

Desarrollo de una estrategia de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para la flota de equipos perforación de túneles mineros y viales tipo Jumbo Epiroc Boomer SID en la constructora ESTYMA S.A.

Carlos Fernando Barrera Carreño

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

Director

Ing. Juan Luciano Gómez López

Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mis padres y hermano, por su apoyo, comprensión y acompañamiento constante, que han sido la base para alcanzar este logro académico y profesional.

Este trabajo representa no solo un esfuerzo personal, sino también el compromiso con mi formación profesional y con la organización que me permitió llevarlo a cabo.

Este documento se dedica, principalmente, a las organizaciones e instituciones que promueven la excelencia en la gestión de mantenimiento, en reconocimiento al papel fundamental que desempeñan en la transformación y sostenibilidad de la industria.

Agradecimientos

A la empresa ESTYMA S.A., y todos los integrantes de la obra Rampa Los Indios en Marmato, Caldas, por la confianza depositada en mí y por permitir el desarrollo de este proyecto en un entorno real de aplicación, lo cual representa una valiosa oportunidad para aportar a la optimización de sus procesos de mantenimiento y a la consolidación de una cultura orientada a la confiabilidad y la mejora continua.

A mis profesores de la especialización en Gerencia de Mantenimiento, por su acompañamiento académico y por brindar las herramientas conceptuales y metodológicas que dieron fundamento a este trabajo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	17
1. Justificación	19
2. Objetivos	21
2.1 Objetivo general	21
2.2 Objetivos específicos	21
3. Marco teórico	22
3.1 Antecedentes	22
3.2 Marco contextual	24
3.3 Equipos de perforación Jumbo.....	25
3.3.1 Definición	25
3.3.2 Clasificación	25
3.3.3 Principios de operación.....	26
3.4 Perforador Jumbo Epiroc Boomer S1D	27
3.4.1 Sistemas y componentes	27
3.4.1.1 Alimentador o deslizante.	29
3.4.1.2 Brazo hidráulico.....	29
3.4.1.3 Guía de barrena.	31
3.4.1.4 Motor Diesel.	31
3.4.1.5 Tren motriz.....	32
3.4.1.6 Sistema de frenos.	34

3.4.1.7 Sistema de perforación.....	35
3.4.1.8 Sistema hidráulico.....	35
3.4.1.9 Sistema de aire – agua (watermist).....	36
3.4.110 Sistema eléctrico.....	36
3.5 Marco legal.....	37
3.5.1 Normatividad nacional.....	38
3.5.2 Normas internacionales.....	39
4. Aplicación de metodología RCM.....	39
4.1 Selección del elemento de estudio.....	40
4.1.1 Criterios de selección.....	40
4.2 Taxonomía.....	42
4.3 Interfaces, características, condiciones de operación y ambientales.....	42
4.4 Definiciones de funciones del elemento de estudio.....	44
4.5 Fallas funcionales.....	45
4.5.1 Tipologías.....	45
4.5.2 Categorías.....	47
4.5.3 Reglas para establecer fallas funcionales.....	48
4.5.4 Fallas funcionales de los sistemas seleccionados.....	49
4.6 Modos de falla.....	53
4.6.1 Definición.....	54
4.6.2 Reglas para la redacción de modos de falla.....	54
4.6.3 Causas ajenas al equipo.....	55
4.6.4 Claves para la identificación de modos de falla.....	57

4.6.5 Modos de falla de sistemas seleccionados	58
4.7 Análisis de efectos y consecuencias	63
4.7.1 Uso de los términos.....	63
4.7.2 Categorías de consecuencias.....	64
4.7.2.1 Visibilidad de la falla.....	64
4.7.2.2 Consecuencias en seguridad.	64
4.7.2.3 Consecuencias en el medio ambiente.	64
4.7.2.4 Consecuencias operacionales.....	64
4.7.2.5 Consecuencias en la imagen corporativa.....	65
4.7.2.6 Consecuencias en otras categorías.....	65
4.8 Análisis del riesgo.....	74
4.8.1 Enfoque metodológico.....	74
4.8.2 Clasificación de riesgos	75
4.9 Matriz de riesgos.....	86
4.9.1 Valoración de matriz de riesgos.....	87
4.10 Costos de mantenimiento: Análisis de valor de ciclo de vida de un activo.....	89
4.10.1 Comparación costos por mantenimientos reactivos y proactivos	90
4.11 Selección de tareas	99
4.11.1 Tareas, frecuencias y recursos	99
4.12 Implementación.....	109
4.12.1 Planeación y alineación estratégica	109
4.12.2 Participación y gestión del talento humano	110
4.12.3 Definición y formalización de procesos	110

4.12.4 Soporte tecnológico y sistemas de información.....	111
4.12.5 Monitoreo, seguimiento y mejora continua	111
4.12.6 Indicadores de gestión: MTBF y MTTR.	111
4.12.6.1 Aplicación en el plan de mantenimiento.....	112
4.12.7 Alcance de la implementación.....	113
5. Análisis y proyección de costos de mantenimiento	113
5.1 Conceptualización de los costos de mantenimiento.....	114
5.2 Costos del mantenimiento reactivo vs proactivo	114
5.2.1 Análisis comparativos de costos en cada sistema seleccionado	115
6. Plan de mantenimiento basado en RCM.....	118
6.1 Enfoque metodológico	119
6.2 Desarrollo del plan de mantenimiento	120
6.2.1 Frecuencia de ejecución.....	120
6.2.2 Descripción de rutinas.....	122
6.3 Formato guía de mantenimiento	126
7. Conclusiones	129
8. Recomendaciones	130
Referencias bibliográficas.....	133

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Subdivisión de series de números	28
Tabla 2. Componentes de brazo hidráulico.....	30
Tabla 3. Componentes tren motriz.....	33
Tabla 4. Componentes sistema de frenos.....	34
Tabla 5. Bombas sistema hidráulico DCS2	36
Tabla 6. Componentes principales sistema agua – aire (watermist).....	36
Tabla 7. Características baja y extra – baja tensión	37
Tabla 8. Selección de sistemas para elementos de estudio	41
Tabla 9. Identificación de interfaces, características, condiciones de operación y ambientales.	42
Tabla 10. Definición de funciones	44
Tabla 11. Fallas funcionales sistema de perforación	50
Tabla 12. Fallas funcionales en sistema hidráulico.....	51
Tabla 13. Fallas funcionales sistema agua-aire (watermist)	52
Tabla 14. Fallas funcionales sistema eléctrico.....	53
Tabla 15. Modos de falla asociados al sistema de perforación.....	58
Tabla 16. Modos de falla asociados al sistema hidráulico.....	59
Tabla 17. Modos de falla asociados al sistema aire-agua (watermist).....	61
Tabla 18. Modos de falla asociados al sistema eléctrico	62
Tabla 19. Efectos y consecuencias en el sistema de perforación.....	65
Tabla 20. Efectos y consecuencias en el sistema hidráulico.....	67

Tabla 21. Efectos y consecuencias en el sistema aire-agua (watermist).....	69
Tabla 22. Efectos y consecuencias en el sistema eléctrico	71
Tabla 23. Análisis del riesgo del sistema de perforación.....	76
Tabla 24. Análisis del riesgo del sistema hidráulico.....	79
Tabla 25 Análisis del riesgo del sistema aire – agua (watermist).....	81
Tabla 26. Análisis del riesgo del sistema eléctrico	84
Tabla 27. Comparación de costos reactivos vs. proactivos en sistema de perforación.....	91
Tabla 28. Comparación de costos reactivos vs. proactivos en sistema hidráulico.....	92
Tabla 29. Comparación de costos reactivos vs. proactivos en sistema aire-agua (watermist) ...	94
Tabla 30. Comparación de costos reactivos vs. proactivos en sistema eléctrico	96
Tabla 31. Tareas de mantenimiento en sistema de perforación	101
Tabla 32. Tareas de mantenimiento en sistema hidráulico	103
Tabla 33. Tareas de mantenimiento en sistema aire-agua (watermist).	105
Tabla 34. Tareas de mantenimiento en sistema eléctrico.....	107
Tabla 35. Comparación de costos de mantenimiento proactivo vs reactivo por sistema.....	116
Tabla 36. Frecuencia o intervalos de ejecución	121
Tabla 37. Generalidades de las rutinas establecidas	122

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Perforador Jumbo Boomer S1D	27
Figura 2. Subdivisión del equipo perforador	28
Figura 3. Alimentador o deslizante.....	29
Figura 4. Brazo hidráulico	30
Figura 5. Guía de barrena	31
Figura 6. Motor Diesel.....	32
Figura 7. Tren motriz.....	33
Figura 8. Sistema de frenos.....	34
Figura 9. Perforadora	35
Figura 10. Taxonomía jerárquica de principales sistemas de estudio.....	42
Figura 11. Valoración de matriz de riesgos	89
Figura 12. Análisis del valor de ciclo de vida de un activo	89
Figura 13. Tipos de tareas de mantenimiento	100
Figura 14. Comparación de costos de mantenimiento proactivo vs reactivo por sistema	117
Figura 15. Rutina sistema de perforación	123
Figura 16. Rutina sistema hidráulico	124
Figura 17. Rutina sistema aire – agua (watermist)	125
Figura 18. Rutina sistema eléctrico.....	125
Figura 19. Formato guía de mantenimiento.....	128

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Formato de guía de mantenimiento.

Glosario

Análisis de criticidad: herramienta utilizada para priorizar equipos o sistemas en función de su impacto en la seguridad, productividad, costos y medio ambiente.

Análisis de modos y efectos de falla (FMEA): metodología sistemática que permite identificar los modos de falla, sus causas y consecuencias, estableciendo acciones de mantenimiento para mitigar riesgos.

Boomer SID: modelo de Jumbo de perforación fabricado por Epiroc, diseñado para labores de excavación en minería y construcción de túneles.

Confiabilidad: probabilidad de que un equipo o sistema desempeñe su función sin fallar durante un periodo de tiempo definido bajo condiciones específicas.

Disponibilidad: porcentaje de tiempo en que un equipo está en condiciones de operar respecto al tiempo total programado.

Eficiencia operativa: relación entre los recursos utilizados y los resultados obtenidos en la operación de equipos, optimizada mediante buenas prácticas de mantenimiento.

Falla funcional: situación en la que un activo pierde su capacidad de cumplir una función requerida.

Gestión de activos: conjunto de actividades coordinadas para obtener valor de los activos físicos, bajo lineamientos como la norma ISO 55000.

Indicadores de mantenimiento: medidas cuantitativas que permiten evaluar el desempeño del mantenimiento, tales como MTBF, MTTR, disponibilidad y costos de mantenimiento.

Jumbo de perforación: equipo autopropulsado con brazos articulados, utilizado en minería y construcción de túneles para realizar perforaciones en roca.

Mantenibilidad: facilidad y rapidez con la que un activo puede ser reparado tras una falla.

Mantenimiento correctivo (reactivo): conjunto de acciones realizadas después de que ocurre una falla, con el objetivo de restablecer la funcionalidad del activo.

Mantenimiento predictivo (proactivo): estrategia que utiliza el monitoreo de condición (vibraciones, temperatura, presión, análisis de aceites, etc.) para anticiparse a fallas.

Mantenimiento preventivo (proactivo): acciones programadas en intervalos definidos (tiempo o uso) para reducir la probabilidad de fallas.

MTBF (Mean Time Between Failures): tiempo promedio transcurrido entre dos fallas consecutivas de un equipo.

MTTR (Mean Time To Repair): tiempo promedio requerido para reparar un equipo y devolverlo a operación.

Norma IEC 60300-3-11: norma internacional que ofrece una guía práctica para la aplicación del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) en sistemas industriales, definiendo principios, criterios y tareas de mantenimiento.

Norma ISO 55000: estándar internacional que define principios y terminología para la gestión de activos físicos.

Norma SAE JA1011: norma que define los criterios para evaluar procesos de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).

Norma SAE JA1012: guía técnica que complementa la SAE JA1011, ofreciendo lineamientos para la aplicación práctica de RCM.

Operatividad: capacidad de un activo para estar disponible y cumplir con sus funciones en condiciones de operación normal.

Productividad: medida de la eficiencia con la que un equipo convierte los recursos (tiempo, energía, insumos) en producción útil.

RCM (Reliability Centered Maintenance): metodología de gestión de mantenimiento que permite determinar qué debe hacerse para asegurar que un activo físico continúe cumpliendo sus funciones en su contexto operacional.

Seguridad operacional: Conjunto de prácticas, medidas y procedimientos destinados a proteger la integridad de los trabajadores y equipos durante la operación y el mantenimiento.

Sostenibilidad: capacidad de las operaciones para equilibrar productividad, seguridad, cuidado ambiental y rentabilidad a largo plazo.

Resumen

Título: Desarrollo de una estrategia de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para la flota de equipos perforación de túneles mineros y viales tipo Jumbo Epiroc Boomer S1D en la constructora ESTYMA S.A.*

Autor: Carlos Fernando Barrera Carreño**

Palabras Clave: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), Análisis de Modos de Falla y Efectos (FMEA), Matriz de riesgos, Indicadores de mantenimiento, Costos de mantenimiento, Operatividad, Estrategia de mantenimiento, Perforador Jumbo Epiroc S1D.

Descripción:

La gestión eficiente del mantenimiento en equipos de perforación ha sido un factor determinante para garantizar la productividad, la seguridad y la sostenibilidad en proyectos mineros y viales. En esta monografía se ha desarrollado una estrategia de mantenimiento centrada en confiabilidad (RCM) aplicada a la flota de equipos Jumbo Epiroc Boomer S1D de la empresa ESTYMA S.A., con el propósito de optimizar la disponibilidad operacional y reducir los costos asociados a fallas no planificadas.

El diagnóstico inicial ha evidenciado que la gestión tradicional basada en mantenimiento preventivo y correctivo ha resultado insuficiente para responder a las exigencias actuales de la operación. Por ello, se ha implementado un análisis de criticidad y un estudio FMEA en los sistemas de perforación, hidráulico, aire-agua y eléctrico, identificando las fallas más relevantes y priorizando las acciones de control.

Como resultado, se ha diseñado un plan de mantenimiento estructurado bajo los lineamientos del RCM, que ha incorporado tareas preventivas, predictivas y de monitoreo de condición, alineadas con normativas internacionales como SAE JA1011, SAE JA1012, IEC 60300-3-11 e ISO 55000. La aplicación de este enfoque ha demostrado beneficios significativos: aumento de la confiabilidad y disponibilidad, mayor seguridad para los trabajadores, reducción de impactos ambientales y optimización de los costos de mantenimiento, con ahorros estimados entre un 27% y un 86% según el sistema analizado.

En conclusión, la estrategia RCM ha representado una herramienta viable y efectiva que, aplicada a los equipos de perforación, ha fortalecido la competitividad de la empresa en el sector minero y vial, asegurando operaciones más seguras, sostenibles y eficientes a mediano y largo plazo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Ing. Juan Luciano Gómez López Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Abstract

Title: Development of a Reliability-Centered Maintenance (RCM) Strategy for the Fleet of Tunnel Mining and Road Drilling Equipment, Jumbo Epiroc Boomer S1D, at ESTYMA S.A. *

Author: Carlos Fernando Barrera Carreño **

Key Words: Reliability-Centered Maintenance (RCM), Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), Risk matrix, Maintenance indicators, Maintenance costs, Operability, Maintenance strategy, Jumbo Epiroc Boomer S1D drill.

Description:

Efficient maintenance management in drilling equipment has been a determining factor in ensuring productivity, safety, and sustainability in mining and tunneling projects. In this monograph, a Reliability-Centered Maintenance (RCM) strategy has been developed and applied to the fleet of Jumbo Epiroc Boomer S1D equipment at ESTYMA S.A., with the purpose of optimizing operational availability and reducing costs associated with unplanned failures.

The initial diagnosis has shown that traditional management based mainly on preventive and corrective maintenance has proven insufficient to meet current operational demands. Therefore, a criticality analysis and a Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) have been implemented in the drilling, hydraulic, air-water, and electrical systems, identifying the most relevant failures and prioritizing control actions.

As a result, a maintenance plan has been designed under the guidelines of RCM, incorporating preventive, predictive, and condition-monitoring tasks, aligned with international standards such as SAE JA1011, SAE JA1012, IEC 60300-3-11, and ISO 55000. The application of this approach has demonstrated significant benefits: increased reliability and availability, improved worker safety, reduced environmental impacts, and optimized maintenance costs, with estimated savings ranging from 27% to 86% depending on the system analyzed.

In conclusion, the RCM strategy has represented a viable and effective tool which, when applied to drilling equipment, has strengthened the company's competitiveness in the mining and tunneling sector, ensuring safer, more sustainable, and more efficient operations in the medium and long term.

* Work of Grade

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Ing. Juan Luciano Gómez López Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Introducción

En el desarrollo de proyectos de infraestructura subterránea, como túneles viales y mineros, la disponibilidad y confiabilidad de los equipos de perforación se convierten en factores determinantes para cumplir con los cronogramas de obra y garantizar la seguridad del personal.

La constructora ESTYMA S.A., empresa colombiana con destacada trayectoria en este sector, ha centrado buena parte de su capacidad operativa en una flota de equipos tipo Jumbo Epiroc Boomer S1D, reconocidos por su eficiencia en trabajos de perforación frontal. No obstante, en el entorno desafiante en el que se desenvuelven, la frecuencia de paradas no programadas y las fallas mecánicas recurrentes han comenzado a impactar de forma considerable el rendimiento operativo y los costos de mantenimiento. Este escenario plantea un problema técnico y de gestión que requiere atención urgente. Las fallas inesperadas generan retrasos, aumentan los costos operativos y afectan la vida útil de los equipos. Ante esto, se hace evidente la necesidad de desarrollar una estrategia más estructurada y adaptada al contexto de operación de la flota. La propuesta surge, entonces, como una respuesta técnica y metodológica a esa necesidad: desarrollar una estrategia de mantenimiento centrada en confiabilidad (RCM) que permita anticiparse a las fallas, optimizar recursos y asegurar una mayor disponibilidad de los equipos.

El objetivo no es solo reducir el número de paradas, sino también establecer un sistema de mantenimiento más eficiente, fundamentado en el análisis funcional de los equipos, la identificación de los modos de falla críticos y la aplicación de tareas preventivas y predictivas adecuadas. El enfoque RCM, ampliamente aplicado en industrias de la construcción y minería, ofrece una base técnica sólida para tomar decisiones basadas en riesgos y en las funciones

esenciales de los activos. Con ello se busca trasladar esas buenas prácticas al contexto específico de los proyectos subterráneos de ESTYMA S.A.

En cuanto al impacto, esta propuesta tiene implicaciones positivas en varias dimensiones. Desde lo económico, se proyecta una reducción de costos correctivos y una mejor planificación del mantenimiento. En lo social, se mejora la seguridad del personal al reducir situaciones imprevistas en el frente de trabajo. Ambientalmente, se disminuye el desperdicio de materiales y la generación de residuos asociados a fallas repetitivas. Y en lo productivo, se logra una mayor continuidad en los procesos de excavación, clave para cumplir con los plazos contractuales.

La importancia de este trabajo también se justifica en su aporte al fortalecimiento de la gestión de activos dentro de la empresa. En lugar de depender de rutinas de mantenimiento genéricas o intervenciones correctivas, el RCM permite tomar decisiones con base en el comportamiento real de los equipos y en el conocimiento técnico de su funcionamiento. Esto representa una evolución desde un enfoque reactivo hacia uno más preventivo y estratégico, alineado con los principios de mejora continua.

Este estudio se apoya en los fundamentos del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), una metodología que busca asegurar que los sistemas sigan cumpliendo sus funciones en su contexto operacional. El RCM considera el análisis funcional de los equipos, los modos de falla, sus efectos y consecuencias, y permite priorizar intervenciones basadas en riesgos y criticidad.

Basado en las normas técnicas y estándares que respaldan la aplicación de la metodología RCM y el análisis de fallas. Las más relevantes a tener en cuenta son:

SAE JA1011: Norma que define los requisitos mínimos para que un proceso pueda considerarse como RCM.

SAE JA1012: Guía que detalla cómo aplicar correctamente el proceso RCM.

IEC 60300-3-11: Proporciona directrices para la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad.

La necesidad de mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos en ESTYMA S.A. no es un tema menor. Representa una oportunidad concreta para que la organización avance hacia una gestión moderna de sus activos, con base en análisis técnico y en decisiones sustentadas en datos. Este trabajo busca brindar una solución aplicable, con resultados tangibles a corto y mediano plazo, que genere valor tanto en lo operativo como en lo estratégico. Apostar por una estrategia RCM no solo permitirá resolver el problema de las fallas recurrentes, sino que también contribuirá a consolidar una cultura de mantenimiento proactiva, eficiente y alineada con los estándares internacionales.

1. Justificación

En los proyectos de minería y construcción de túneles, los equipos de perforación tipo Jumbo Epiroc Boomer S1D constituyen un recurso estratégico, dado que su desempeño incide directamente en la continuidad de las operaciones y en el cumplimiento de los cronogramas establecidos. Estos equipos no solo son determinantes en el avance de los frentes de excavación, sino que también tienen un impacto significativo en la seguridad de los trabajadores y en la rentabilidad global de las obras.

