

$$TMEF = \frac{\text{Horas Trabajadas}}{\# \text{ de fallas}}$$

Nota. Tomado de: Zerraga, M. (s.f.) Indicadores para la gestión del mantenimiento de equipos pesados.

6.1.2 Mantenibilidad

“La forma más clara de medir la mantenibilidad es en términos de los tiempos empleados en las diferentes restauraciones, reparaciones o realización de las tareas de mantenimiento

requeridas para llevar nuevamente el elemento o equipo a su estado de funcionalidad y normalidad” (Mora Gutiérrez, s.f., pág. 104). Está caracterizada por el Tmpr (*Tiempo Medio Para Reparar*) también conocido por sus siglas en inglés MTTR (*Medium Time To Repair*) y su ecuación es la siguiente;

$$Tmpr = \frac{\Sigma \text{Tiempo de reparaciones}}{\# \text{ de fallas}}$$

Nota. Tomado de: Zerraga, M. (s.f.) Indicadores para la gestión del mantenimiento de equipos pesados.

6.1.3 Disponibilidad

El modelo universal para pronosticar la disponibilidad propuesto por Mora (s.f., pág. 71), en su libro *Mantenimiento, Planeación, Ejecución y Control*, contempla diferentes aspectos a la hora de evaluarla, se debe escoger la más adecuada de acuerdo a los datos que se posean y con las expectativas de la empresa.

Dicho lo anterior la disponibilidad factible a calcular será la inherente o intrínseca la cual es muy útil cuando se trata de controlar las actividades de mantenimiento no planeados (correctivos y/o Modificativos), no incluye los tiempos logísticos, ni los tiempos administrativos, ni los tiempos de demora en suministros, asume idealmente que todo está listo al momento de realizar la reparación.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{TMEF}{TMEF + Tmpr}$$

Nota. Tomado de: Mora Gutierrez, A. (s.f.) *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control.*

6.2 Indicadores de costos

En las últimas décadas, el mantenimiento industrial ha dejado de concebirse únicamente como un centro generador de gastos, para convertirse en un proceso estratégico que contribuye al incremento de la productividad y a la sostenibilidad económica de las organizaciones (García Palencia, 2007).

Dado que el modelo planteado busca sentar las bases para una gestión de mantenimiento orientada a estándares de clase mundial, se proponen como punto de partida dos indicadores clave de costo que permitan iniciar el proceso de monitoreo y control financiero.

6.2.1 Costo de la mano de obra de mantenimiento

Este índice muestra la relación entre las horas totales invertidas en mantenimiento y el costo económico de la mano de obra empleada. De esta manera, se obtiene un valor representativo del gasto en recurso humano por cada hora destinada a actividades de mantenimiento:

Costo promedio de MO= número total de horas en mantenimiento/ Costo total de la mano de obra en mantenimiento.

6.2.2 Eficiencia de costo de mantenimiento (ECM)

Este indicador permite evaluar el grado de cumplimiento del presupuesto de mantenimiento asignado para un periodo específico.

ECM= Costo real ejecutado en el periodo/Presupuesto asignado en el periodo.

7. Conclusiones

Por medio de la jerarquización de sistemas fue posible describir la trituradora Rubble Master 80 GO! en sus diferentes sistemas y componentes, de esa manera poder conocer al detalle de su estructura y funcionamiento.

Se logró describir al 100 % la trituradora RM 80 GO en sus sistemas y componentes críticos, caracterizando su función primaria, variables operativas y condiciones de diseño.

El análisis de criticidad evidenció que el 22,2 % de los sistemas presentan un nivel de criticidad alto o crítico, representando los principales riesgos para la continuidad operativa y la seguridad. Asimismo, se determinó que el 55,6 % de los sistemas se encuentran en un nivel de criticidad medio, requiriendo controles y mantenimientos periódicos, mientras que el 22,2 % restante presenta criticidad baja, por lo que su impacto en la producción es limitado. Esta información es clave para priorizar recursos, optimizar la planificación de mantenimientos y enfocar esfuerzos en los sistemas que mayor impacto tienen sobre la confiabilidad y disponibilidad del equipo.

Se generó una taxonomía estructurada de componentes, facilitando la trazabilidad entre función → falla funcional → modo de falla → efecto → consecuencia, base indispensable para el AMEF.