A pesar de su importancia, en muchas organizaciones las prácticas de mantenimiento aplicadas a este tipo de maquinaria se encuentran basadas en esquemas correctivos o preventivos

tradicionales, los cuales resultan insuficientes frente a la complejidad técnica y la criticidad operativa de los equipos. Como consecuencia, se generan paradas imprevistas, mayores costos asociados a reparaciones de emergencia, disminución de la vida útil de componentes y retrasos que afectan directamente la productividad del proyecto. Estas limitaciones no solo repercuten en el plano económico, sino que también incrementan los riesgos de seguridad en ambientes de trabajo altamente exigentes como lo son las labores subterráneas.

En este contexto, la adopción de una estrategia de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) se plantea como una alternativa idónea para afrontar dichas problemáticas. Esta metodología permite analizar de manera sistemática los modos de falla más relevantes, valorar sus consecuencias operacionales y de seguridad, y definir planes de mantenimiento que prioricen la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos. De esta manera, la implementación de un plan RCM en la flota de jumbos Epiroc Boomer S1D contribuirá no solo a la reducción de fallas críticas y de costos asociados, sino también a la optimización en la planificación de recursos, la gestión de repuestos y la preparación del personal técnico.

El desarrollo de esta estrategia representa un aporte significativo para la compañía, al demostrar cómo un enfoque estructurado y proactivo puede transformar la gestión de activos críticos, garantizar la continuidad operativa de los proyectos y fortalecer la competitividad de la empresa en un sector altamente demandante como el de la minería y la construcción de túneles.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar una estrategia de mantenimiento centrada en confiabilidad (RCM) para la flota de equipos de perforación de túneles mineros y viales tipo Jumbo Epiroc Boomer S1D, con el fin de mejorar su disponibilidad operativa, optimizar los costos de mantenimiento y fortalecer la gestión de activos críticos de la organización.

2.2 Objetivos específicos

Analizar cómo se está gestionando actualmente el mantenimiento de los equipos Jumbo Epiroc Boomer S1D, con base en los registros de fallas, paradas operativas y las rutinas aplicadas, para identificar oportunidades de mejora.

Establecer las funciones críticas y los riesgos asociados a su falla mediante un análisis de criticidad de los sistemas y componentes principales de los equipos.

Aplicar la metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (FMEA) para identificar los modos de falla más relevantes y sus consecuencias operativas.

Diseñar un plan de mantenimiento basado en confiabilidad (RCM) que defina tareas preventivas, predictivas y de monitoreo de condición, ajustadas a los modos de falla identificados.

Definir indicadores claves que sirvan para hacerle seguimiento a los resultados del plan, como el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR) y el porcentaje de disponibilidad operativa.

3. Marco teórico

3.1 Antecedentes

La minería en Colombia ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, impulsada principalmente por la explotación de carbón, níquel, oro y esmeraldas. Este desarrollo ha traído consigo la necesidad de contar con equipos de gran capacidad y alta disponibilidad, especialmente en operaciones a cielo abierto y subterráneas. En este contexto, la gestión del mantenimiento ha pasado de ser un área operativa de soporte a convertirse en un factor estratégico para garantizar la productividad, la seguridad y la sostenibilidad de las operaciones.

En el ámbito nacional, diferentes estudios y experiencias empresariales han mostrado cómo la aplicación de metodologías como el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y el análisis de criticidad contribuyen a mejorar la gestión de activos en minería. Estos avances responden a la alta exigencia de disponibilidad de equipos como palas, camiones de acarreo y perforadoras, cuya indisponibilidad genera pérdidas operacionales y económicas significativas.

En este sentido, la aplicación del RCM en equipos de perforación subterránea, resulta coherente con las tendencias actuales del sector, al proporcionar una metodología sistemática para

reducir fallas críticas, incrementar la seguridad operacional y garantizar la sostenibilidad de los proyectos en Colombia.

En la actualidad, esta metodología se ha convertido en un referente internacional para la gestión moderna del mantenimiento, al integrarse con modelos de gestión de activos, normativas como la ISO 55000 y estrategias de mejora continua.

Para el caso específico de los equipos de perforación Jumbo Epiroc Boomer S1D, la aplicación del RCM cobra especial relevancia debido a la criticidad de estas máquinas en los procesos de excavación subterránea. Su disponibilidad no solo condiciona el ritmo de avance de las obras, sino que también incide en aspectos de seguridad laboral, cumplimiento de plazos contractuales y sostenibilidad económica de los proyectos. Así, el análisis de los antecedentes del RCM permite sustentar la pertinencia de adoptar este enfoque en el sector de la construcción de túneles y minería, como una herramienta clave para garantizar operaciones seguras, confiables y competitivas.

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) se consolidó a partir de la publicación del informe de Nowlan y Heap en 1978 y fue estandarizado posteriormente con la norma SAE JA1011, que define los criterios mínimos que debe cumplir un proceso para considerarse como RCM (SAE International, 1999). Dichas directrices garantizan un enfoque basado en funciones, modos de falla y consecuencias, con el fin de seleccionar políticas de mantenimiento costo-efectivas.

En el sector minero, diversas investigaciones han aplicado RCM en equipos de alta criticidad para nuestro caso los equipos de perforación, evidenciando mejoras en disponibilidad operacional, reducción de paradas no programadas y optimización de costos de mantenimiento (Bevilacqua & Braglia, 2000; Bhadury, 2000). Estos estudios destacan que la aplicación

sistemática del FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) y el enfoque de confiabilidad permiten priorizar recursos en los modos de falla más críticos.

3.2 Marco contextual

En la industria minera y de construcción de túneles se ha consolidado como un sector estratégico para el desarrollo económico del país, impulsando la infraestructura vial, el transporte y la explotación de recursos naturales. Estas actividades se caracterizan por operar en ambientes altamente demandantes, donde la continuidad del proceso y el cumplimiento de cronogramas dependen en gran medida de la disponibilidad de maquinaria especializada.

En este contexto, los equipos de perforación tipo Jumbo Epiroc Boomer S1D representan activos de alta criticidad, ya que son los responsables de ejecutar las labores de perforación en frentes subterráneos, paso fundamental para el avance de túneles y galerías. La confiabilidad de estos equipos impacta directamente en el rendimiento productivo, la seguridad de los trabajadores y los costos asociados a la operación. Su indisponibilidad puede generar retrasos en los proyectos, sobrecostos y riesgos operativos que afectan la competitividad de la empresa.

La empresa ESTYMA S.A., dedicada a la construcción de proyectos de infraestructura y minería subterránea, depende de la operación eficiente de esta flota de jumbos para asegurar el cumplimiento de los plazos contractuales y la calidad en la ejecución de obras. Sin embargo, las prácticas de mantenimiento predominantes han estado orientadas a esquemas preventivos generales o correctivos, que, si bien permiten resolver fallas inmediatas, no abordan de manera sistemática las causas raíz, ni priorizan los modos de falla de mayor impacto.

En este escenario, el desarrollo de la estrategia no solo permitirá optimizar la disponibilidad y seguridad de los equipos, sino que también se alinea con las tendencias internacionales de gestión de activos y con las necesidades del sector minero colombiano de implementar prácticas de mantenimiento más eficientes, sostenibles y orientadas a resultados.

3.3 Equipos de perforación Jumbo

3.3.1 Definición

Los equipos de perforación tipo Jumbo son máquinas pesadas utilizadas en minería y construcción de túneles para realizar perforaciones en frentes de roca con fines de voladura o sostenimiento. Su diseño integra chasis móvil, sistemas hidráulicos de posicionamiento y uno o más brazos perforadores que permiten ejecutar de manera precisa y eficiente los patrones de barrenación requeridos para los ciclos de avance subterráneos (Epiroc, 2020).

3.3.2 Clasificación

Se clasifican de acuerdo con su número de brazos o “booms” que poseen:

Jumbo de un brazo: Orientado a labores de perforación en galerías de pequeña sección o proyectos donde el espacio de operación es reducido.

Jumbo de dos brazos: Utilizado en túneles de mediana a gran sección, permitiendo mayor cobertura en el frente.

Jumbo de tres brazos: Diseñado para obras de gran escala, en las que se requiere una mayor productividad y coberturas simultáneas.

El modelo Epiroc Boomer S1D, objeto de estudio, corresponde a la categoría de jumbo de un brazo, caracterizado por su versatilidad y capacidad de operar en secciones pequeñas y medianas con altos niveles de precisión.

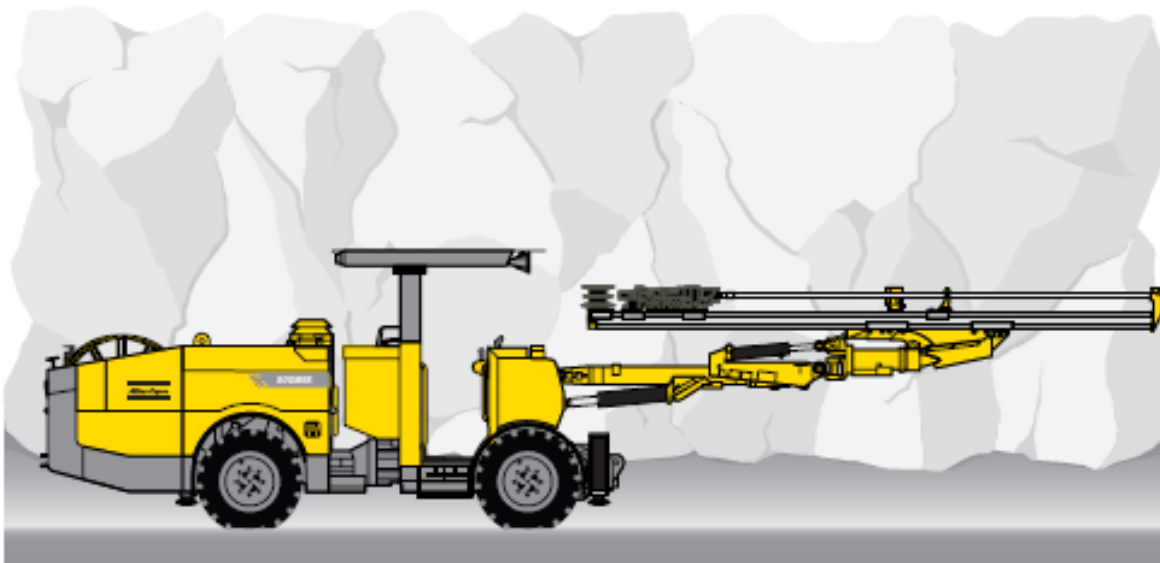
3.3.3 Principios de operación

El funcionamiento de los jumbos de perforación se basa en la transferencia de energía mecánica al terreno a través de un martillo perforador, que combina movimientos de percusión, rotación y empuje, asistidos por un sistema de avance hidráulico. La ecuación de trabajo de perforación se expresa con la relación que existe entre la energía de impacto aplicada por el pistón del martillo, la fuerza de empuje ejercida sobre la broca y la velocidad de rotación que facilita la fragmentación de la roca.

3.4 Perforador Jumbo Epiroc Boomer S1D

Figura 1.

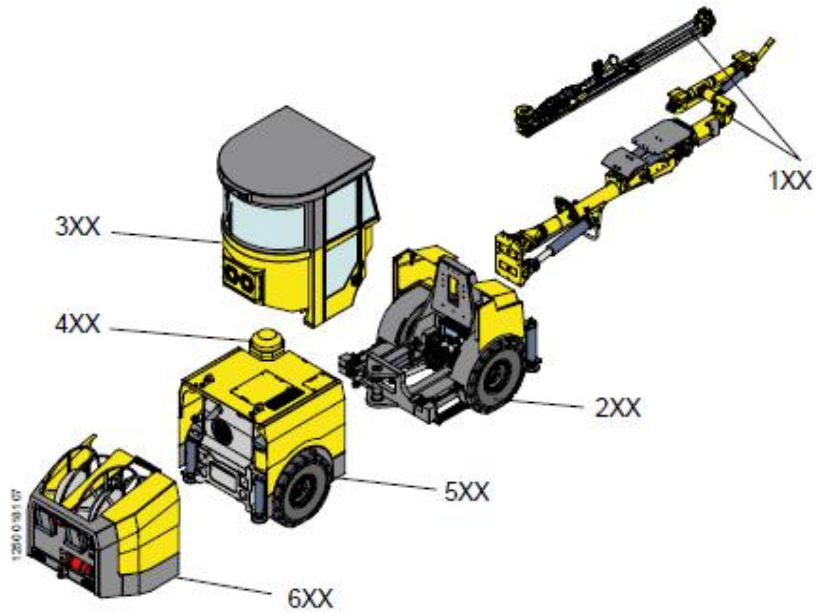
Perforador Jumbo Boomer S1D



Nota. Tomado de: Manual de Mantenimiento Boomer S1D Copyright © Epiroc Group. ID: PM No. 9852 2984 56d.

3.4.1 Sistemas y componentes

Conformado por un conjunto de sistemas que trabajan de manera integrada para ejecutar la labor de perforación subterránea con eficiencia y seguridad.

Figura 2.*Subdivisión del equipo perforador*

Nota. Tomado de: Manual de Mantenimiento Boomer S1D Copyright © Epiroc Group. ID: PM No. 9852 2984 56d.

Tabla 1.*Subdivisión de series de números*

1XX	Módulo del brazo
2XX	Módulo delantero
3XX	Módulo plataforma/cabina
4XX	Módulo de potencia

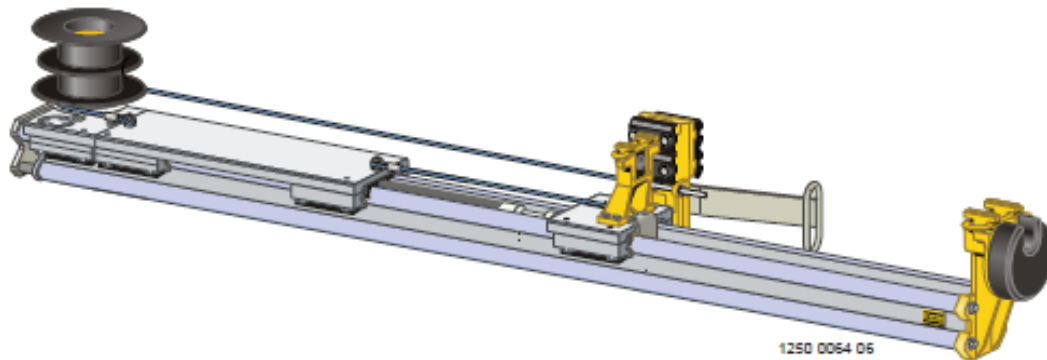
Nota. Tomado de: Manual de Mantenimiento Boomer S1D Copyright © Epiroc Group. ID: PM

No. 9852 2984 56d

3.4.1.1 Alimentador o deslizante. Riel donde se mueve el martillo perforador del jumbo, asegurando que la broca entre recta en la roca y transmitiendo el empuje necesario para realizar los barrenos.

Figura 3.

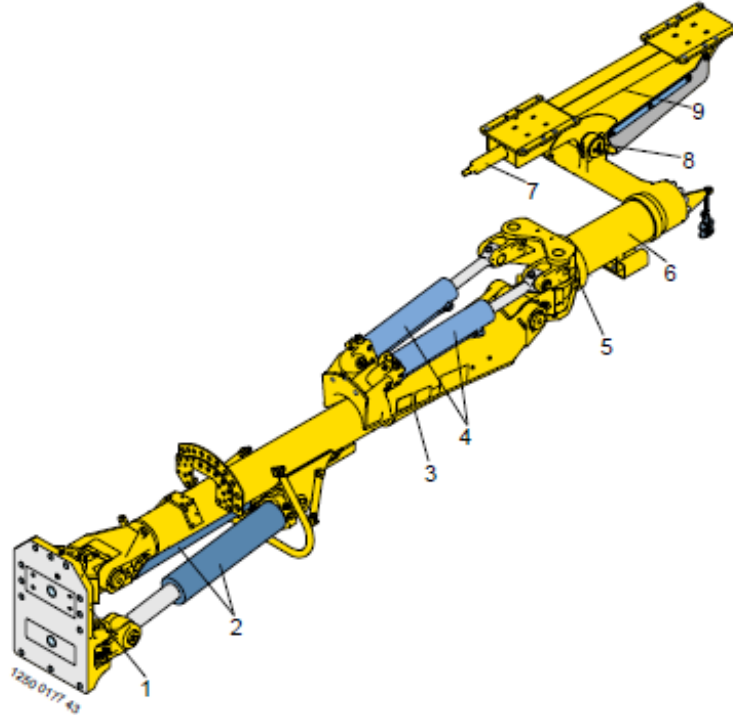
Alimentador o deslizante



Nota. Tomado de: Manual de Mantenimiento Boomer S1D Copyright © Epiroc Group. ID: PM No. 9852 2984 56d.

3. 4.1.2 Brazo hidráulico. Es un brazo telescópico con 360° de rotación del alimentador o deslizante. Tiene suspensión en tres puntos, en el frente y parte trasera. La unidad de suspensión de tres puntos incluye dos cilindros hidráulicos los cuales, a través de conexión en serie por pares, proporcionan alimentación en paralelo tanto vertical como horizontalmente.

Un cilindro de inclinación permite colocar al alimentador para perforación en el techo y en galerías transversales.

Figura 4.*Brazo hidráulico*

Nota. Tomado de: Manual de Mantenimiento Boomer S1D Copyright © Epiroc Group. ID: PM No. 9852 2984 56d.

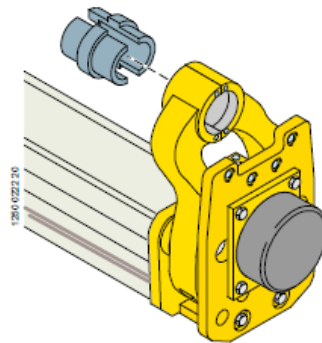
Tabla 2.*Componentes de brazo hidráulico*

No.	Componente
1	Placa de fijación
2	Cilindros de brazo trasero
3	Unidad telescópica
4	Cilindros de brazo delantero
5	Aditamento del brazo delantero
6	Actuador rotatorio
7	Cilindro de extensión de avance
8	Cilindro de inclinación
9	Soporte de deslizante

3.4.1.3 Guía de barrena. Dispositivo ubicado en el extremo del alimentador o deslizador del jumbo, cuya función es alinear, estabilizar y dirigir la barrena (barra de perforación) durante la entrada y salida de la roca

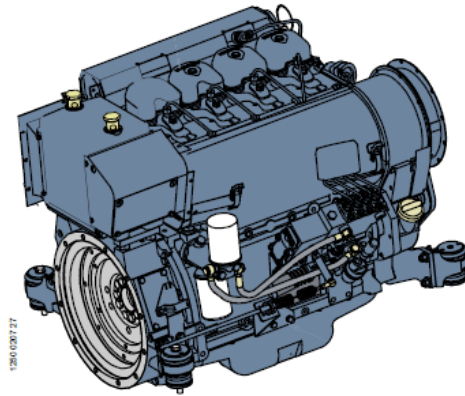
Figura 5.

Guía de barrena



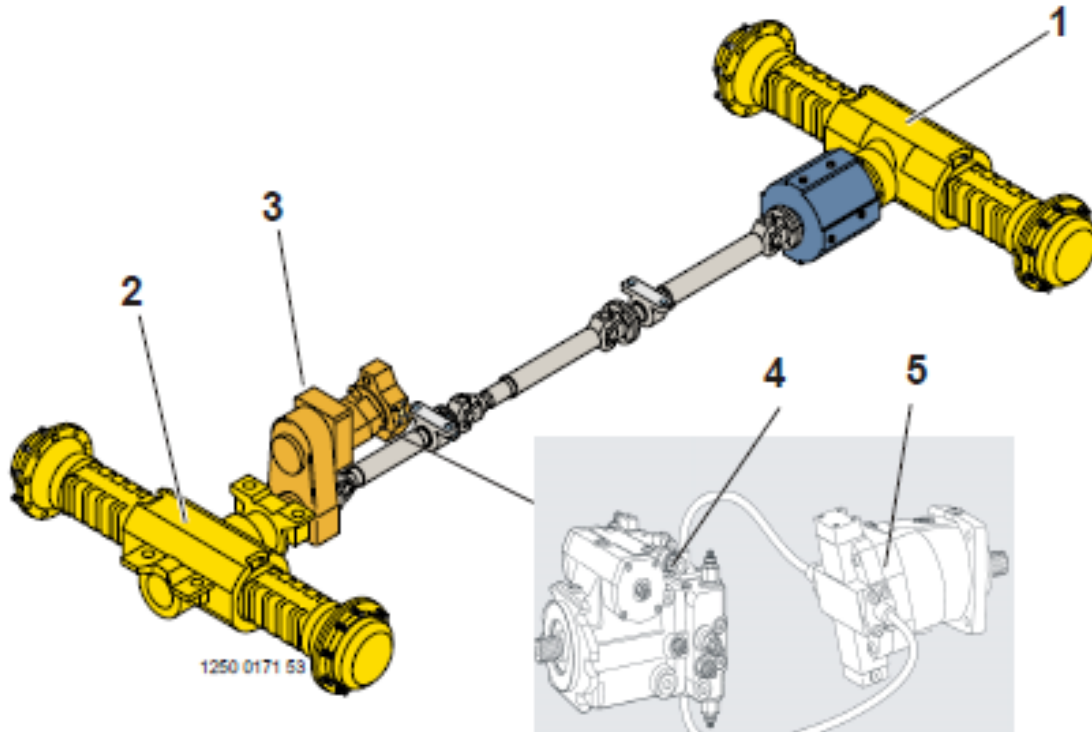
Nota. Tomado de: Manual de Mantenimiento Boomer S1D Copyright © Epiroc Group. ID: PM No. 9852 2984 56d.