Se logró identificar y documentar 17 modos de falla específicos para la cámara de trituración, cubriendo las fallas funcionales (no triturar, no alcanzar capacidad, producir material fuera de especificación) hasta fallas ocultas de difícil detección.

Los modos de falla se clasificaron según su causa raíz, evidencia observable y tipo de consecuencia (operativa, de seguridad, ambiental o económica), priorizando aquellos con mayor impacto en la disponibilidad y seguridad del personal.

Los resultados evidencian que 4 modos de falla alto (21.1 % del total) concentran el 40 % de las paradas no planificadas y deben ser atendidos de forma prioritaria.

Se aplicó un análisis cualitativo-cuantitativo utilizando el Índice Compuesto de Riesgo (ICR), obteniendo una clasificación clara de los niveles de riesgo: $ICR \geq 12$ (Críticos/Altos): 3 modos de falla, ICR entre 8 y 11.9 (Medios): 7 modos de falla y $ICR < 8$ (Bajos): 7 modos de falla menos frecuentes. Esta clasificación permitió jerarquizar las acciones de mantenimiento en función del riesgo, reduciendo el sesgo subjetivo en la priorización de actividades.

El análisis permitió identificar modos de falla que no son evidentes de inmediato (como embragues que no acoplan o baja presión en cilindros hidráulicos), lo que promueve el diseño de inspecciones proactivas y monitoreo predictivo para detectarlos antes de que afecten la operación.

Las estrategias formuladas buscan reducir la dependencia del mantenimiento correctivo y migrar a un enfoque preventivo y predictivo, estableciendo rutinas diarias, semanales, mensuales, trimestrales y semestrales, con responsables claramente asignados.

Se definieron tareas específicas y medibles (inspecciones visuales, ajustes, lubricaciones, medición de espesores, pruebas de presión hidráulica) que permiten estandarizar la forma en que se cuida cada componente, eliminando la improvisación en la programación de actividades.

Con la incorporación de indicadores como confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad permitira basar el mantenimiento en un proceso gestionado de forma objetiva. Estos indicadores proporcionan una línea base de operación que permite evaluar si las estrategias de mantenimiento

están funcionando, comparando resultados en diferentes periodos y favoreciendo una mejora continua.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar-Otero, J. R., & et al. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 25 (1), 15-26.
<https://www.redalyc.org/pdf/482/48215094003.pdf>
- Bravo Fernandez, L. M. (2015). *Desarrollo de un plan de mantenimiento para la central hidroeléctrica de Alcalá del Río, aplicando criterios de confiabilidad (RCM)*. [Proyecto Fin de Grado, Universidad de Sevilla].
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90479/fichero/TFG+LUZ+MARIA+FERNANDEZ+BRAVO+2015%252FDESARROLLO+DEL+PROYECTO.pdf>
- Campos-López, O., & et al. (2019). Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, base de datos y criticidad de efectos. *Científica*, 23 (1). <https://www.redalyc.org/jatsRepo/614/61458265006/html/index.html>
- García Palencia, O. (2007). Optimización Integral Del Mantenimiento: Hacia La Terotecnología De Clase Mundial. *Clepsidra* 3 (4), 60.
<http://revistas.fuac.edu.co/index.php/clepsidra/article/view/268/252>
- Goble, W. (2010). Control Systems Safety Evaluation and Reliability. International Society of Automation. North Carolina, USA, p. 87, Citado por Ortiz Useche, A et al. (2013) Gestión de mantenimiento en pymes industriales. *Revista Venezolana de Gerencia*, 18 (61), pp. 91.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=29026161004>

- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55000. Asset management — Overview, principles and terminology*.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000. Risk management — Guidelines*.
- International Organization For Standardization. (2016). *Industria del petróleo y gas natural — recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos. ISO 14224:2016*. <https://es.slideshare.net/cstparkour/norma-iso14224-en-espaol>
- Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance (2nd ed.)*. Butterworth-Heinemann.
- Mora Gutiérrez, A. (s.f.). *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*.
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM II*. Buenos Aires-Madrid: Aladon Ltd.
- Pertuz, A. (2020). *Principios de mantenimiento. En: Especialización en gerencia de mantenimiento*. Barranquilla: Memorias.
- Wireman, T. (2004). *Total Productive Maintenance*. Industrial Press.