3.4.1.4 Motor Diesel. Unidad de potencia principal encargada de generar la energía mecánica necesaria para el desplazamiento autónomo del equipo en túneles y galerías.

Figura 6.*Motor Diesel*

Nota. Tomado de: Manual de Mantenimiento Boomer S1D Copyright © Epiroc Group. ID: PM No. 9852 2984 56d.

3.4.1.5 Tren motriz. Sistema que transmite la potencia del motor al sistema de rodaje (ruedas), permitiendo el movimiento y control del Jumbo en labores subterráneas.

Figura 7.*Tren motriz*

Nota. Tomado de: Manual de Mantenimiento Boomer S1D Copyright © Epiroc Group. ID: PM No. 9852 2984 56d.

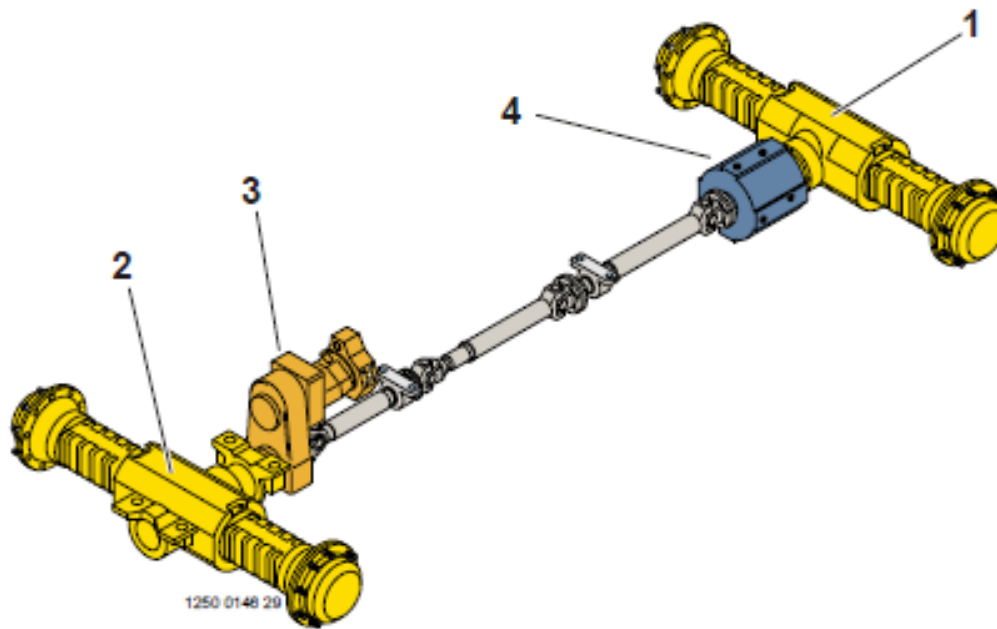
Tabla 3.*Componentes tren motriz*

No.	Componente
1	Eje delantero
2	Eje trasero
3	Transmisión hidráulica
4	Bomba de acarreo
5	Motor de acarreo

3.4.1.6 Sistema de frenos. Conjunto de frenos hidráulicos multidisco en baño de aceite, complementado con freno de estacionamiento y de emergencia, que asegura el control y la detención segura del equipo en cualquier condición subterránea.

Figura 8.

Sistema de frenos



Nota. Tomado de: Manual de Mantenimiento Boomer S1D Copyright © Epiroc Group. ID: PM No. 9852 2984 56d.

Tabla 4.

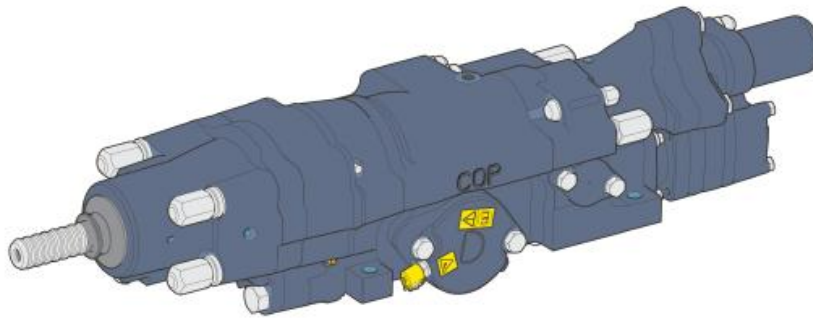
Componentes sistema de frenos

No.	Componente
1	Eje delantero
2	Eje trasero
3	Transmisión hidráulica
4	Freno de estacionamiento

3.4.1.7 Sistema de perforación. Compuesto por un martillo perforador hidráulico montado en un brazo articulado, con controles de avance, empuje, rotación y percusión. Integra un alimentador (feed) que guía la perforación, un sistema hidráulico de alta presión que acciona los movimientos de impacto y rotación, un sistema de barrido con agua o aire para evacuación de detritos, y sensores de control que permiten precisión en el ángulo y profundidad del barreno. Su diseño asegura alta tasa de penetración, durabilidad de la broca y eficiencia en la excavación subterránea.

Figura 9.

Perforadora



Nota. Tomado de: Manual de Mantenimiento Boomer S1D Copyright © Epiroc Group. ID: PM No. 9852 2984 56d.

3.4.1.8 Sistema hidráulico. Conjunto encargado de suministrar, regular y controlar la energía hidráulica necesaria para accionar el martillo perforador, el brazo de perforación, los cilindros de avance y los sistemas auxiliares, garantizando precisión, potencia y eficiencia en las operaciones subterráneas.

Tabla 5.*Bombas sistema hidráulico DCS2*

Componente	Tipo	Modelo	Desplazamiento		
Bomba principal (unidad de posicionamiento y percusión)	Bomba de émbolo axial	RX A10VO	Motor eléctrico 95 kW		
			180 cm ³ / vuelta		
Bomba para rotación, bomba de agua/amortiguador y compresor	Bomba de engranajes	PGP 620/511/511	Rotación 50 cm ³ / vuelta	Bomba de agua 19 cm ³ / vuelta	Compresor 12 cm ³ / vuelta

3.4.1.9 Sistema de aire – agua (watermist). Se encarga de limpiar el barreno durante la perforación, mediante la inyección de agua o aire a alta presión, reduciendo polvo, enfriando la broca y facilitando la evacuación de detritos para mejorar la seguridad y eficiencia del proceso.

Tabla 6.*Componentes principales sistema agua – aire (watermist)*

Componente	Características
Bomba de agua	Impulsada hidráulicamente. Presión de entrada: 3–6 bar, máx. 14 bar con válvula de seguridad.
Unidad de compresor	Compresor de pistón impulsado hidráulicamente, entra en funcionamiento al arrancar las bombas de perforación.
Enfriamiento del aceite hidráulico	A 50 °C el termostato abre paso de agua al enfriador, aumentando el flujo y reduciendo temperatura.
Filtro de aire de admisión	Filtro ciclón retiene partículas pesadas. Contenedor debe vaciarse regularmente al alcanzar nivel máximo.

3.4.1.10 Sistema eléctrico. Conjunto encargado de la generación, distribución y control de la energía eléctrica del equipo, alimentando motores, sistemas de iluminación, control y

automatización, garantizando la operación segura y continua de los sistemas de perforación e hidráulicos.

Tabla 7.

Características baja y extra – baja tensión

Componente	Características
Circuito de bajo voltaje (120V - 1000V)	Cable en la unidad de embobinado y colector Gabinete eléctrico Motor (es) eléctrico (s) para bomba (s) hidráulica (s) Circuitos en operación Salida de servicio Cargador de batería para el transportador (voltaje bajo) Luces indicadoras en el gabinete eléctrico
Circuito de extra-bajo voltaje (50V - 120V)	Circuitos en operación Monitores del sistema Cargador de batería para el transportador (voltaje extra - bajo) Iluminación Interruptor de nivel de aceite

3.5 Marco legal

El desarrollo de una estrategia de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para la flota de equipos de perforación tipo Jumbo Epiroc SID en el contexto minero y de obras civiles no solo responde a una necesidad técnica de garantizar la disponibilidad y seguridad de la maquinaria, sino también a un conjunto de normativas nacionales e internacionales que orientan su implementación de manera ética, segura y eficiente. Dicho marco legal constituye el soporte que asegura que la estrategia planteada esté alineada con los principios de la gestión de activos, la seguridad industrial y la sostenibilidad.

3.5.1 Normatividad nacional

Constitución Política de Colombia (1991): Reconoce el derecho a condiciones dignas y seguras de trabajo (Art. 25) y el derecho a un ambiente sano (Art. 79), pilares de cualquier estrategia de mantenimiento responsable en contextos mineros y de infraestructura.

Ley 9 de 1979 (Código Sanitario Nacional): Regula la higiene y seguridad en los lugares de trabajo, exigiendo condiciones que minimicen los riesgos derivados de la operación y mantenimiento de maquinaria pesada.

Ley 1562 de 2012 (Sistema General de Riesgos Laborales): Define las responsabilidades en seguridad y salud en el trabajo, estableciendo que los empleadores deben implementar prácticas de mantenimiento preventivo y correctivo que reduzcan el riesgo de accidentes.

Decreto 1072 de 2015 (Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo): Reglamenta el SG-SST e integra el mantenimiento como parte de la gestión de riesgos laborales en equipos de alto impacto como los jumbos de perforación.

Resolución 0312 de 2019: Fija los estándares mínimos del SG-SST, dentro de los cuales el mantenimiento confiable es un requisito esencial para el control de peligros asociados con equipos mecanizados en minería y construcción.

Código de Minas – Ley 685 de 2001: Establece la obligación de garantizar seguridad técnica y ambiental en las actividades mineras, lo cual implica la adecuada gestión de los equipos de perforación.

3.5.2 Normas internacionales

En el ámbito internacional, el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) se encuentra regulado por un conjunto de normas que garantizan su correcta aplicación. La SAE JA1011 establece los criterios mínimos que un proceso debe cumplir para ser considerado un RCM auténtico, evitando que metodologías no alineadas se presenten bajo este concepto (Society of Automotive Engineers [SAE], 1999). Posteriormente, la SAE JA1012 complementa dicha normativa al proporcionar una guía detallada sobre cómo aplicar el RCM paso a paso, desde el análisis funcional de los activos hasta la selección de tareas de mantenimiento apropiadas (SAE, 2011). De forma paralela, la IEC 60300-3-11 integra el RCM dentro de la gestión de la disponibilidad, ofreciendo directrices que permiten adaptar la metodología a sistemas industriales complejos, con el fin de incrementar la seguridad, la confiabilidad y la sostenibilidad operativa (International Electrotechnical Commission [IEC], 2009).

4. Aplicación de metodología RCM

La aplicación de la metodología RCM en el Jumbo Boomer S1D permite transformar el mantenimiento en un proceso estratégico que combina análisis técnico y gestión del riesgo, asegurando que cada intervención esté orientada a preservar las funciones críticas del equipo y optimizar los recursos de la organización. Más que una técnica, se convierte en una herramienta

que genera confiabilidad, seguridad y sostenibilidad, alineando el cuidado de la maquinaria con el bienestar humano y la continuidad de la operación.

4.1 Selección del elemento de estudio

Consiste en identificar, dentro de sus sistemas y componentes, aquel cuya función, criticidad y frecuencia de falla lo convierten en prioritario para el análisis, asegurando que el mantenimiento se enfoque en lo que más impacta la seguridad, la confiabilidad y la continuidad de la operación.

La selección de elementos de estudio parte de la identificación de los sistemas descritos en el manual técnico del equipo y se centra en aquellos cuya falla impacta de manera crítica la seguridad de los operadores, la continuidad de la operación y los costos de mantenimiento. (Campbell & Jardine, 2001; Smith & Hawkins, 2004).

4.1.1 Criterios de selección

Seguridad: Sistemas cuya falla representa riesgo directo para la vida del operador y personal vinculado con la operación.

Operación: Sistemas cuya indisponibilidad interrumpe la perforación y detiene el ciclo productivo.

Costos: Sistemas con alto costo de reparación o cuya falla genera pérdidas económicas por indisponibilidad.

Frecuencia de fallas históricas: Elementos con registros repetitivos en los historiales de mantenimiento.

Tabla 8.

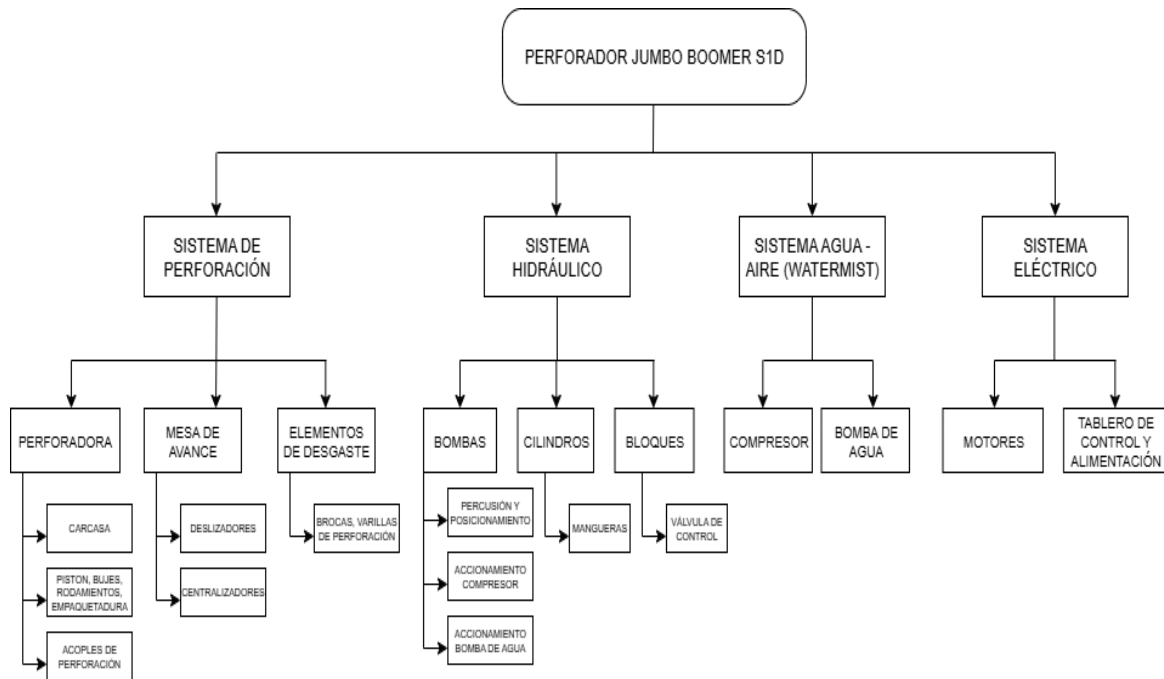
Selección de sistemas para elementos de estudio

Sistema	Descripción
Sistema de perforación	Función vital para el avance del túnel. Altamente expuesto a desgaste y condiciones severas. Impacta directamente la productividad y el cumplimiento de metas de perforación.
Sistema hidráulico	Es el corazón del equipo, acciona el brazo, el martillo y sistemas auxiliares. Una falla hidráulica detiene por completo la operación y representa riesgo de fugas o accidentes.
Sistema de aire-agua (watermist)	Fundamental para la seguridad al reducir polvo y calor durante la perforación. Incide directamente en la durabilidad de la broca y en la salud de los trabajadores.
Sistema eléctrico	Suministra energía a controles, iluminación y motores eléctricos auxiliares. Su falla genera riesgos de seguridad y limita la operación de subsistemas vitales.

4.2 Taxonomía

Figura 10.

Taxonomía jerárquica de principales sistemas de estudio



4.3 Interfaces, características, condiciones de operación y ambientales

Tabla 9.

Identificación de interfaces, características, condiciones de operación y ambientales

Sistema	Interfaces		Características técnicas	Condiciones operacionales	Condiciones ambientales
	Entrada	Salida			
Sistema de perforación	Energía hidráulica (flujo y presión), agua, aire, señal eléctrica de control.	Avance de broca (perforación), corte de roca, evacuación de detritos con	Perforadora (martillo hidráulico) de alta frecuencia, alimentador deslizante,	Operación continua en ciclos de perforación de 6 – 10 horas.	Alta presencia de polvo y agua.

Sistema	Interfaces		Características técnicas	Condiciones operacionales	Condiciones ambientales
	Entrada	Salida			
		mezcla agua-aire, vibraciones, calor residual.	rotación controlada. Presiones de trabajo entre 50 y 230 bares. Brocas y barras sometidas a desgaste muy abrasivo.	Requiere precisión de posicionamiento con el brazo.	Exposición a abrasión de la roca y variaciones de temperatura subterránea. Elevado nivel de ruido.
Sistema hidráulico	Energía mecánica de motor Diesel o eléctrico.	Presión y flujo hidráulico para el brazo, perforadora y sistemas auxiliares.	Bombas de percusión y posicionamiento, de accionamiento de compresor, y de accionamiento de bomba de agua, bloque de válvulas de control, filtros, acumuladores.	Trabajo continuo bajo cargas variables.	Riesgo de contaminación debido a fugas generadas a causa del desgaste por fricción o por rupturas inducidas por vibraciones en las mangueras.
Sistema aire-agua (watermist)	Agua desde el sistema de bombeo, aire comprimido del compresor.	Mezcla agua-aire hacia la broca, pasador por la perforadora y barra de perforación para refrigeración y supresión del polvo.	Compresor integrado, válvulas de regulación, líneas de distribución de aire comprimido.	Condiciones húmedas y presencia de polvo.	Contaminación de agua infiltrada con agua de contacto por sistema de control deficiente.
Sistema eléctrico	Energía eléctrica entre 380 – 1000 V desde grupo electrógeno	Alimentación de tableros, motores eléctricos,	Gabinete eléctrico con disyuntores y protecciones por variaciones de	Continuidad requerida para sostenimiento del voltaje	Alta humedad relativa y polvo conductor.

Sistema	Interfaces		Características técnicas	Condiciones operacionales	Condiciones ambientales
	Entrada	Salida			
	Diesel de 625 kVA, fuentes de poder de voltajes variables (entre 12 – 240 V), cables mineros.	controles, sistemas de seguridad.	voltaje y corriente. Motores eléctricos para bombas de percusión y posicionamiento, bomba de agua y compresor.	nominal de trabajo, control de perforación y seguridad del equipo. Sensible a fallas por humedad, polvo y vibraciones.	Riesgo de cortocircuito y corrosión de conectores.

4.4 Definiciones de funciones del elemento de estudio

Tabla 10.

Definición de funciones

Sistema	Función primaria	Funciones secundarias	Funciones de protección	Estándar de funcionamiento
Sistema de perforación	Realizar perforación de la roca de forma continua y eficiente para permitir los ciclos de avance del túnel.	Mantener alineación y precisión de la perforadora; facilitar evacuación del detrito; reducir vibraciones.	Válvulas de alivio; sistemas de seguridad en controles.	Índice de penetración $\geq 90\%$ del nominal; perforar en tiempo estimado sin desviación.
Sistema hidráulico	Suministrar presión y flujo para accionar brazo, martillo y sistemas auxiliares.	Lubricar y enfriar componentes; mantener estabilidad de presión; filtrado de fluido.	Válvulas de seguridad contra sobrepresión; filtros y alarmas de contaminación y temperatura.	Presión dentro de 10–250 bar; sin fugas visibles; temperatura ≤ 60 °C.

Sistema	Función primaria	Funciones secundarias	Funciones de protección	Estándar de funcionamiento
Sistema aire-agua (watermist)	Proveer mezcla aire-agua a la broca para refrigeración y supresión de polvo.	Asegurar limpieza del barreno; reducir desgaste de la herramienta de corte.	Válvulas de retención y control de caudal para evitar sobrepresiones.	Caudal ≥ 15 l/min, ≤ 100 l/min y presión ≥ 3 bar a la entrada del sistema.
Sistema eléctrico	Suministrar y distribuir energía eléctrica al equipo y sus subsistemas de perforación, control y auxiliares.	Alimentar sistemas de iluminación y señalización; proveer energía de respaldo mediante baterías.	Disyuntores y protecciones contra sobrecarga y cortocircuitos; relés de control de fases.	Tensión dentro del $\pm 10\%$ nominal; continuidad de suministro; protecciones activas.

4.5 Fallas funcionales

En el marco de la metodología de RCM, la falla funcional se entiende como el *estado en el cual un activo físico o un sistema es incapaz de realizar una función específica con un nivel de desempeño deseable* (SAE JA1011, 1999).

Indicando que, no necesariamente implica que el equipo esté detenido, puede estar operando de manera parcial, intermitente o en condiciones inseguras.

4.5.1 Tipologías

La identificación de fallas funcionales constituye un paso esencial dentro de la metodología RCM, ya que permite establecer de qué manera los sistemas y componentes dejan de cumplir sus funciones en el contexto operacional. De acuerdo con la literatura especializada y las

características técnicas del Jumbo Boomer SID, las fallas funcionales se clasifican en los siguientes tipos:

Falla total: Se presenta cuando el sistema o componente pierde en su totalidad la capacidad de ejecutar la función para la cual fue diseñado. En este escenario, el elemento queda inoperante y la continuidad del proceso productivo se interrumpe de manera inmediata. (Smith & Hawkins, 2019).

Falla parcial: Corresponde a la condición en la cual el sistema sigue desempeñando su función, pero con un rendimiento reducido, ineficiente o fuera de los parámetros de diseño. La falla se manifiesta en disminución de capacidad, pérdida de precisión o incremento en el tiempo de ejecución de la tarea. (Smith & Hawkins, 2019).

Falla intermitente: Se refiere a aquellas fallas que aparecen y desaparecen de forma no predecible, afectando la confiabilidad del sistema. Aunque el componente puede funcionar correctamente en determinados momentos, la recurrencia de interrupciones genera impactos negativos en la operación y dificulta la detección de la causa raíz. (Smith & Hawkins, 2019).

Falla de seguridad: Ocurre cuando un sistema deja de garantizar las condiciones seguras de operación, representando riesgo directo para la vida e integridad de los trabajadores, así como para el entorno. Estas fallas, independientemente de su impacto en la operación, son críticas porque incrementan la probabilidad de incidentes y accidentes laborales. (Smith & Hawkins, 2019).

Falla de protección: Se manifiesta cuando los elementos de protección o dispositivos de seguridad no actúan conforme a su función de prevenir daños mayores al equipo, al sistema o al personal, aun cuando el sistema principal se encuentre operando. Este tipo de falla es especialmente relevante, dado que aumenta la vulnerabilidad frente a eventos catastróficos. (Smith & Hawkins, 2019).

La clasificación de las fallas funcionales permite estructurar el análisis de confiabilidad bajo criterios técnicos y de seguridad, facilitando la posterior identificación de modos de falla y sus consecuencias. Esta tipología constituye un insumo clave para priorizar acciones de mantenimiento y definir estrategias orientadas a la disponibilidad, seguridad y costo-efectividad del equipo.

4.5.2 Categorías

La clasificación de las fallas funcionales no solo depende de la forma en que un sistema deja de cumplir con su función, sino también del impacto que estas generan en la operación, la seguridad y la confiabilidad del equipo. En este sentido, se definen las siguientes categorías de fallas funcionales:

Funcional: Comprende aquellas fallas que afectan directamente la capacidad intrínseca del sistema o componente para desempeñar su función de diseño. Aunque en algunos casos el equipo puede seguir operando, lo hace con un rendimiento reducido o fuera de los parámetros establecidos, lo cual compromete la eficiencia del proceso y acelera el desgaste de componentes críticos. (Moubray, J. (1997).

De operación: Incluye las fallas que repercuten directamente en la disponibilidad del equipo y en la continuidad del proceso productivo. Este tipo de fallas genera paradas no programadas, interrupciones en la perforación y pérdidas de productividad que impactan de manera significativa el cumplimiento de los objetivos de avance de túnel. (Moubray, J. (1997).

De seguridad: Agrupa las fallas cuya consecuencia principal es la generación de riesgos para la integridad de los operadores, el personal de apoyo, el equipo y el entorno de trabajo.

Aunque en algunos casos no se traduzcan de inmediato en indisponibilidad operativa, su criticidad radica en la probabilidad de ocasionar incidentes o accidentes graves. (Moubray, J. (1997).

Categorías de fallas funcionales permite jerarquizar los riesgos y orientar el análisis hacia las consecuencias más relevantes en términos de confiabilidad, seguridad y costos. Esta clasificación es fundamental para el desarrollo del análisis de modos y efectos de falla (FMEA) dentro de la metodología RCM.

4.5.3 Reglas para establecer fallas funcionales

La definición de fallas funcionales debe responder a un proceso metodológico que asegure claridad, coherencia y aplicabilidad en el contexto operativo del equipo.

En el marco del análisis centrado en confiabilidad (RCM), las fallas funcionales no se formulan de manera arbitraria, sino siguiendo un conjunto de reglas que garantizan su pertinencia y alineación con los objetivos de seguridad, confiabilidad y disponibilidad.

Relación directa con la función del sistema: La falla funcional debe formularse como la incapacidad del sistema o componente para cumplir, de manera total, parcial o intermitente, con la función definida en el contexto operacional. En este sentido, las fallas no se describen como modos de falla ni como causas técnicas, sino como la pérdida de una función específica.

Redacción en términos de desempeño medible: Las fallas funcionales deben expresarse en términos de desviaciones respecto al estándar de funcionamiento definido por el fabricante o la operación. Esto implica incluir parámetros observables como presión, caudal, velocidad, temperatura o alineación, de modo que la condición de falla pueda ser objetivamente identificada.

Enfoque en consecuencias relevantes: La definición debe considerar únicamente aquellas fallas que tienen un impacto significativo en la seguridad, la operación o los costos. Se evita, por tanto, describir como fallas funcionales aquellas desviaciones menores o que no representan riesgo ni indisponibilidad.

Independencia respecto al modo de falla: La falla funcional describe el *qué* (lo que el sistema deja de hacer), pero no el *cómo* ni el *por qué*. El análisis posterior de modos de falla será el encargado de identificar las causas técnicas específicas (desgaste, fuga, cortocircuito, etc.).

Claridad y especificidad: Las fallas funcionales deben redactarse de manera clara, evitando ambigüedades. Cada enunciado debe corresponder a una única pérdida de función, evitando generalizaciones excesivas que dificulten el análisis posterior.

Las reglas para establecer fallas funcionales aseguran que el análisis sea estructurado y efectivo, proporcionando una base sólida para la identificación de modos de falla y la evaluación de sus consecuencias. Este paso metodológico garantiza que los esfuerzos de mantenimiento se orienten a lo que realmente afecta la confiabilidad, la seguridad y la eficiencia del equipo.

4.5.4 Fallas funcionales de los sistemas seleccionados

Las fallas funcionales de los sistemas de perforación, hidráulico, aire-agua y eléctrico del perforador se presentan de forma estructurada en tablas, clasificadas según su tipología y su categoría de impacto. Esta organización permite establecer con precisión las condiciones bajo las cuales los sistemas dejan de cumplir sus funciones, evidenciando las consecuencias más críticas para la seguridad, la confiabilidad y la disponibilidad operativa. El análisis constituye un insumo fundamental para la posterior identificación de modos de falla y efectos (FMEA), asegurando que

las estrategias de mantenimiento se orienten hacia los elementos de mayor impacto en la continuidad y seguridad de la operación. (Moubray, J. (1997).

Tabla 11.

Fallas funcionales sistema de perforación

Función	Tipo de falla funcional	Categoría	Descripción
Perforar macizo rocoso para continuar proceso de voladura con explosivos.	Total	Funcional	El sistema no realiza perforación (perforadora no acciona o broca no avanza).
Perforar macizo rocoso para continuar proceso de voladura con explosivos.	Intermitente	Operación	La perforadora funciona de forma errática, alternando entre golpes y detenciones.
Perforar macizo rocoso para continuar proceso de voladura con explosivos.	Seguridad	Seguridad	La perforadora opera con vibraciones o ruido excesivo que ponen en riesgo al operador.
Perforar macizo rocoso a profundidades entre 3 y 12 m en cada perforación.	Parcial	Operación	La perforación se realiza, pero con profundidades menores a 3 m y por encima de los 12 m.
Perforar macizo rocoso con un rendimiento de 900 m por broca	Parcial	Operación	Perfora con un rendimiento, por broca, menor a los 900 m.
Instalar pernos entre 3 m y 12 m para preparar el terreno que se debe estabilizar.	Total	Funcional	No instala pernos.
Mantener alineación y precisión	Parcial	Operación	Perforación fuera de alineación (desviación del barreno).
Realizar perforación en tiempo estándar	Parcial	Operación	Tiempo de perforación mayor al estándar.
Operar sin vibraciones excesivas	Seguridad	Seguridad	Vibraciones excesivas que ponen en riesgo al operador.
Rotación controlada de broca	Parcial	Operación	Rotación insuficiente o inexistente de la broca.

Función	Tipo de falla funcional	Categoría	Descripción
Evacuar detrito del barreno	Parcial	Operación	Bloqueo de broca, no evacúa detrito.
Accionar perforadora con golpes constantes	Intermitente	Operación	Golpes intermitentes de la perforadora
Mantener temperatura de operación adecuada	Parcial	Operación	Sobrecalentamiento de la perforadora.

Tabla 12.*Fallas funcionales en sistema hidráulico*

Función	Tipo de falla funcional	Categoría	Descripción
Suministrar presión y caudal hidráulico para accionar brazo, perforadora y sistemas auxiliares	Total	Funcional	El sistema no suministra presión ni caudal (brazo y martillo inoperativos).
Suministrar presión y caudal hidráulico para accionar brazo, perforadora y sistemas auxiliares	Parcial	Operación	La presión es insuficiente (<230 bar) o presenta caídas intermitentes.
Suministrar presión y caudal hidráulico para accionar brazo, perforadora y sistemas auxiliares	Intermitente	Operación	La bomba hidráulica entrega caudal o irregular, afectando la continuidad de la perforación.
Contener herméticamente el aceite hidráulico	Total	Funcional	No contiene herméticamente el aceite hidráulico para el avance de la mesa de perforación.
Mantener temperatura adecuada del fluido	Parcial	Operación	Sobrecalentamiento del aceite (>60 °C).
Mantener fluido limpio	Parcial	Operación	Contaminación interna del fluido.
Amortiguar variaciones de presión	Parcial	Operación	Acumulador sin capacidad de amortiguación.
Accionar actuadores con eficiencia	Parcial	Operación	Brazo lento o trabado por pérdida de eficiencia.

Función	Tipo de falla funcional	Categoría	Descripción
Proteger contra sobrepresión	Protección	Operación	Válvulas de seguridad no actúan sobrepresión.
Mantener estanqueidad	Seguridad	Seguridad	Fugas externas de aceite.

Tabla 13.

Fallas funcionales sistema agua-aire (watermist)

Función	Tipo de falla funcional	Categoría	Descripción
Proveer mezcla aire-agua a la broca	Total	Funcional	El sistema no suministra mezcla aire-agua a la broca.
Proveer mezcla aire-agua a la broca	Parcial	Operación	Suministro insuficiente (<15 l/min o <3 bar), reduciendo la eficacia del barrenado.
Proveer mezcla aire-agua a la broca	Intermitente	Operación	El suministro de agua-aire es irregular (fluctuaciones en refrigeración).
Refrigerar broca	Parcial	Operación	Ausencia de agua, sobrecalentamiento de broca.
Mantener relación correcta aire-agua	Parcial	Operación	Relación aire-agua incorrecta.
Mantener líneas y boquillas libres	Parcial	Operación	Boquillas bloqueadas.
Mantener estanqueidad en ductos	Parcial	Operación	Fugas en conexiones o ductos.
Operar válvulas de retención	Protección	Seguridad	Válvulas de retención no operan.
Controlar exposición a polvo	Seguridad	Seguridad	No controla polvo, riesgo respiratorio.

Tabla 14.*Fallas funcionales sistema eléctrico*

Función		Tipo de falla funcional	Categoría	Descripción
Suministrar continua	energía	Total	Funcional	No suministra energía al equipo.
Suministrar continua	energía	Intermitente	Operación	Caídas de tensión intermitentes.
Suministrar continua	energía	Intermitente	Operación	Fallos eléctricos esporádicos.
Suministrar tensión nominal estable		Parcial	Operación	Tensión fuera de $\pm 10\%$ del nominal.
Suministrar corriente estable		Parcial	Operación	Corriente fuera de los parámetros
Alimentar tableros y controles		Parcial	Operación	Tablero sin respuesta en controles.
Arrancar motores auxiliares		Parcial	Operación	Motores auxiliares no arrancan.
Mantener temperatura adecuada en cables		Parcial	Operación	Sobrecalentamiento de cables o conectores.
Mantener continuidad sin cortocircuito		Seguridad	Seguridad	Cortocircuito en tablero.
Proteger con disyuntores y relés		Protección	Seguridad	Disyuntores o relés no actúan.
Mantener balance de fases		Parcial	Operación	Desbalance de fases.

4.6 Modos de falla

La identificación de los modos de falla permite precisar *cómo* se materializan las fallas funcionales previamente definidas. Mientras que la falla funcional describe la pérdida de la función, el modo de falla especifica el mecanismo o condición particular que origina dicha pérdida.

4.6.1 Definición

Un modo de falla se entiende como la forma específica en que un sistema, subsistema o componente deja de cumplir su función, originando la pérdida total, parcial o intermitente de su desempeño. (Moubray, J. (1997). Dicho modo describe el fenómeno observable o la condición técnica que conduce a la falla funcional, sin entrar aún en el análisis de consecuencias. Otras definiciones de naturaleza normativa serían:

Un modo de falla es *la manera específica en que una falla funcional ocurre* (SAE JA1011, 1999).

Un modo de falla es *cualquier evento que pueda causar que un activo falle en cumplir una función requerida* (SAE JA1012, 2002).

La norma aclara que el modo de falla debe describirse en el nivel en que pueda gestionarse con tareas de mantenimiento específicas, evitando definiciones demasiado generales o detalladas.

4.6.2 Reglas para la redacción de modos de falla

La formulación de los modos de falla debe responder a criterios metodológicos rigurosos que aseguren uniformidad, trazabilidad y pertinencia dentro del análisis del RCM. Dado que el modo de falla constituye el vínculo directo entre la falla funcional y sus causas potenciales, su redacción debe garantizar la correcta identificación y posterior evaluación de consecuencias. Para ello, se establecen las siguientes reglas:

Especificidad: El modo de falla debe describirse de manera concreta y diferenciada, identificando la manifestación física o funcional del deterioro. Esto permite distinguirlo de otros modos similares y facilita la asociación con prácticas de mantenimiento específicas.

Neutralidad respecto a la causa raíz: En esta etapa, el modo de falla se limita a describir la forma observable en que el componente deja de cumplir su función. No corresponde aún atribuir el origen último del fenómeno, el cual será abordado en fases posteriores de análisis causal.

Consistencia con la falla funcional: Cada modo de falla debe estar vinculado a una falla funcional previamente definida, de manera que exista coherencia jerárquica en el análisis. Esta correspondencia asegura que la descripción responda al *qué* falla y al *cómo* falla, sin generar ambigüedad respecto al objeto de estudio.

Claridad y objetividad terminológica: la redacción debe emplear terminología técnica precisa, evitando expresiones ambiguas o generalizaciones. El lenguaje debe ser comprensible para los equipos de operación y mantenimiento, y suficientemente objetivo para su aplicación en procesos de diagnóstico, registro y mejora continua.

La adecuada formulación de los modos de falla no solo proporciona coherencia al análisis RCM, sino que también constituye un insumo crítico para la evaluación de riesgos y la selección de estrategias de mantenimiento orientadas a la seguridad, la confiabilidad y la optimización de costos operativos.

4.6.3 Causas ajenas al equipo

Si bien los modos de falla se relacionan directamente con la pérdida de la función de un componente o sistema, es necesario reconocer que en numerosos casos su origen no se encuentra

en el diseño intrínseco del equipo, sino en factores externos que condicionan su desempeño y aceleran los mecanismos de deterioro. Dichas causas ajenas al equipo representan un aspecto crítico del análisis, dado que su identificación permite anticipar y mitigar riesgos que no son evidentes desde la perspectiva estrictamente técnica del sistema. Entre las más relevantes se encuentran:

Condiciones ambientales adversas: La presencia de polvo, humedad, vibraciones, variaciones extremas de temperatura o atmósferas químicamente agresivas constituye un factor que acelera el desgaste y disminuye la vida útil de los componentes.

Factores operativos: Prácticas inadecuadas de operación, tales como la sobrecarga de trabajo, el uso del equipo fuera de los parámetros especificados por el fabricante o errores humanos en la manipulación, generan modos de falla recurrentes y de difícil detección temprana.

Deficiencias en el mantenimiento: Omisiones en la lubricación, intervalos inadecuados de inspección o la utilización de repuestos no originales incrementan la probabilidad de ocurrencia de fallas.

Calidad de insumos y servicios: la utilización de combustibles, aceites, agua de perforación o energía eléctrica fuera de norma constituye una fuente frecuente de degradación prematura y fallas inesperadas.

El reconocimiento de estas causas externas resulta indispensable, ya que complementa el análisis de confiabilidad y orienta el diseño de planes de mantenimiento que incluyan medidas preventivas y correctivas tanto a nivel técnico como organizacional.

4.6.4 Claves para la identificación de modos de falla

La identificación rigurosa de los modos de falla requiere la integración de múltiples fuentes de información y la aplicación de criterios técnicos sistemáticos. Este proceso constituye un puente metodológico entre las fallas funcionales y el análisis de consecuencias, por lo cual su precisión es determinante para la eficacia del mantenimiento centrado en confiabilidad. Algunas claves fundamentales son:

Historial de mantenimiento: El análisis de registros históricos permite identificar modos de falla recurrentes, patrones de degradación y componentes con mayor frecuencia de intervención.

Documentación técnica del fabricante: Los manuales de operación, servicio u mantenimiento, además de catálogos de repuestos constituyen referencias primarias para la detección de modos de falla documentados y validados por la experiencia de diseño.

Inspecciones en campo: La observación directa del comportamiento de los sistemas bajo condiciones reales de operación proporciona información empírica indispensable para detectar modos de falla no previstos en la documentación técnica.

Experiencia del personal especializado: El conocimiento acumulado por operadores y técnicos de mantenimiento resulta un insumo estratégico, dado que permite identificar modos de falla asociados a particularidades del entorno operativo.

La identificación de modos de falla debe concebirse como un proceso integral que combina evidencia documental, experiencia práctica y tecnologías de monitoreo. Solo de esta manera es posible construir una base de análisis sólida que garantice la confiabilidad, seguridad y eficiencia operativa del equipo.

4.6.5 Modos de falla de sistemas seleccionados

Una vez definidas las fallas funcionales, el siguiente paso metodológico corresponde a la identificación de los modos de falla que las originan. Estos constituyen la descripción técnica específica de la forma en que los componentes o sistemas pierden su capacidad de cumplir con las funciones asignadas.

En este contexto, los modos de falla de los sistemas del Jumbo Boomer S1D fueron determinados a partir de:

Análisis de documentación técnica del fabricante (manuales de operación y servicio).

Registros históricos de mantenimiento correctivo y preventivo.

Experiencia reportada por técnicos y operadores en condiciones reales de operación.

La aplicación de criterios derivados de reglas metodológicas del RCM.

Los modos de falla se presentan de manera estructurada en tablas, vinculados a las fallas funcionales previamente identificadas y clasificados según el sistema correspondiente. Esta organización permite establecer la trazabilidad entre la pérdida de función y la manifestación técnica del deterioro, lo que constituye la base para el análisis de consecuencias y la definición de tareas de mantenimiento adecuadas.

Tabla 15.

Modos de falla asociados al sistema de perforación

Falla funcional	Modos de falla asociados
El sistema no realiza perforación (perforadora no acciona o broca no avanza).	Atasco del martillo hidráulico por partículas o lubricación deficiente / Fuga interna de aceite en martillo por desgaste de sellos

Falla funcional	Modos de falla asociados
La perforadora funciona de forma errática, alternando entre golpes y detenciones.	Golpes intermitentes por desgaste en válvulas del martillo / Bloqueo parcial del deslizador
La perforadora opera con vibraciones o ruido excesivo que ponen en riesgo al operador.	Desbalance del martillo / Falla en sujeción de la broca
La perforación se realiza fuera del rango esperado.	Pérdida de energía de impacto por desgaste de sellos / Fractura parcial de broca
Perfora con rendimiento inferior al estándar.	Desgaste prematuro de broca / Obstrucción en circulación de agua
No instala pernos.	Falla del sistema de avance del martillo / Rotura de elementos de anclaje
Perforación fuera de alineación (desviación del barreno).	Bloqueo o desgaste del deslizador / Juego excesivo en guías
Tiempo mayor al estándar.	Pérdida progresiva de presión hidráulica / Broca desafilada
Vibraciones que ponen en riesgo al operador.	Desbalance del martillo / Rotura parcial de barra
Rotación insuficiente o inexistente.	Falla en motor de rotación hidráulico / Obstrucción en transmisión de par
Bloqueo de broca, no evacúa detrito.	Obstrucción de líneas de agua / Falla en mezcla aire-agua
Golpes intermitentes de la perforadora.	Cavitación en martillo / Pérdida de presión hidráulica
Sobrecalentamiento de la perforadora.	Deficiencia en refrigeración de agua / Sobrepresión en martillo

Tabla 16.*Modos de falla asociados al sistema hidráulico*

Falla funcional	Modos de falla asociados
El sistema no suministra presión ni caudal (brazo y martillo inoperativos).	Rotura de eje de bomba hidráulica / Desacople mecánico de la bomba / Válvula principal de alivio trabada abierta o mal calibrada / Rotura de eje o engranes en multiplicador / Obstrucción total de succión (colapso de manguera/cedazo) / Aireación severa / Paro del motor impulsor (eléctrico/diésel).
Presión insuficiente (<230 bar) o caídas intermitentes.	Desgaste de elementos de la bomba (placa, pistones, engranes) / Fugas internas en bomba, cilindros, motor hidráulico / Válvula de

Falla funcional	Modos de falla asociados
Bomba entrega caudal irregular; afecta continuidad.	alivio mal ajustada / Filtro parcialmente obstruido / Colapso de manguera de succión / Baja viscosidad o temperatura alta del fluido. Cavitación por succión restringida o nivel bajo de aceite / Entrada de aire por sellos en succión / Válvulas direccionales contaminadas / Fallas intermitentes en el control de bomba de desplazamiento variable / Filtro con válvula bypass intermitente.
No contiene herméticamente el aceite para el avance de la mesa.	Fisura en tanque, junta o tapa deformada / Sellos estáticos u orings dañados / Mangueras reventadas / Racores flojos o fisurados / Sello de eje de bomba o motor roto.
Sobrecalentamiento del aceite (>60 °C).	Intercambiador de calor obstruido (suciedad/incrustación) / Ventilador o bomba de refrigeración inoperante / Válvula termostática trabada / Exceso de fugas internas que elevan pérdidas / Nivel de aceite bajo / Viscosidad inadecuada.
Contaminación interna del fluido.	Filtro saturado o bypass abierto, filtro incorrecto / Respiradero breather sin filtración / Ingreso de partículas por mantenimiento / Corrosión interna / Sellos degradados generando partículas / Agua en aceite por condensación, fugas de enfriador.
Acumulador sin capacidad de amortiguación.	Acumulador con precarga baja / Rotura de diafragma / Válvula de aislamiento cerrada / Conexiones obstruidas / Fuga en asiento del acumulador.
Brazo lento o trabado por pérdida de eficiencia.	Válvulas direccionales o proporcionales obstruidas / Spool desgastado / Fugas internas en cilindros (sellos de pistón) / Mangueras colapsadas / Bomba hidráulica con desgaste / Restricción en retorno.
Válvulas de seguridad no actúan.	Válvula de alivio trabada cerrada / Resorte roto o calibración incorrecta / Bloqueo en línea de alivio / Válvula de cartucho contaminada que no se asienta.
Fugas externas de aceite.	Sellos en bridas o racores dañados / Mangueras agrietadas / Fisura en cuerpo de válvula / Sello de eje de bomba-motor con fuga / Apriete insuficiente / Sobrepresión puntual que abre conexiones.

Tabla 17.*Modos de falla asociados al sistema aire-agua (watermist)*

Falla funcional	Modos de falla asociados
El sistema no suministra mezcla aire-agua a la broca.	Obstrucción total en línea principal / Válvula de control cerrada o trabada / Rotura de manguera principal / Falla en bomba de agua o compresor de aire / Tanque sin suministro.
Flujo insuficiente (<15 l/min o <3 bar), reduciendo la eficacia del barreno.	Filtro obstruido / Acumulación de incrustaciones en ductos / Desgaste en válvula de control / Pérdida de presión en compresor / Fugas menores en conexiones.
Suministro irregular de refrigeración).	Baja presión intermitente en compresor / Válvula neumática defectuosa / Entradas de aire falso en líneas de agua / Incrustaciones desprendidas que bloquean momentáneamente / Mal funcionamiento del regulador de presión.
Ausencia parcial de agua, sobrecalentamiento de broca.	Obstrucción parcial de boquillas de agua / Bomba de agua con caudal insuficiente / Filtro en línea de agua obstruido / Válvula reguladora defectuosa.
Relación aire-agua incorrecta.	Desajuste en válvula mezcladora / Defecto en regulador de caudal / Bloqueo parcial en línea de aire o agua / Sensor de mezcla descalibrado.
Boquillas bloqueadas.	Obstrucción por sedimentos minerales / Incrustaciones calcáreas / Partículas sólidas transportadas en agua / Oxidación interna de ductos / Boquilla dañada o deformada.
Fugas en conexiones o ductos.	Sellos de juntas deteriorados / Mangueras agrietadas / Afloje de racores / Fisuras en tuberías metálicas por fatiga o corrosión.
Válvulas de retención no operan.	Obstrucción interna por sedimentos / Resorte de válvula roto o fatigado / Válvula trabada por corrosión / Montaje defectuoso.
No controla polvo, riesgo respiratorio.	Insuficiencia en el caudal de agua para supresión / Fugas en sistema de nebulización / Válvula de regulación de polvo inoperante / Boquillas de supresión obstruidas / Compresor de aire defectuoso.

Tabla 18.*Modos de falla asociados al sistema eléctrico*

Falla funcional	Modos de falla asociados
No suministra energía al equipo.	Interrupción en la red de alimentación / Cables principales cortados o quemados / Fusibles abiertos / Fallo total en generador o transformador / Conexiones flojas en barra principal.
Caídas de tensión intermitentes.	Mal contacto en bornes o conectores / Sulfatación en terminales / Falla de contactores desgastados / Cables con daño por vibración.
Fallos eléctricos esporádicos.	Cortos parciales en aislamiento deteriorado / Falla intermitente en interruptores / Relés defectuosos / Fluctuaciones en red externa (grupo electrógeno).
Tensión fuera de $\pm 10\%$ del nominal.	Desbalance en fases / Falla en regulador de tensión / Sobrecarga en el sistema / Alimentación deficiente del transformador.
Corriente fuera de parámetros.	Cables sobrecalentados por sobrecarga / Mala conexión en bornes / Falla en dispositivos de protección mal calibrados / Derivaciones a tierra.
Tablero sin respuesta en controles.	Fusible fundido en tablero / Corte en alimentación secundaria / Cables de control dañados / Fuente de alimentación defectuosa.
Motores auxiliares no arrancan.	Falla en contactores de arranque / Bobinado de motor en cortocircuito o abierto / Protección térmica activada / Conexiones flojas en la caja de bornes.
Sobrecalentamiento de cables o conectores.	Sobrecarga prolongada / Cables de sección inadecuada / Aislamiento envejecido / Conexiones flojas.
Cortocircuito en tablero.	Aislamiento dañado / Conductor en contacto con chasis / Entrada de humedad en gabinetes / Objetos metálicos sueltos dentro del tablero.
Disyuntores o relés no actúan.	Disyuntor trabado mecánicamente / Curva de disparo mal calibrada / Relé de protección averiado / Conexiones sulfatadas en disparadores.
Desbalance de fases.	Carga desigual en las fases / Falla en un contactor de fase / Rotura de un fusible en una de las fases / Conexiones defectuosas en barra trifásica.

4.7 Análisis de efectos y consecuencias

El análisis de efectos y consecuencias constituye una etapa fundamental dentro de la metodología del RCM, en la cual se evalúa el impacto derivado de las fallas funcionales y de los modos de falla previamente identificados. (Ortiz, 2024). Su propósito es determinar la magnitud del riesgo asociado a cada evento de falla y establecer las bases para la selección de estrategias de mantenimiento adecuadas, priorizando la seguridad, la continuidad operacional y la sostenibilidad de la organización.

En este sentido, el efecto de la falla se entiende como la manifestación técnica inmediata que presenta el sistema o componente al ocurrir un modo de falla, mientras que la consecuencia de la falla corresponde al impacto de dicho efecto en dimensiones más amplias, como la seguridad de las personas, la preservación del medio ambiente, la continuidad operacional, los costos económicos y la imagen corporativa.

4.7.1 Uso de los términos

Efecto de la falla: Se refiere a la respuesta observable en el sistema al materializarse el modo de falla; sucede al interior del equipo o elemento de análisis. (Ortiz, 2024).

Se manifiestan en el ámbito técnico y son percibidos directamente en el sistema o subsistema. Generalmente son cuantificables y verificables a través de indicadores operativos (presión, caudal, temperatura, tensión eléctrica).

Consecuencia de la falla: Es el impacto posterior que dicha condición genera sobre la seguridad de los trabajadores, la protección del medio ambiente, eficiencia operativa, los costos

asociados a la falla y la imagen corporativa. (Ortiz, 2024). Representan la trascendencia del efecto más allá del equipo.

4.7.2 Categorías de consecuencias

4.7.2.1 Visibilidad de la falla

Falla visible: Es detectada de inmediato por el operador, el sistema de control o los indicadores del equipo.

Falla oculta: No es perceptible en condiciones normales de operación y solo se hace evidente ante la demanda de la función protegida.

4.7.2.2 Consecuencias en seguridad. Corresponden a los efectos que ponen en riesgo la integridad física, la salud o la vida de los trabajadores y operadores.

4.7.2.3 Consecuencias en el medio ambiente. Comprenden los efectos negativos sobre el entorno natural, derivados de derrames, emisiones o descargas no controladas.

4.7.2.4 Consecuencias operacionales. Relacionadas con el impacto en la continuidad de la operación y en la eficiencia del proyecto. Pueden clasificarse en:

Económicas: Pérdidas de producción, incremento de costos de reparación, lucro cesante.

Servicio y clientes: Incumplimiento de hitos contractuales o retrasos en entrega de obras.

Disponibilidad: Reducción de la capacidad operativa por indisponibilidad del equipo.

4.7.2.5 Consecuencias en la imagen corporativa. Se asocian a la percepción de la empresa por parte de los clientes, entres de control, comunidades y otros grupos de interés.

4.7.2.6 Consecuencias en otras categorías.

Legales y regulatorias: Multas o sanciones por incumplimiento normativo.

Sociales: Pérdida de confianza de los trabajadores o comunidades aledañas de influencia en el proyecto.

Técnicas: Deterioro progresivo de otros subsistemas como resultado de fallas en cascada.

Tabla 19.

Efectos y consecuencias en el sistema de perforación.

Modo de falla asociado	Efecto	Consecuencia
Atasco del martillo hidráulico / Fuga interna de aceite en martillo	Pérdida total de la capacidad de perforación.	<p>Visible: operador detecta que no avanza.</p> <p>Operacionales: Detención total del ciclo de avance, retrasos en la producción.</p> <p>Económicas: Costos por tiempo muerto y reparación.</p> <p>Seguridad: Riesgo por manipulación para desbloquear equipo.</p>
Golpes intermitentes por desgaste en válvulas / Bloqueo parcial del deslizador	Golpeteo irregular, pérdida de eficiencia en penetración.	<p>Visible: Operador percibe vibraciones y pausas.</p> <p>Operacionales: Menor rendimiento, perforación irregular.</p> <p>Económicas: Aumento de tiempo de ciclo y desgaste de broca.</p> <p>Imagen: Percepción de baja confiabilidad.</p>
Desbalance del martillo / Falla en sujeción de la broca	Vibraciones excesivas, ruidos fuera de norma.	<p>Seguridad: Riesgo ergonómico y de accidente.</p> <p>Operacionales: Pérdida de control de perforación.</p>

Modo de falla asociado	Efecto	Consecuencia
Pérdida de energía de impacto / Fractura parcial de broca	Perforación con profundidad inferior o superior a lo requerido.	<p>Imagen: Incumplimiento de estándares de seguridad industrial.</p> <p>Operacionales: Necesidad de reprocesar barrenado.</p> <p>Económicas: Consumo adicional de brocas y energía.</p> <p>Imagen: Retrasos en cronogramas de obra.</p>
Desgaste prematuro de broca / Obstrucción de circulación de agua	Baja velocidad de penetración, desgaste acelerado.	<p>Operacionales: Reducción de productividad.</p> <p>Económicas: Aumento en recambio de brocas y repuestos.</p> <p>Seguridad: Fatiga del operador por tiempos prolongados.</p>
Falla en sistema de avance del martillo / Rotura de elementos de anclaje	Imposibilidad de realizar sostenimiento.	<p>Seguridad: Riesgo de desprendimiento de rocas.</p> <p>Operacionales: Interrupción del ciclo de excavación.</p> <p>Imagen: Incumplimiento en estándares de seguridad minera.</p>
Bloqueo o desgaste del deslizador / Juego excesivo en guías	Desviación angular del barrenado.	<p>Operacionales: Pérdida de precisión.</p> <p>Económicas: Reprocesos y costos adicionales en perforación.</p> <p>Imagen: Pérdida de confianza en calidad del trabajo.</p>
Pérdida progresiva de presión hidráulica / Broca desafila	Reducción de velocidad de perforación.	<p>Operacionales: Bajo rendimiento global.</p> <p>Económicas: Costos de operación elevados.</p> <p>Imagen: Incumplimiento de tiempos de obra.</p>
Desbalance del martillo / Rotura parcial de barra	Incremento en vibraciones y riesgo de accidente.	<p>Seguridad: Daño físico al operador (trauma, fatiga).</p> <p>Operacionales: Fallas repetitivas.</p> <p>Imagen: Incumplimiento de normas de seguridad.</p>
Falla en motor de rotación hidráulico / Obstrucción en transmisión de par	Broca no rota o rota con dificultad.	<p>Operacionales: Imposibilidad de perforar correctamente.</p> <p>Económicas: Desgaste prematuro de brocas.</p> <p>Seguridad: Riesgo de fractura de broca y proyección de fragmentos.</p>
Obstrucción de líneas de agua / Falla en mezcla aire-agua	Broca obstruida, sin evacuación de material.	<p>Operacionales: Detención del ciclo.</p> <p>Económicas: Necesidad de reemplazo de broca.</p> <p>Seguridad: Riesgo de sobrepresión en martillo.</p>

Modo de falla asociado	Efecto	Consecuencia
Cavitación en martillo / Pérdida de presión hidráulica	Golpes descontinuos, pérdida de eficiencia.	Operacionales: Baja productividad. Económicas: Fallas repetitivas incrementan mantenimiento. Seguridad: Riesgo de rotura de componentes bajo carga.
Deficiencia en refrigeración de agua / Sobrepresión en martillo	Temperatura elevada, riesgo de fallo catastrófico.	Seguridad: Riesgo de incendio o quemaduras. Operacionales: Parada inesperada. Económicas: Reparación mayor por daño en martillo. Imagen: Impacto en confiabilidad del equipo.

Tabla 20.

Efectos y consecuencias en el sistema hidráulico

Modos de falla asociados	Efectos	Consecuencias
Rotura de eje de bomba / Desacople mecánico / Válvula de alivio trabada / Obstrucción en succión / Aireación severa / Paro del motor impulsor	Parada completa del sistema hidráulico, imposibilidad de operar brazo, martillo y auxiliares.	Visible: Operador detecta inoperancia inmediata. Operacionales: Detención total del ciclo de perforación. Económicas: Pérdidas por tiempos muertos y reparación de bomba. Seguridad: Intentos manuales de desbloqueo aumentan riesgo de accidente.
Desgaste de bomba / Fugas internas / Colapso de manguera / Baja viscosidad del fluido	Reducción en la fuerza disponible, movimientos lentos e irregulares.	Visible: Pérdida de velocidad en cilindros y martillo. Operacionales: Bajo rendimiento, perforación más lenta. Económicas: Sobreconsumo de energía y desgaste prematuro. Imagen: Incumplimiento de plazos de producción.
Cavitación / Entrada de aire / Válvulas contaminadas / Fallas en control de bomba	Flujo intermitente, perforación no continua.	Visible: Operador percibe golpes y pérdida de continuidad. Operacionales: Interrupción frecuente de ciclos. Económicas: Mayor desgaste de válvulas y bomba.

Modos de falla asociados	Efectos	Consecuencias
Fisuras en tanque / Sellos dañados / Mangueras reventadas	Pérdida progresiva de aceite hidráulico.	<p>Seguridad: Cavitación puede generar sobrecalentamiento y falla súbita.</p> <p>Visible: Fugas externas evidentes.</p> <p>Operacionales: Detención parcial o total por pérdida de fluido.</p> <p>Económicas: Costos altos por reposición de aceite.</p> <p>Medio ambiente: Contaminación por derrame.</p>
Intercambiador de calor obstruido / Válvula termostática trabada / Fugas internas	Elevación de temperatura, pérdida de viscosidad y lubricación.	<p>Visible: Alarmas de temperatura.</p> <p>Operacionales: Baja eficiencia de todo el sistema.</p> <p>Económicas: Riesgo de daño mayor en bomba y sellos.</p> <p>Seguridad: Riesgo de incendio o quemaduras.</p> <p>Medio ambiente: Degradación acelerada del fluido.</p>
Filtros saturados / Respirable sin filtración / Ingreso de partículas por mantenimiento	Presencia de partículas sólidas y agua en el fluido.	<p>Visible: Deterioro acelerado de componentes.</p> <p>Operacionales: Fallas repetitivas en válvulas y cilindros.</p> <p>Económicas: Costos elevados en repuestos.</p> <p>Medio ambiente: Disposición inadecuada de fluido contaminado.</p>
Precarga baja / Rotura de diafragma / Conexiones obstruidas	No absorbe variaciones de presión, generando golpes hidráulicos.	<p>Operacionales: Vibraciones en líneas y cavitación.</p> <p>Económicas: Riesgo de rotura en mangueras.</p> <p>Seguridad: Incremento de riesgo de fugas explosivas.</p>
Válvulas direccionales obstruidas / Spool desgastado / Fugas internas en cilindros	Movimientos lentos, discontinuos o sin respuesta del brazo.	<p>Visible: Operador percibe bajo desempeño.</p> <p>Operacionales: Retraso en ciclos de perforación.</p> <p>Económicas: Mayor tiempo de operación, aumento de consumo energético.</p> <p>Seguridad: Riesgo de atrapamiento por movimientos irregulares.</p>
Válvula de alivio trabada / Resorte roto / Bloqueo en línea de alivio	Sistema sin protección frente a sobrepresión.	<p>Operacionales: Daño súbito de componentes.</p> <p>Seguridad: Riesgo de ruptura de mangueras y cilindros.</p> <p>Medio ambiente: Fugas masivas de aceite por roturas.</p>

Modos de falla asociados	Efectos	Consecuencias
Sellos en bridas / Mangueras agrietadas / Fisura en cuerpo de válvula	Goteo o derrame de aceite en conexiones y tanque.	<p>Visible: Operador detecta fuga.</p> <p>Operacionales: Reducción de presión y pérdida de caudal.</p> <p>Económicas: Reposición constante de aceite.</p> <p>Medio ambiente: Contaminación por derrames.</p> <p>Imagen: Incumplimiento de normas ambientales.</p>

Tabla 21.

Efectos y consecuencias en el sistema aire-agua (watermist)

Modos de falla asociado	Efecto	Consecuencia
Obstrucción total en línea principal / Válvula de control cerrada o trabada / Rotura de manguera principal / Falla en bomba de agua o compresor de aire / Tanque sin suministro	Ausencia total de refrigeración y supresión de polvo en el frente de perforación, pérdida inmediata de la función de limpieza y enfriamiento de la broca	<p>Seguridad: Exposición a altas temperaturas en la broca y polvo en suspensión.</p> <p>Operacionales: Detención de la perforación.</p> <p>Económicas: Costos por tiempos muertos y reparaciones.</p> <p>Medio ambiente: Incremento de emisiones de polvo.</p> <p>Imagen: Impacto negativo por fallas críticas en seguridad y operación.</p> <p>Seguridad: Exposición prolongada a polvo.</p>
Filtro obstruido / Incrustaciones en ductos / Desgaste en válvula de control / Pérdida de presión en compresor / Fugas menores en conexiones	Refrigeración y limpieza parcial, reducción de eficiencia de penetración, mayor desgaste de la broca	<p>Operacionales: Reducción de la velocidad de perforación.</p> <p>Económicas: Incremento en el desgaste de brocas y mayor tiempo de operación.</p> <p>Medio ambiente: Aumento de material particulado en el ambiente.</p> <p>Imagen: Riesgo de incumplimiento en estándares de seguridad ocupacional.</p>
Baja presión intermitente en compresor / Válvula neumática defectuosa / Incrustaciones desprendidas que bloquean / Mal funcionamiento del regulador de presión	Variabilidad en el rendimiento de perforación, ciclos discontinuos de limpieza y refrigeración	<p>Seguridad: Riesgo de exposición a condiciones inestables de polvo.</p> <p>Operacionales: Interrupciones frecuentes en la perforación.</p> <p>Económicas: Costos por paradas intermitentes y desgaste prematuro.</p> <p>Medio ambiente: Posible aumento de partículas suspendidas.</p>

Modos de falla asociado	Efecto	Consecuencia
Obstrucción parcial de boquillas / Bomba con caudal insuficiente / Filtro obstruido / Válvula reguladora defectuosa	Aumento de temperatura de la broca, condiciones de operación fuera de rango	<p>Imagen: Percepción negativa por baja confiabilidad del sistema.</p> <p>Seguridad: Riesgo de fractura de la broca y proyecciones peligrosas.</p> <p>Operacionales: Reducción de la vida útil de las brocas.</p> <p>Económicas: Costos adicionales por recambio frecuente de herramientas.</p> <p>Medio ambiente: Posibles vertimientos menores en el frente.</p>
Desajuste en válvula mezcladora / Defecto en regulador de caudal / Bloqueo parcial en línea / Sensor de mezcla descalibrado	Mezcla desbalanceada que reduce la supresión de polvo y la refrigeración	<p>Imagen: Impacto por fallas en la operación.</p> <p>Seguridad: Exposición a polvo y fallas en evacuación del detrito.</p> <p>Operacionales: Menor eficiencia de perforación.</p> <p>Económicas: Aumento del desgaste de consumibles.</p> <p>Medio ambiente: Incremento de emisiones de polvo.</p> <p>Imagen: Riesgo de incumplimiento en estándares de higiene industrial.</p>
Sedimentos minerales / Incrustaciones calcáreas / Partículas sólidas / Oxidación interna de ductos / Boquilla dañada o deformada	Pérdida localizada de refrigeración, puntos calientes y acumulación de detrito	<p>Seguridad: Riesgo de sobrecalentamiento localizado de la broca.</p> <p>Operacionales: Disminución de la eficiencia de perforación.</p> <p>Económicas: Paradas no programadas por limpieza o reemplazo de boquillas.</p> <p>Medio ambiente: Posibles fugas de agua contaminada.</p> <p>Imagen: Afectación por fallas repetitivas en componentes menores.</p>
Sellos de juntas deteriorados / Mangueras agrietadas / Racores flojos / Fisuras en tuberías por fatiga o corrosión	Pérdida de presión y caudal, derrames locales de agua	<p>Seguridad: Riesgo de resbalones en el área de trabajo.</p> <p>Operacionales: Pérdida de eficiencia del sistema.</p> <p>Económicas: Costos de mantenimiento correctivo.</p> <p>Medio ambiente: Encharcamientos y contaminación localizada.</p> <p>Imagen: Impacto por incumplimiento en condiciones de orden y aseo industrial.</p>

Modos de falla asociado	Efecto	Consecuencia
Obstrucción interna por sedimentos / Resorte roto / Válvula trabada por corrosión / Montaje defectuoso	Pérdida de función de retención, retrocesos de presión o mezcla inversa en la red	<p>Seguridad: Riesgo de sobrepresión en línea.</p> <p>Operacionales: Inestabilidad en el sistema aire-agua.</p> <p>Económicas: Mayores costos por fallas repetitivas y reparaciones.</p> <p>Medio ambiente: Potencial liberación de agua en la zona.</p> <p>Imagen: Percepción negativa por ineficiencia del sistema.</p>
Insuficiencia en caudal de agua para supresión / Fugas en nebulización / Válvula de regulación de polvo inoperante / Boquillas de supresión obstruidas / Compresor defectuoso	Incremento significativo de polvo respirable, pérdida de la función de control ambiental	<p>Seguridad: Riesgo respiratorio severo para el personal.</p> <p>Operacionales: Interrupciones por condiciones inseguras.</p> <p>Económicas: Costos por incidentes laborales y posibles sanciones.</p> <p>Medio ambiente: Mayor emisión de partículas al entorno.</p> <p>Imagen: Deterioro de la reputación por incumplimiento de estándares ambientales y de seguridad.</p>

Tabla 22.

Efectos y consecuencias en el sistema eléctrico

Modos de falla asociados	Efectos	Consecuencias
Interrupción en la red de alimentación / Cables principales cortados o quemados / Fusibles abiertos / Falla total en generador o transformador	Pérdida total de operación del equipo, detención inmediata de funciones críticas, indisponibilidad completa del Jumbo	<p>Seguridad: Riesgo de incidentes al detenerse bruscamente el sistema.</p> <p>Operacionales: Paro total de actividades.</p> <p>Económicas: Pérdida de productividad y altos costos de reparación.</p> <p>Medio ambiente: Posible pérdida de control en procesos auxiliares.</p> <p>Imagen: Impacto negativo por baja confiabilidad del equipo.</p>
Mal contacto en bornes o conectores /	Inestabilidad en la alimentación,	Seguridad: Riesgo de mal funcionamiento de protecciones eléctricas.

Modos de falla asociados	Efectos	Consecuencias
Sulfatación en terminales / Falla de contactores desgastados / Cables con daño por vibración	apagados momentáneos de sistemas auxiliares, reducción en eficiencia operativa	<p>Operacionales: Interrupciones frecuentes de la perforación.</p> <p>Económicas: Costos por paradas intermitentes y fallas repetitivas.</p> <p>Medio ambiente: Posibles vertimientos por interrupciones de bombeo.</p> <p>Imagen: Percepción negativa por fallas recurrentes.</p>
Cortos parciales en aislamiento deteriorado / Falla intermitente en interruptores / Relés defectuosos / Fluctuaciones en grupo electrógeno	Pérdida parcial de control eléctrico, funcionamiento inestable de tableros y accesorios	<p>Seguridad: Riesgo de descargas eléctricas o chispas.</p> <p>Operacionales: Fallas aleatorias que afectan la confiabilidad.</p> <p>Económicas: Mayor tiempo invertido en diagnósticos.</p> <p>Medio ambiente: Potencial de fallas en sistemas de bombeo.</p> <p>Imagen: Impacto negativo por baja confiabilidad del sistema.</p>
Desbalance en fases / Falla en regulador de tensión / Sobrecarga en el sistema / Alimentación deficiente del transformador	Sobrecalentamiento de motores, pérdida de eficiencia, disparos de protecciones	<p>Seguridad: Riesgo de incendios por sobrecalentamiento.</p> <p>Operacionales: Paradas frecuentes de los equipos eléctricos.</p> <p>Económicas: Daños en motores y componentes sensibles.</p> <p>Medio ambiente: Posibles fugas por fallas en sistemas asociados.</p> <p>Imagen: Afectación por fallas en confiabilidad energética.</p>
Cables sobrecalentados por sobrecarga / Mala conexión en bornes / Falla en dispositivos de protección mal calibrados / Derivaciones a tierra	Elevado consumo de energía, disparos de protecciones, riesgo de quemado en bobinas	<p>Seguridad: Riesgo de electrocución e incendios.</p> <p>Operacionales: Reducción en continuidad de operación.</p> <p>Económicas: Costos de reemplazo de cables y bobinas.</p> <p>Medio ambiente: Daños indirectos en sistemas auxiliares.</p> <p>Imagen: Percepción de baja calidad en mantenimiento eléctrico.</p>

Modos de falla asociados	Efectos	Consecuencias
Fusible fundido en tablero / Corte en alimentación secundaria / Cables de control dañados / Fuente de alimentación defectuosa	Imposibilidad de accionar funciones desde el tablero, pérdida de control del equipo	<p>Seguridad: Riesgo por no poder detener equipos en emergencia.</p> <p>Operacionales: Parálisis parcial o total de los sistemas.</p> <p>Económicas: Costos de reparación y tiempo improductivo.</p> <p>Medio ambiente: Riesgo de fallas en sistemas auxiliares críticos.</p> <p>Imagen: Deterioro de la confianza en la fiabilidad operativa.</p>
Falla en contactores de arranque / Bobinado de motor en cortocircuito o abierto / Protección térmica activada / Conexiones flojas en la caja de bornes	Paro de sistemas secundarios (ventilación, bombas, etc.), afectando continuidad de operación	<p>Seguridad: Riesgo de sobrecalentamiento por falta de ventilación.</p> <p>Operacionales: Interrupción de funciones auxiliares críticas.</p> <p>Económicas: Costos por reemplazo de motores y pérdida de productividad.</p> <p>Medio ambiente: Posible contaminación por fallas en bombas.</p> <p>Imagen: Percepción de mantenimiento ineficaz.</p>
Sobrecarga prolongada / Cables de sección inadecuada / Aislamiento envejecido / Conexiones flojas	Pérdida de aislamiento, incremento de la resistencia eléctrica, riesgo de incendios	<p>Seguridad: Riesgo alto de incendio eléctrico.</p> <p>Operacionales: Pérdidas energéticas y posibles paradas.</p> <p>Económicas: Reparación costosa de cableado y conectores.</p> <p>Medio ambiente: Riesgo de contaminación por incendios.</p> <p>Imagen: Afectación por incidentes eléctricos graves.</p>
Aislamiento dañado / Conductor en contacto con chasis / Entrada de humedad en gabinetes / Objetos metálicos sueltos dentro del tablero	Daño inmediato en componentes eléctricos, disparo de protecciones, riesgo de incendio	<p>Seguridad: Alto riesgo de electrocución e incendios.</p> <p>Operacionales: Paro inmediato del sistema.</p> <p>Económicas: Costos elevados por reemplazo de equipos eléctricos.</p> <p>Medio ambiente: Posibles incendios con emisiones contaminantes.</p> <p>Imagen: Impacto severo por fallas críticas en seguridad.</p>

Modos de falla asociados	Efectos	Consecuencias
Disyuntor trabado mecánicamente / Curva de disparo mal calibrada / Relé de protección averiado / Conexiones sulfatadas en disparadores	Fallo en la protección del sistema, no se aíslan las fallas eléctricas a tiempo	<p>Seguridad: Alto riesgo de accidentes eléctricos.</p> <p>Operacionales: Daños progresivos en equipos eléctricos.</p> <p>Económicas: Reparaciones más costosas por fallas no contenidas.</p> <p>Medio ambiente: Posible afectación de equipos auxiliares.</p> <p>Imagen: Impacto negativo por incidentes graves.</p>
Carga desigual en las fases / Falla en contactor de fase / Rotura de fusible en una de las fases / Conexiones defectuosas en barra trifásica	Sobrecalentamiento en motores trifásicos, reducción de vida útil, inestabilidad en operación	<p>Seguridad: Riesgo de incendios en motores.</p> <p>Operacionales: Disminución en la eficiencia energética.</p> <p>Económicas: Mayor desgaste de motores y costos de reemplazo.</p> <p>Medio ambiente: Mayor consumo energético ineficiente.</p> <p>Imagen: Negativa por fallas recurrente.</p>

4.8 Análisis del riesgo

4.8.1 Enfoque metodológico

El análisis de riesgos en sistemas de equipos de perforación parte de la correcta identificación de las fallas funcionales y sus modos de falla asociados, que se establecen en los apartados anteriores. A partir de esa información se analizan tres dimensiones principales:

Probabilidad de ocurrencia: Frecuencia estimada del modo de falla con base en datos históricos de mantenimiento, experiencia operativa y condiciones de trabajo.

Severidad de la consecuencia: Impacto que genera la ocurrencia de la falla en términos de seguridad, medio ambiente, operación, costos e imagen corporativa.

Capacidad de detección: Grado de dificultad para identificar la falla antes de que se materialice en una consecuencia crítica.

Estas tres variables permiten calcular el nivel de riesgo (bajo, medio, alto o crítico), y a partir de este, se priorizan las acciones de mantenimiento a ejecutar. (Bevilacqua & Braglia, 2000).

4.8.2 Clasificación de riesgos

La clasificación de riesgos se llevará a cabo mediante una matriz de criticidad de carácter cualitativo, en la cual se cruzan dimensiones como la probabilidad de ocurrencia, la severidad de las consecuencias y el nivel de exposición al riesgo. Esta herramienta permite valorar y priorizar los eventos de falla asociados al equipo de perforación, considerando su impacto en la seguridad, la disponibilidad operativa, los costos de mantenimiento y el medio ambiente, con el propósito de orientar la toma de decisiones y la definición de estrategias de control adecuadas. (Bevilacqua & Braglia, 2000).

Probabilidad (P):

Rara: Casi nunca ocurre.

Ocasional: Se presenta de manera esporádica.

Frecuente: Se evidencia en cada ciclo de trabajo o con una mayor periodicidad.

Severidad (S):

Baja: Consecuencias menores, sin afectación a la seguridad.

Media: Retrasos operativos, costos moderados.

Alta: Impacto significativo en la seguridad, operación o medio ambiente.

Crítica: Riesgo de lesiones graves, pérdidas económicas elevadas o daño ambiental irreversible.

Detección (D):

Alta: La falla puede detectarse fácilmente en las inspecciones rutinarias.

Media: Se requiere pruebas o análisis más especializados.

Baja: La falla es difícil de identificar hasta que ocurre.

La aplicación del análisis del riesgo permite priorizar los modos de falla más críticos para establecer la correcta rutina de mantenimiento. Optimizar la asignación de recursos, teniendo un enfoque en los sistemas y componentes de mayor impacto. Reduce la probabilidad de fallas catastróficas y sus efectos en seguridad, productividad y sostenibilidad ambiental. (Bevilacqua & Braglia, 2000).

Tabla 23.

Análisis del riesgo del sistema de perforación

No.	Modo de falla	P	S	D	Riesgo	Justificación / acción
1	Atasco del martillo hidráulico / Fuga interna de aceite en martillo	Ocasional	Alta	Media	Alto	Justificación: Frena totalmente la operación; detectable por pérdida de presión/caudal. Acción: monitoreo de presión y plan PM de martillo.
2	Golpes intermitentes por desgaste en válvulas / Bloqueo parcial del deslizador	Frecuente	Media	Alta	Moderado	Justificación: Afecta productividad de forma recurrente; operador lo detecta. Acción: mantenimiento preventivo y limpieza/ajuste de válvulas.

No.	Modo de falla	P	S	D	Riesgo	Justificación / acción
3	Desbalance del martillo / Falla en sujeción de la broca	Ocasional	Alta	Media	Alto	Justificación: Genera vibraciones peligrosas; detectable por vibración/inspección. Acción: control de vibraciones y controles de sujeción.
4	Pérdida de energía de impacto / Fractura parcial de broca	Frecuente	Media	Alta	Moderado	Justificación: Reduce penetración y calidad; se detecta por rendimiento. Acción: control de desgaste y reemplazo según rendimiento.
5	Desgaste prematuro de broca / Obstrucción de circulación de agua	Frecuente	Media	Alta	Moderado	Justificación: Frecuente y degradante; requiere filtrado/monitoreo de caudal. Acción: filtrado, control de agua y cronograma de inspección.
6	Falla del sistema de avance del martillo / Rotura de elementos de anclaje	Rara	Crítica	Baja	Crítico	Justificación: Impide sostenimiento, riesgo estructural; difícil de prever sin inspección. Acción: inspecciones no destructivas y redundancia en elementos críticos.
7	Bloqueo o desgaste del deslizador / Juego excesivo en guías	Ocasional	Media	Alta	Moderado	Justificación: Afecta alineación; fácil de detectar en inspección. Acción: lubricación y reemplazo con umbrales de desgaste.
8	Pérdida progresiva de presión hidráulica / Broca desafilada	Frecuente	Media	Media	Moderado	Justificación: Tendencia gradual detectable por tendencias de presión. Acción: monitoreo continuo de presión y análisis de tendencias (alarma temprana).

No.	Modo de falla	P	S	D	Riesgo	Justificación / acción
9	Desbalance del martillo / Rotura parcial de barra	Ocasional	Alta	Baja	Moderado	Justificación: Riesgo de fractura súbita; detectabilidad limitada sin ensayos. Acción: inspecciones por vibración en barras.
10	Falla en motor de rotación hidráulico / Obstrucción en transmisión de par	Ocasional	Alta	Media	Alto	Justificación: Impide rotación, paro operativo y posibles proyectiles. Acción: protecciones de torque y pruebas periódicas de motor.
11	Obstrucción de líneas de agua / Falla en mezcla aire-agua	Frecuente	Media	Alta	Baja	Justificación: Produce bloqueo del barrenado y sobrecalentamiento; visible/medible. Acción: filtros, limpieza rutinaria y sensores de caudal.
12	Cavitación en martillo / Pérdida de presión hidráulica	Ocasional	Alta	Media	Alta	Justificación: Daño acelerado a bomba/martillo; detecta por señales acústicas / vibración. Acción: control de succión, mantener niveles y análisis de vibración.
13	Deficiencia en refrigeración de agua / Sobrepresión en martillo	Rara	Crítica	Baja	Crítico	Justificación: Riesgo de fallo catastrófico y seguridad; suele detectarse tarde. Acción: alarmas de temperatura, paradas automáticas y redundancia de refrigeración.

Tabla 24.*Análisis del riesgo del sistema hidráulico*

No.	Modo de falla	P	S	D	Riesgo	Justificación / acción
1	Rotura de eje de bomba / Desacople mecánico / Válvula principal de alivio trabada / Obstrucción de succión / Aireación severa / Paro del motor impulsor	Rara	Crítica	Media	Crítico	Justificación: Produce parada completa del sistema hidráulico y pérdida de funciones críticas (brazo, martillo). Acción: inspección preventiva de acoplamientos y ejes, control de nivel y condiciones de succión, protecciones automáticas y stock de componentes críticos.
2	Desgaste de bomba / Fugas internas / Colapso de manguera / Baja viscosidad	Ocasional	Alta	Media	Alto	Justificación: Disminuye presión y caudal, afecta productividad y genera consumo energético adicional. Acción: programa de mantenimiento de bombas, análisis de aceite (partículas/viscosidad), reemplazo programado de mangueras.
3	Cavitación / Entrada de aire / Válvulas contaminadas / Fallas en control de bomba	Ocasional	Alta	Media	Alto	Justificación: Cavitación daña bomba y reduce continuidad; genera ruidos y vibraciones. Acción: control de condiciones de succión, filtros, pruebas de vacío/sellado, monitoreo de vibración.
4	Fisuras en tanque / Sellos dañados /	Frecuente	Baja	Alta	Moderado	Justificación: Genera pérdidas de fluido y

No.	Modo de falla	P	S	D	Riesgo	Justificación / acción
	Mangueras reventadas					contaminación ambiental; usualmente visible. Acción: inspecciones visuales periódicas, reemplazo de sellos, procedimientos de contención de derrames.
5	Intercambiador de calor obstruido / Termostática trabada / Fugas internas	Ocasional	Alta	Media	Alto	Justificación: Sobrecalentamiento del fluido reduce viscosidad y daña componentes; riesgo de paro. Acción: mantenimiento del intercambiador (limpiezas programadas), instrumentación térmica y alarmas de temperatura.
6	Filtros saturados / Respiradero sin filtración / Ingreso de partículas por mantenimiento	Frecuente	Baja	Alta	Bajo	Justificación: Contaminación causa fallas repetidas en válvulas y cilindros; detectable por descenso de condición. Acción: cambio periódico de filtros, mejores procedimientos de manten., respiradero con filtro.
7	Precarga baja / Rotura de diafragma / Conexiones obstruidas (acumulador)	Ocasional	Alta	Media	Alto	Justificación: Pérdida de amortiguación, golpes hidráulicos y sobrepresiones; riesgo de daño súbito. Acción: verificación de precarga, pruebas de acumulador y revisión de conexiones.
8	Válvulas direccionales obstruidas / Spool	Frecuente	Media	Alta	Alto	Justificación: Movimientos lentos o nulos, afecta ciclos y

No.	Modo de falla	P	S	D	Riesgo	Justificación / acción
	desgastado / Fugas internas en cilindros					precisión; detectabilidad por operación. Acción: limpieza/recambio de válvulas, mantenimiento de cilindros y control de contaminación.
9	Válvula de alivio trabada / Resorte roto / Bloqueo en línea de alivio	Rara	Crítica	Baja	Alto	Justificación: Ausencia de protección contra sobrepresiones, posible rotura catastrófica y riesgo para personal. Acción: pruebas funcionales periódicas de alivio, rediseño de accesibilidad para mantenimiento, sensores de sobrepresión con parada automática.
10	Sellos en bridas / Mangueras agrietadas / Fisura en cuerpo de válvula	Frecuente	Media	Alta	Moderado	Justificación: Fugas externas frecuentes, pérdida de aceite y contaminación; generalmente visibles. Acción: inspección diaria, programa de reemplazo de mangueras y control torque en racores.

Tabla 25

Análisis del riesgo del sistema aire – agua (watermist).

No.	Modo de falla	P	S	D	Riesgo	Justificación / acción
1	Obstrucción total en línea principal / Válvula de control cerrada o trabada / Rotura de manguera principal / Falla	Ocasional	Alta	Media	Alto	Justificación: Causa ausencia total de mezcla, detención de perforación y riesgo de sobrecalentamiento y producción de polvo.

No.	Modo de falla	P	S	D	Riesgo	Justificación / acción
	en bomba o compresor / Tanque sin suministro					Acción: Revisiones de integridad de líneas y bombas, pruebas funcionales periódicas, redundancia en suministro crítico y procedimientos de contingencia.
2	Filtro obstruido / Incrustaciones en ductos / Desgaste en válvula de control / Pérdida de presión en compresor / Fugas menores	Frecuente	Media	Alta	Moderado	Justificación: Reduce caudal y eficacia; ocurre con frecuencia por calidad del agua y sedimentos. Acción: Programa de reemplazo de filtros, limpieza de ductos, control de calidad de agua y sensores de caudal/alarma.
3	Baja presión intermitente en compresor / Válvula neumática defectuosa / Entradas de aire falso / Regulador defectuoso	Frecuente	Media	Media	Moderado	Justificación: Genera suministro irregular, interrumpe ciclos y aumenta desgaste. Acción: Mantenimiento del compresor, verificación de válvulas neumáticas, sellado de líneas y monitorización de presión.
4	Obstrucción parcial de boquillas / Bomba con caudal insuficiente / Filtro en línea obstruido / Válvula reguladora defectuosa	Frecuente	Media	Alta	Moderado	Justificación: Produce sobrecalentamiento local de la broca y pérdida de rendimiento; es relativamente fácil de detectar. Acción: Inspección y limpieza de boquillas, verificación de caudal, mantenimiento de bombas y filtros.
5	Desajuste en válvula mezcladora /	Ocasional	Media	Media	Moderado	Justificación: Mezcla desbalanceada reduce

No.	Modo de falla	P	S	D	Riesgo	Justificación / acción
	Defecto en regulador de caudal / Bloqueo parcial / Sensor descalibrado					eficacia de supresión; detectabilidad moderada. Acción: Calibración periódica de reguladores y sensores, procedimientos de verificación tras mantenimiento.
6	Obstrucción por sedimentos / Incrustaciones calcáreas / Partículas sólidas / Oxidación interna / Boquilla dañada	Frecuente	Media	Alta	Alto	Justificación: Bloqueos localizados son comunes en ambientes con agua dura; afectan puntos críticos. Acción: Programa de limpieza químico-mecánica, sustitución preventiva de boquillas y control de calidad de agua.
7	Sellos de juntas deteriorados / Mangueras agrietadas / Racores flojos / Fisuras en tuberías por fatiga o corrosión	Frecuente	Alta	Alta	Alto	Justificación: Fugas reducen eficiencia y generan riesgos de resbalones; suelen ser visibles. Acción: Inspecciones visuales diarias, reemplazo programado de mangueras y controles de apriete de racores.
8	Obstrucción interna en válvulas de retención / Resorte roto / Válvula trabada por corrosión / Montaje defectuoso	Ocasional	Alta	Baja	Alto	Justificación: Pérdida de retención puede causar mezclas inversas y sobrepresión; a menudo oculta hasta evento. Acción: Pruebas funcionales periódicas de retención, accesibilidad para mantenimiento, sensores de presión aguas arriba/abajo.
9	Insuficiencia en caudal para	Frecuente	Alta	Media	Alto	Justificación: Incremento de polvo respirable con

No.	Modo de falla	P	S	D	Riesgo	Justificación / acción
	supresión / Fugas en nebulización / Válvula reguladora inoperante / Boquillas obstruidas / Compresor defectuoso					implicaciones sanitarias; detectabilidad por condiciones ambientales y operador. Acción: Monitoreo ambiental (partículas), mantenimiento de nebulización, políticas de EPP.

Tabla 26.*Análisis del riesgo del sistema eléctrico*

No.	Modo de falla	P	S	D	Riesgo	Justificación / acción
1	Interrupción total en la red de alimentación / Falla en generador o transformador / Fusibles abiertos	Rara	Crítica	Alta	Crítico	Justificación: Paro total del Jumbo con riesgos de seguridad. Acción: redundancia en suministro, pruebas de protecciones, mantenimiento predictivo en transformadores y generadores.
2	Mal contacto en bornes / Sulfatación en terminales / Fallo de contactores desgastados	Ocasional	Alta	Alta	Alto	Justificación: Causa apagados intermitentes, riesgo eléctrico. Acción: inspecciones periódicas de bornes, limpieza de terminales, reemplazo preventivo de contactores.
3	Cortos parciales por aislamiento deteriorado / Relés defectuosos / Fluctuaciones en	Ocasional	Alta	Media	Alto	Justificación: Puede ocasionar disparos aleatorios y fallas repetitivas. Acción: Pruebas dieléctricas, calibración de

No.	Modo de falla	P	S	D	Riesgo	Justificación / acción
	grupo electrógeno					relés, mantenimiento preventivo al grupo electrógeno.
4	Desbalance de fases / Sobrecarga en el sistema / Transformador deficiente	Ocasional	Crítica	Media	Crítico	Justificación: Riesgo de incendio, daños en motores. Acción: monitoreo en línea de corriente/tensión, protecciones térmicas confiables, revisión de cargas.
5	Cables sobrecalentados / Derivaciones a tierra / Fallo en dispositivos de protección	Rara	Alta	Media	Alto	Justificación: Riesgo de incendio y electrocución. Acción: inspección termográfica de tableros, pruebas de resistencia de aislamiento, mantenimiento a protecciones.
6	Fusible fundido en tablero / Corte en alimentación secundaria / Fuente defectuosa	Ocasional	Alta	Media	Alto	Justificación: Imposibilidad de accionar sistemas auxiliares. Acción: inventario de repuestos críticos, pruebas de continuidad y reemplazo preventivo de fusibles.
7	Falla en contactores de arranque / Bobinado de motor en cortocircuito / Protección térmica activada	Frecuente	Alta	Alta	Alto	Justificación: Paro en ventilación y bombas, impacto inmediato en seguridad. Acción: monitoreo térmico de motores, análisis predictivo con pruebas eléctricas, reemplazo programado de contactores.
8	Sobrecarga prolongada / Cables de sección inadecuada /	Ocasional	Alta	Media	Alto	Justificación: Genera incendios eléctricos graves. Acción: diseño correcto de secciones, inspecciones de torque, alarmas de sobrecarga.

No.	Modo de falla	P	S	D	Riesgo	Justificación / acción
	Conexiones flojas					
9	Aislamiento dañado / Conductor en contacto con chasis / Humedad en gabinetes	Ocasional	Alta	Media	Moderado	Justificación: Fallo súbito con riesgo de electrocución. Acción: pruebas de aislamiento periódicas, control de humedad, sellado de tableros.
10	Disyuntor trabado / Curva mal calibrada / Relé de protección defectuoso	Rara	Crítica	Baja	Alto	Justificación: Protecciones inoperantes generan fallas no contenidas. Acción: pruebas periódicas de disparo, calibración y certificación de relés/disyuntores.
11	Carga desajustada en fases / Rotura de fusible / Conexiones defectuosas en barra trifásica	Ocasional	Alta	Media	Alto	Justificación: Sobrecargas en motores, pérdidas energéticas. Acción: balanceo de cargas, pruebas de fusibles, inspección visual de barras.

4.9 Matriz de riesgos

La gestión del riesgo constituye una de las bases del RCM, dado que, permite anticipar los posibles eventos que comprometen la seguridad, disponibilidad y desempeño e los activos de la compañía. En este contexto, la matriz de riesgos se convierte en una herramienta metodológica que facilita la identificación, evaluación y priorización de los riesgos derivados de fallas potenciales. (Campbell & Jardine, 2001).

En el campo de la maquinaria pesada y específicamente en equipos de perforación como el Jumbo Epiroc Boomer S1D, esta matriz cobra especial relevancia, ya que las fallas no solo

implican pérdidas económicas por indisponibilidad, sino también riesgos para la seguridad de los operadores y potenciales impactos ambientales. La clasificación del riesgo mediante esta herramienta permite priorizar intervenciones, definir planes de mantenimiento y establecer controles preventivos que reduzcan la probabilidad de incidentes críticos.

Su aplicación se orienta a fortalecer la cultura de seguridad, mejorar la planificación del mantenimiento y garantizar la continuidad operacional en proyectos de perforación minera y vial.

4.9.1 Valoración de matriz de riesgos

Para el caso el equipo de perforación, se adopta una matriz de riesgo integral que incorpora múltiples dimensiones de impacto con el fin de evaluar de manera holística las consecuencias de las fallas potenciales. Esta herramienta amplía la perspectiva al considerar no sólo la probabilidad de ocurrencia, sino también los efectos en distintos ámbitos:

Humanas: Desde lesiones leves hasta la pérdida de vidas humanas.

Ambientales: Efectos controlables o irreversibles sobre el entorno.

Económicos: Costos asociados a la falla, clasificados en rangos monetarios.

Imagen corporativa: Alcance del impacto en la reputación de la empresa (local, regional, nacional o internacional).

Las consecuencias sintetizan estos efectos en cinco niveles:

Catastrófico: Evento de mayor severidad, con consecuencias humanas fatales, daños ambientales irreversibles o pérdidas económicas muy elevadas.

Critico: Incapacidad permanente, daños ambientales serios o pérdidas significativas.

Marginal: Incapacidad temporal o efectos reversibles de menor escala.

Insignificante: Lesiones leves, impactos ambientales o económicos controlables.

Ninguno: Sin efectos relevantes.

Las probabilidades se clasifican en seis categorías, que van determinadas por la frecuencia de la ocurrencia de la falla:

Imposible: No puede presentarse bajo condiciones normales de operación del equipo.

Ocurrencia > 3 años.

Improbable: Solo podría ocurrir en circunstancias altamente excepcionales.

Ocurrencia < 3 años.

Remoto: Poco común, pero posible en condiciones específicas poco frecuentes. Ocurrencia < 1 año.

Ocasional: Puede presentarse esporádicamente durante la operación normal. Ocurrencia < 6 meses.

Moderado: Ocurre con relativa frecuencia, siendo esperable en el ciclo de vida del equipo. Ocurrencia < 3 meses.

Frecuente: Se presenta de manera recurrente y sistemática en la operación habitual. Ocurrencia < 1 mes.

El cruce entre consecuencias y probabilidades genera un nivel de riesgo representado por colores:

Verde (bajo): Riesgo aceptable, requiere controles rutinarios.

Amarillo (medio): Riesgo moderado, necesita seguimiento y acciones de mitigación.

Rojo (alto): Riesgo inaceptable, requiere intervención inmediata y medidas correctivas.

Figura 11.

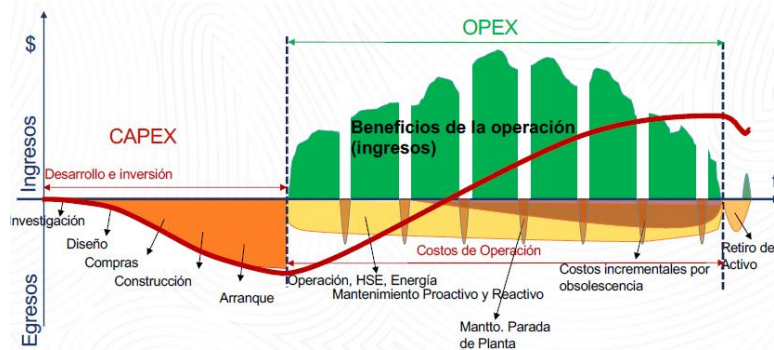
Valoración de matriz de riesgos

EFECTOS				CONSECUENCIA	NIVEL	PROBABILIDAD					
HUMANAS	AMBIENTALES	COSTOS	IMAGEN			IMPOSIBLE	IMPROBABLE	REMOTO	OCASIONAL	MODERADO	FRECUENTE
Mas de un muerto	Efectos irreversibles	> \$100MM	Internacional	Catastrofico	1						
Incapacidad permanente	Efectos irreversibles en menos de 2 años	Entre \$100MM - \$20M	Nacional	Critico	2						
Incapacidad temporal	Efectos reversibles en menos de 6 meses	Entre \$20MM - \$5M	Regional	Marginal	3						
Lesiones	Efectos pueden ser controlados	Entre \$5MM - \$1MM	Local	Insignificante	4						
Ninguna	No afecta el medio ambiente	<\$1MM	Ninguno	Ninguno	5						
OCURRENCIA						> 3 Años	< 3 Años	< 1 Años	< 6 Años	< 3 Meses	< 1 Mes
NIVEL						A	B	C	D	E	F

4.10 Costos de mantenimiento: Análisis de valor de ciclo de vida de un activo

Figura 12.

Análisis del valor de ciclo de vida de un activo



Nota. Tomado de: Ortiz Ruiz Consultores. Curso RCM - Daniel Ortiz Plata, 2024.

El análisis de costos en el ciclo de vida permite determinar el impacto económico de las decisiones de mantenimiento desde la adquisición hasta el retiro del Jumbo S1D. En este contexto:

Visualización de costos de mantenimiento: La máxima disponibilidad a cualquier precio no debe entenderse como mantenimiento, sino como la optimización de recursos para garantizar una disponibilidad alineada a los objetivos productivos.

Análisis de costos: Se comparan los costos de mantenimiento proactivo frente a los del mantenimiento reactivo. Generalmente, el costo proactivo es menor, ya que evita paradas inesperadas, daños mayores y riesgos en la seguridad y medio ambiente.

Costos de las tareas: Incluyen mano de obra, repuestos, herramientas, tiempo de indisponibilidad del equipo y riesgos asociados a la intervención.

Costos de las fallas: Abarcan pérdidas de producción, violación a normativas, impactos en la seguridad del personal, afectaciones ambientales, incremento de gastos por reparaciones de emergencia y deterioro de la imagen corporativa.

Análisis del valor del ciclo de vida: Aplicado al perforador permite establecer si resulta más rentable realizar tareas predictivas, preventivas, permitir la falla y corregirla, o incluso plantear un rediseño.

4.10.1 Comparación costos por mantenimientos reactivos y proactivos

El mantenimiento reactivo implica gastos elevados e impredecibles, derivados de paradas no planificadas, pérdidas de producción y reparaciones de gran envergadura. En contraste, el mantenimiento proactivo requiere una inversión inicial en monitoreo, capacitación y planificación, pero reduce significativamente los costos totales del ciclo de vida de los activos, al minimizar fallas imprevistas y optimizar la disponibilidad operacional.

Tabla 27.*Comparación de costos reactivos vs. proactivos en sistema de perforación.*

No .	Modo de falla	Proactivo (COP)	Reactivo (COP)	Ahorro (COP)	Retorno de la inversión (ROI)	Acciones proactivas	Acciones reactivas
1	Atasco martillo / fuga aceite	\$24.000.000	\$53.000.000	\$29.000.000	1,2	Mantenimiento de 600 h (sellos, juntas).	Mantenimiento de 600 h, reemplazo de pistón y rodamientos del martillo.
2	Golpes intermitentes / válvulas	\$6.000.000	\$16.000.000	\$10.000.000	1,7	Mantenimiento periódico de válvulas hidráulicas, limpieza y calibración.	Sustitución completa de válvulas dañadas y ajuste de sistema hidráulico.
3	Desbalance / sujeción broca	\$5.000.000	\$13.900.000	\$8.900.000	1,8	Verificación de torque y apriete en portabrocas, inspección de guías.	Reemplazo de portabrocas y reparación de guía desalineada.
4	Pérdida impacto / fractura broca	\$31.000.000	\$69.000.000	\$38.000.000	1,2	Control de desgaste de brocas, rotación programada y cambio por horas de servicio.	Sustitución de broca fracturada y revisión del martillo percutor.
5	Desgaste broca / obstrucción agua	\$270.000.000	\$4.900.000	\$265.100.000	-1,0	Limpieza y purga periódica del sistema de agua de perforación.	Cambio de broca dañada y desobstrucción completa de líneas de agua.
6	Falla avance / rotura anclaje	\$120.000.000	\$290.000.000	\$170.000.000	1,4	Inspección no destructiva (END) de anclajes, lubricación preventiva y reemplazo programado.	Sustitución de anclaje roto y reparación estructural del sistema de avance.
7	Bloqueo deslizador / juego guías	\$3.000.000	\$11.100.000	\$8.100.000	2,7	Engrase programado, ajuste y limpieza de carriles.	Cambio de guías y deslizador completos por

							desgaste excesivo.
8	Pérdida progresiva de presión hidráulica	\$12.000.000	\$61.000.000	\$49.000.000	4,1	Monitoreo predictivo de presión y caudal, cambio preventivo de filtros y mangueras.	Reemplazo de bombas, mangueras y actuadores dañados.
9	Rotura parcial de barra / desbalance	\$9.600.000	\$19.200.000	\$9.600.000	1,0	Control de torque y lubricación periódica, cambio programado de barras.	Sustitución de barra rota y revisión de sistema de rotación.
10	Falla motor rotación / transmisión	\$15.800.000	\$43.100.000	\$27.300.000	1,7	Análisis de vibraciones, lubricación y cambio preventivo de acoples.	Sustitución del motor de rotación y componentes de transmisión.
11	Obstrucción líneas agua / mezcla	\$2.300.000	\$3.900.000	\$1.600.000	0,7	Lavado químico preventivo y purga periódica de líneas.	Limpieza profunda, cambio de mangueras y componentes obstruidos.
12	Cavitación / pérdida presión	\$16.800.000	\$78.600.000	\$61.800.000	3,7	Control periódico de nivel y calidad de aceite hidráulico, purga de aire en el sistema.	Reparación de bomba dañada, sustitución de rodamientos y retenes.
13	Deficiencia refrigeración /sobrepresión	\$14.130.000	\$62.300.000	\$48.170.000	3,4	Mantenimiento predictivo del sistema de refrigeración, limpieza de radiadores y cambio de filtros.	Reemplazo de intercambiador de calor, bomba de agua y válvulas de alivio.

Tabla 28.

Comparación de costos reactivos vs. proactivos en sistema hidráulico

No.	Modo de falla	Proactivo (COP)	Reactivo (COP)	Ahorro (COP)	Retorno de la inversión (ROI)	Acciones proactivas	Acciones reactivas
1	Rotura eje bomba /	\$8.000.000	\$25.000.000	\$17.000.000	2,1	Inspección acoplamiento	Cambio bomba completa;

No.	Modo de falla	Proactivo (COP)	Reactivo (COP)	Ahorro (COP)	Retorno de la inversión (ROI)	Acciones proactivas	Acciones reactivas
	desacople / válvula alivio trabada / obstrucción succión / aireación severa					y alineación; control nivel y limpieza succión; prueba válvula alivio.	sustitución acoplamiento; reemplazo válvula alivio; parada total alivio.
2	Desgaste bomba / fugas internas / colapso manguera / baja viscosidad	\$6.500.000	\$40.000.000	\$33.500.000	5,2	Cambio preventivo mangueras; análisis aceite; prueba caudal/presión; kit bomba	Cambio bomba; sustitución mangueras; parada parcial/total
3	Cavitación / entrada aire / válvulas contaminadas / control bomba	\$5.000.000	\$45.000.000	\$40.000.000	8,0	Revisión sellos succión; prueba de vacío; cambio filtros; monitoreo vibración	Reemplazo bomba; limpieza/cambio válvulas; ajuste sistema control vibración
4	Fisuras en tanque / sellos dañados / mangueras reventadas	\$2.500.000	\$12.000.000	\$9.500.000	3,8	Inspección visual fugas; cambio sellos; control torque bridas	Soldadura tanque; cambio mangueras; reemplazo sellos y racores
5	Intercambiador obstruido / termostática trabada / fugas	\$3.500.000	\$25.000.000	\$21.500.000	6,1	Limpieza intercambiador ; inspección termostática; monitoreo temperatura	Reemplazo intercambiador; cambio termostática; reparación fugas
6	Filtros saturados / respiradero sin filtro / ingreso partículas	\$4.000.000	\$25.000.000	\$21.000.000	5,3	Cambio filtros periódicos; montaje limpio; inspección respiraderos	Sustitución válvulas y cilindros; flushing hidráulico
7	Acumulador: precarga baja / diafragma roto / conexiones obstruidas	\$4.500.000	\$30.000.000	\$25.500.000	5,7	Verificación precarga; prueba hidráulica acumulador;	Cambio acumulador/diaf ragma; reparación conexiones

No.	Modo de falla	Proactivo (COP)	Reactivo (COP)	Ahorro (COP)	Retorno de la inversión (ROI)	Acciones proactivas	Acciones reactivas
						limpieza conexiones	
8	Válvulas direccionales obstruidas / spool desgastado / fugas internas	\$7.200.000	\$36.500.000	\$29.300.000	4,1	Análisis contaminación aceite; mantenimiento válvulas; cambio sellos cilindros	Reemplazo válvulas direccionales; rectificación/sustitución cilindros
9	Válvula de alivio trabada / resorte roto / bloqueo en línea alivio	\$3.500.000	\$ 14.000.000	\$ 10.500.000	3,0	Prueba periódica válvulas; inspección y calibración; sensores sobrepresión	Cambio válvula alivio; reparación línea; riesgo rotura catastrófica
10	Sellos en bridas / mangueras agrietadas / fisura cuerpo válvula	\$3.200.000	\$ 12.000.000	\$ 8.800.000	2,8	Inspección conexiones; recambio mangueras; control torque racores	Cambio mangueras; sustitución válvulas; reemplazo sellos

Tabla 29.

Comparación de costos reactivos vs. proactivos en sistema aire-agua (watermist)

No.	Modo de falla	Proactivo (COP)	Reactivo (COP)	Ahorro (COP)	Retorno de la inversión (ROI)	Acciones proactivas	Acciones reactivas
1	Obstrucción total en línea principal / válvula control cerrada o trabada / rotura manguera principal / falla en bomba o compresor / tanque sin suministro	\$6.000.000	\$25.000.000	\$19.000.000	3,2	Revisiones integridad de líneas y bombas; pruebas funcionales periódicas; limpieza succión; redundancia en suministro crítico; stock válvulas y mangueras críticas	Reemplazo de bomba o compresor; cambio tramo de línea; intervención de emergencia; parada de perforación
2	Filtro obstruido / incrustaciones en	\$4.000.000	\$11.000.000	\$7.000.000	1,8	Programa de reemplazo de	Limpieza de urgencia de

No.	Modo de falla	Proactivo (COP)	Reactivo (COP)	Ahorro (COP)	Retorno de la inversión (ROI)	Acciones proactivas	Acciones reactivas
	ductos / desgaste en válvula de control / pérdida de presión en compresor / fugas menores					filtros y limpieza de ductos (4/año); control calidad de agua; sensores de caudal/alarma	ductos; reemplazo de filtros y válvulas; paro parcial para intervención
3	Baja presión en compresor / válvula neumática defectuosa / regulador defectuoso	\$5.500.000	\$18.500.000	\$13.000.000	2,4	Mantenimiento de compresor; verificación válvulas neumáticas; prueba de sellado y monitoreo de presión	Reparación compresor; regulador; limpieza profunda de sistema neumático; paro para rectificación
4	Obstrucción parcial de boquillas / bomba con caudal insuficiente / filtro en línea obstruido / válvula reguladora defectuosa	\$2.500.000	\$7.500.000	\$5.000.000	2,0	Inspección y limpieza de boquillas (semanal/quincenal); verificación de caudal; mantenimiento de bombas y filtros	Cambio de boquillas y reparación de bomba; limpieza de circuito en emergencia; posible paro
5	Desajuste en válvula mezcladora / defecto en regulador de caudal / bloqueo parcial / sensor descalibrado	\$1.200.000	\$2.100.000	\$900.000	0,8	Calibración periódica de reguladores y sensores; procedimientos de verificación tras mantenimiento; pruebas de mezcla programadas	Reemplazo/ajuste de válvula mezcladora o regulador; recalibración y prueba en banco
6	Obstrucción por sedimentos / incrustaciones calcáreas / partículas sólidas / oxidación interna / boquilla dañada	\$5.500.000	\$11.400.000	\$5.900.000	1,1	Programa de limpieza químico-mecánica; control calidad de agua; reemplazo preventivo de boquillas	Desobstrucción de emergencia; cambio de boquilla; flushing y posible paro de línea
7	Sellos de juntas deteriorados / mangueras agrietadas / racores flojos /	\$1.200.000	\$6.500.000	\$5.300.000	4,4	Inspecciones visuales diarias; reemplazo programado de mangueras;	Cambio de manguera/racor en emergencia; reparación de

No.	Modo de falla	Proactivo (COP)	Reactivo (COP)	Ahorro (COP)	Retorno de la inversión (ROI)	Acciones proactivas	Acciones reactivas
	fisuras en tuberías por fatiga o corrosión					control de torque en racores; stock de mangueras y sellos	tubería; parada para reparación
8	Obstrucción interna en válvulas de retención / resorte roto / válvula trabada por corrosión / montaje defectuoso	\$3.800.000	\$7.500.000	\$3.700.000	1,0	Pruebas funcionales periódicas de retención; accesibilidad para mantenimiento; sensores de presión aguas arriba/abajo	Sustitución de válvula de retención; limpieza/cambio de resorte; riesgo de parada y mezcla inversa
9	Insuficiencia en caudal para supresión / fugas en nebulización / válvula reguladora inoperante / boquillas obstruidas / compresor defectuoso	\$4.200.000	\$19.500.000	\$15.300.000	3,6	Monitoreo ambiental (partículas); mantenimiento de nebulización; mantenimiento preventivo compresor y reemplazo boquillas	Reparación/reemplazo de compresor; limpieza y sustitución de boquillas; intervención de emergencia

Tabla 30.

Comparación de costos reactivos vs. proactivos en sistema eléctrico

No.	Modo de falla	Proactivo (COP)	Reactivo (COP)	Ahorro (COP)	Retorno de la inversión (ROI)	Acciones proactivas	Acciones reactivas
1	Interrupción total en la red de alimentación / falla en generador o transformador / fusibles abiertos	\$9.000.000	\$30.000.000	\$21.000.000	2,3	Redundancia en suministro crítico; pruebas periódicas de protecciones; mantenimiento predictivo en generadores; inventario de fusibles críticos	Reemplazo de transformador o generador; intervención de emergencia y reconfiguración de redes; parada completa

No.	Modo de falla	Proactivo (COP)	Reactivo (COP)	Ahorro (COP)	Retorno de la inversión (ROI)	Acciones proactivas	Acciones reactivas
2	Mal contacto en bornes / Sulfatación en terminales / Fallo de contactores desgastados	\$4.000.000	\$15.300.000	\$11.300.000	2,8	Inspecciones periódicas de bornes; limpieza y protección anticorrosiva; termografía preventiva; reemplazo programado de contactores	Reemplazo de contactores; reparación de tableros; corte y desmontaje de bornes; posibles incendios localizados
3	Cortos parciales por aislamiento deteriorado / Relés defectuosos / Fluctuaciones en grupo electrógeno	\$4.500.000	\$15.000.000	\$10.500.000	2,3	Pruebas dieléctricas periódicas; calibración y mantenimiento de relés; mantenimiento preventivo grupo electrógeno; inspección de aislamientos	Reemplazo de relés; reparación de aislamiento; intervención en grupo electrógeno; paros para pruebas
4	Desbalance de fases / Sobrecarga en el sistema / Transformador deficiente	\$5.000.000	\$40.000.000	\$35.000.000	7,0	Monitoreo en línea de corriente/tensión; protecciones térmicas; balanceo de cargas; mantenimiento preventivo transformador	Reparación/rehabilitación de transformador; redistribución de cargas; rectificación de daños en motores
5	Cables sobrecalentados / Derivaciones a tierra / Fallo en dispositivos de protección	\$3.500.000	\$4.000.000	\$500.000	0,1	Inspección termográfica de tableros; pruebas de aislamiento; revisión y mantenimiento de dispositivos de protección; corrección de canalizaciones	Reemplazo de tramos de cable; reparación de derivaciones a tierra; intervención para apagar incendios eléctricos
6	Fusible fundido en tablero / Corte en	\$2.800.000	\$3.000.000	\$200.000	0,1	Inventario y reemplazo preventivo de fusibles críticos;	Reemplazo urgente de fusibles; puesta en marcha de

No.	Modo de falla	Proactivo (COP)	Reactivo (COP)	Ahorro (COP)	Retorno de la inversión (ROI)	Acciones proactivas	Acciones reactivas
	alimentación secundaria / Fuente defectuosa					pruebas de continuidad; pruebas de respaldo	fuentes auxiliares; intervención en alimentación secundaria
7	Falla en contactores de arranque / Bobinado de motor en cortocircuito / Protección térmica activada	\$5.500.000	\$59.000.000	\$53.500.000	9,7	Monitoreo térmico de motores; análisis predictivo (pruebas eléctricas); reemplazo programado de contactores	Reemplazo de contactores; reparación/rebobinado de motor; paro en ventilación y bombas
8	Sobrecarga prolongada / Cables de sección inadecuada / Conexiones flojas	\$4.200.000	\$7.000.000	\$2.800.000	0,7	Diseño correcto de secciones; inspecciones de torque; alarmas de sobrecarga; protección de circuito	Reemplazo de cables; reparación de conexiones; intervención por daños térmicos
9	Aislamiento dañado / Conductor en contacto con chasis / Humedad en gabinetes	\$3.200.000	\$9.000.000	\$5.800.000	1,8	Pruebas de aislamiento periódicas; control de humedad en gabinetes; sellado y deshumidificación; inspecciones	Reparación de aislamiento; secado y sellado de gabinetes; posible reemplazo de componentes afectados
10	Disyuntor trabado / Curva mal calibrada / Relé de protección defectuoso	\$3.000.000	\$11.000.000	\$8.000.000	2,7	Pruebas periódicas de disparo; calibración y certificación de relés y disyuntores; mantenimiento preventivo de protecciones	Cambio o recalibración de disyuntor/relé; intervención de protección; re-verificación de coordinación
11	Carga desajustada en fases / Rotura de fusible / Conexiones defectuosas en barra trifásica	\$3.800.000	\$5.000.000	\$1.200.000	0,3	Balaneo de cargas; pruebas de fusibles y protecciones; inspección visual de barras y conectores	Corrección de cargas; reemplazo de fusibles; reparación de barra y conexiones

4.11 Selección de tareas

Proceso sistemático dentro de la metodología RCM mediante el cual se determinan las actividades de mantenimiento más adecuadas para prevenir, detectar o mitigar fallas funcionales, considerando la criticidad del modo de falla, la probabilidad de ocurrencia, los costos del ciclo de vida del activo y la seguridad operacional. (Ortiz, 2024).

4.11.1 Tareas, frecuencias y recursos

La selección de tareas dentro de la metodología de RCM responde a la necesidad de garantizar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, aplicando acciones específicas que permitan controlar la ocurrencia de las fallas funcionales. Para ello, se consideran los distintos tipos de tareas de mantenimiento, los cuales pueden agruparse en siete categorías: monitoreo en línea, análisis de condición, recuperación de condición, cambio de partes, búsqueda de fallas, operar hasta la falla y cambio de diseño. (Ortiz, 2024).

Figura 13.*Tipos de tareas de mantenimiento*

1.	Monitoreo en línea.	(Continuous on-condition task)
2.	Análisis de condición.	(Scheduled on-condition task)
3.	Recuperar condición.	(Scheduled restoration task)
4.	Cambio de partes.	(Scheduled replacement o discard task)
5.	Búsqueda de fallas.	(Scheduled function test)
6.	Operar hasta que falle.	(Run to failure)
7.	Cambio de diseño.	(Redesign)

Nota. Tomado de: Curso RCM – Daniel Ortiz Plata 2024.

Cada tarea seleccionada debe estar justificada en función de la criticidad del modo de falla, la probabilidad de ocurrencia, los costos asociados y la seguridad operacional. La frecuencia se establece a partir de criterios técnicos como:

Horas de operación.

Intervalos de inspección recomendados por el fabricante

Evidencia de desempeño en campo (histórico de fallas y reparaciones)

Factores de riesgo ambiental y de seguridad.

En cuanto a los recursos se consideran:

Recurso humano: Personal especializado en mecánica, hidráulica, eléctrica o electrónica.

Recursos materiales: Repuestos, kits de mantenimiento, lubricantes, filtros, sensores, consumibles.

Recursos tecnológicos: Herramientas de diagnóstico predictivo (termografía, análisis de aceite, vibraciones, pruebas eléctricas).

Tiempo de intervención: Programado en paradas preventivas o correctivas, con coordinación logística para reducir indisponibilidad.

De esta manera, las tareas de mantenimiento seleccionadas para el Jumbo S1D no se aplican de manera genérica, sino que se definen con base en la evaluación del modo de falla, sus consecuencias y la estrategia más costo-efectiva para mitigarlo.

Tabla 31.

Tareas de mantenimiento en sistema de perforación

No.	Modo de falla	Tarea de mantenimiento	Descripción	Frecuencia	Recursos
1	Bloqueo deslizador / juego guías	Lubricación programada de guías, verificación de holguras y reemplazo de guías con desgaste fuera de tolerancia.	Engrase, ajuste y reemplazo preventivo de guías.	10 h de percusión	Grasera, calibrador desgaste, técnicos mecánicos
2	Obstrucción líneas agua / mezcla	Limpieza y purga de líneas, inspección de filtros, sustitución de mangueras	Lavado y purga programada de líneas.	50 h de percusión	Insumos limpieza, bombas purga.
3	Desgaste broca / obstrucción agua	Monitoreo de caudal y presión del sistema de agua; limpieza de boquillas y filtros; reemplazo de brocas desgastadas.	Monitoreo caudal/presión agua; limpieza y purga preventiva.	100 h de percusión	Bombas purga, equipo caudalímetro, laboratorio agua
4	Pérdida impacto / fractura broca	Inspección de integridad de brocas, rotación periódica, reemplazo planificado y overhaul de martillo neumático/hidráulico.	Rotación/reemplazo de brocas y overhaul del martillo.	200 h de percusión	Stock de brocas, banco inspección, técnico de martillo

No.	Modo de falla	Tarea de mantenimiento	Descripción	Frecuencia	Recursos
5	Cavitación / pérdida presión	Pruebas de estanqueidad, inspección de bombas, verificación de niveles de fluidos y cambio preventivo de filtros.	Pruebas de succión, control de niveles, limpieza de filtros.	200 h de percusión	Equipo de vacío/prueba, análisis hidráulico, técnico
6	Desbalance / sujeción broca	Medición de torque en portabrocas, ajuste de sujeción, reemplazo de componentes desbalanceados o deformados.	Control de torque en portabrocas y reemplazo de componentes.	600 h de percusión	Llaves dinamométricas, indicadores vibración, técnico mecánico
7	Atasco martillo / fuga aceite	Sustitución de kits de sellos del martillo, análisis de aceite, revisión de cilindros y pruebas de estanqueidad en líneas.	Reemplazo programado de kits de martillo y análisis de aceite.	600 h de percusión	Kits 600h, sellos, equipo muestreo aceite, técnico hidráulico
8	Golpes intermitentes / válvulas	Calibración de válvulas de control, inspección funcional en banco de pruebas, limpieza de asientos y reemplazo en caso de desgaste.	Prueba funcional y calibración de válvulas; inspección y limpieza.	600 h de percusión	Equipo de prueba, técnico hidráulico, banco de calibración
9	Pérdida progresiva presión hidráulica	Monitoreo de presión/caudal, análisis de partículas en aceite, reemplazo de filtros y verificación de fugas externas e internas.	Monitoreo presión/caudal; análisis de aceite y cambio filtros.	600 h de percusión	Sensores presión/caudal, laboratorio aceite, stock filtros
10	Deficiencia refrigeración / sobrepresión	Limpieza y/o reemplazo de radiadores y filtros, inspección de ventiladores, monitoreo de temperatura y termografía.	Limpieza/cambio radiadores y filtros; monitoreo temperatura.	600 h de percusión	Equipo limpieza radiador, sensores temperatura, repuestos

No.	Modo de falla	Tarea de mantenimiento	Descripción	Frecuencia	Recursos
11	Falla avance / rotura anclaje (crítica)	Ensayos no destructivos (líquidos penetrantes), lubricación preventiva, y reemplazo programado de anclajes.	Inspección no destructiva, lubricación y reemplazo de anclajes.	1200 h de percusión	Equipo de ensayo no destructivo, repuestos estructurales
12	Rotura parcial de barra / desbalance	Medición de torque, inspección dimensional y reemplazo planificado de barras según vida útil establecida.	Control de torque y reemplazo programado de barras.	1200 h de percusión	Instrumental vibraciones, torque, stock de barras
13	Falla motor rotación / transmisión	Análisis de vibraciones y termografía, control de alineación, inspección de engranajes, y overhaul de motor según horas acumuladas.	Análisis vibraciones y termografía; overhaul planificado.	1200 h de percusión	Analizador vibraciones, cámara termográfica, taller mecánico

Tabla 32.*Tareas de mantenimiento en sistema hidráulico*

No.	Modo de falla	Tarea de mantenimiento	Descripción	Frecuencia	Recursos
1	Fisuras en tanque / sellos dañados / mangueras reventadas	Inspección visual fugas, control torque bridas	Inspección tanque y conexiones; torque controlado en bridas; cambio sellos	50 h de percusión	Técnico, torquímetro, kit de sellos
2	Rotura eje bomba / desacople / válvula alivio trabada	Inspección acoplamiento y alineación, limpieza de succión y prueba válvula alivio	Revisar estado de acoplamiento, alineación bomba-motor; limpiar línea de succión; probar apertura/cierre de válvula	100 h de percusión	Técnico mecánico, kit de alineación, manómetros, EPP

No.	Modo de falla	Tarea de mantenimiento	Descripción	Frecuencia	Recursos
3	Sellos en bridas / mangueras agrietadas	Recambio mangueras, inspección conexiones, control torque racores	Revisar fugas en uniones; sustituir mangueras dañadas; verificar torque en racores	100 h de percusión	Técnico, mangueras de repuesto, torquímetro, kit de sellos
4	Cavitación / válvulas contaminadas	Revisión sellos succión, cambio filtros, monitoreo vibración	Revisar fugas de aire en succión, realizar prueba de vacío; sustituir filtros hidráulicos; control de vibración bomba	200 h de percusión	Técnico mantenimiento, equipo medición vibración, filtros hidráulicos
5	Intercambiador obstruido / termostática trabada	Limpieza de intercambiador, inspección termostática	Limpieza externa e interna; revisión apertura/cierre válvula termostática; control temperatura sistema	200 h de percusión	Mecánico, cepillo/aire a presión, termómetro infrarrojo
6	Desgaste bomba / fugas internas / colapso manguera	Cambio preventivo mangueras, análisis aceite, prueba caudal/presión	Sustituir mangueras; análisis aceite; medir caudal y presión bomba	300 h de percusión	Mecánico, análisis de laboratorio, kit hidráulico, mangueras de repuesto
7	Filtros saturados / ingreso partículas	Cambio filtros periódicos e inspección respiraderos	Sustituir filtros según horas de servicio; limpiar respiraderos de tanque; asegurar montaje correcto	300 h de percusión	Técnico, filtros nuevos, kit limpieza
8	Acumulador baja precarga / diafragma roto	Verificación precarga, prueba hidráulica, limpieza conexiones	Medir precarga con nitrógeno; realizar prueba funcional acumulador; limpieza racores	300 h de percusión	Técnico, manómetro precarga, cilindro N2, kit hidráulico
9	Válvulas direccionales obstruidas / spool desgastado	Análisis contaminación aceite, mantenimiento	Tomar muestra de aceite, verificar desgaste interno válvulas; cambio	300 h de percusión	Análisis de laboratorio, técnico hidráulico, kit sellos

No.	Modo de falla	Tarea de mantenimiento	Descripción	Frecuencia	Recursos
		válvulas, cambio sellos cilindros	sellos en cilindros hidráulicos		
10	Válvula de alivio trabada / resorte roto	Prueba periódica válvulas, inspección y calibración	Ensayo funcional de válvula de alivio; calibración presión apertura; inspección resortes y asientos	600 h de percusión	Técnico hidráulico, banco pruebas válvulas, manómetros calibrados

Tabla 33.

Tareas de mantenimiento en sistema aire-agua (watermist).

No.	Modo de falla	Tarea de mantenimiento	Descripción	Frecuencia	Recursos
1	Sellos de juntas deteriorados / mangueras agrietadas / racores flojos	Inspección visual diaria de juntas y mangueras; torque controlado conexiones; cambio preventivo sellos	Recorrer líneas verificando fugas; aplicar torque adecuado; sustituir sellos desgastados	10 h de percusión	Técnico, torquímetro, kit sellos/mangueras
2	Obstrucción boquillas / caudal insuficiente / filtro en línea obstruido / válvula reguladora defectuosa	Inspección y limpieza boquillas; verificación de caudal; mantenimiento de bombas y válvulas	Retirar, limpiar y calibrar boquillas; verificar flujo uniforme; limpieza de filtros en línea	20 h de percusión	Mecánico/técnico, ultrasonido limpieza, repuestos boquillas, kit de filtros
3	Obstrucción total en línea principal / válvula control cerrada o trabada / rotura manguera principal / falla en bomba o compresor	Revisiones integridad de líneas y bombas; pruebas funcionales periódicas; limpieza de succión; redundancia en suministro crítico	Inspeccionar líneas principales y válvulas; verificar presión y caudal de bomba/compresor; limpiar succión y válvulas críticas	100 h de percusión	Técnico mecánico e hidráulico, manómetros kit de limpieza

No.	Modo de falla	Tarea de mantenimiento	Descripción	Frecuencia	Recursos
4	Insuficiencia caudal para supresión / fugas en nebulización / boquillas obstruidas	Monitoreo permanente caudal y presión; mantenimiento preventivo boquillas y compresor	Revisión y prueba de caudal en red; cambio preventivo de boquillas; inspección de compresor	100 h de percusión	Técnico, manómetros, compresor backup, boquillas nuevas
5	Baja presión intermitente en compresor / válvula neumática defectuosa / incrustaciones desprendidas / regulador defectuoso	Mantenimiento programado compresor y válvulas neumáticas; prueba de sellado y monitoreo presión	Verificar hermeticidad conexiones, válvulas y compresor; calibrar regulador de presión	200 h de percusión	Técnico neumático, kit calibración, compresor de respaldo
6	Filtro obstruido / incrustaciones en ductos / desgaste válvula control	Programa de reemplazo de filtros y limpieza ductos; control calidad del agua	Sustituir filtros según ciclo de horas; limpiar ductos de alimentación; análisis fisicoquímico del agua	300 h de percusión	Técnico, filtros nuevos, equipo limpieza ductos, laboratorio agua
7	Desajuste válvula mezcladora / defecto regulador de caudal	Calibración periódica válvula mezcladora y regulador	Ajuste en banco de pruebas; verificación exactitud mezcla agua-aire; ensayo funcional de válvula	300 h de percusión	Técnico, banco pruebas válvulas, manómetros calibrados
8	Obstrucción por sedimentos / incrustaciones / oxidación interna / boquilla dañada	Programa limpieza químico-mecánica; recambio preventivo boquillas	Lavado con desincrustantes; sustitución de boquillas; control agua	300 h de percusión	Técnico, solución desincrustante, boquillas nuevas
9	Obstrucción interna válvulas	Pruebas funcionales	Ensayo apertura/cierre	600 h de percusión	Técnico hidráulico,

No.	Modo de falla	Tarea de mantenimiento	Descripción	Frecuencia	Recursos
	de retención / resorte roto	válvulas de retención; inspección resortes	válvulas; inspección de resortes y cambio por fatiga		banco prueba válvulas, kit resortes

Tabla 34.*Tareas de mantenimiento en sistema eléctrico*

No.	Modo de falla	Tarea de mantenimiento	Descripción	Frecuencia	Recursos
1	Desbalance de fases / sobrecarga en sistema / transformador deficiente	Monitoreo corriente/tensión; balanceo cargas	Instalación de medidores permanentes, revisión termográfica, ajuste distribución cargas	100 h de percusión	Técnico electricista, medidor portátil, software monitoreo
2	Fusible fundido en tablero / corte alimentación secundaria	Inventario y reemplazo fusibles críticos; pruebas continuidad	Revisión preventiva fusibles, pruebas continuidad en líneas secundarias	100 h de percusión	Técnico electricista, multímetro, fusibles de repuesto
3	Mal contacto en bornes / sulfatación en terminales	Limpieza y protección anticorrosiva de bornes; inspección con termografía	Retiro de sulfatación, aplicación de grasa dieléctrica, detección puntos calientes	200 h de percusión	Técnico electricista, limpiador dieléctrico, grasa dieléctrica
4	Carga desajustada en fases / conexiones defectuosas	Balanceo cargas; inspección visual barras y conectores	Medición cargas trifásicas; corrección conexiones flojas; cambio de fusibles	200 h de percusión	Técnico eléctrico, pinza amperimétrica, fusibles de repuesto
5	Interrupción total en red de alimentación / falla en	Pruebas periódicas de protecciones; mantenimiento predictivo en	Ensayos funcionales de protecciones, inspección	300 h de percusión	Técnico electricista, multímetro, cámara

No.	Modo de falla	Tarea de mantenimiento	Descripción	Frecuencia	Recursos
	generador o transformador	generadores y transformadores; inventario de fusibles críticos	termográfica de transformadores, revisión estado generador		termográfica, fusibles de repuesto
6	Cortos por aislamiento deteriorado / relés defectuosos	Pruebas dieléctricas; calibración y mantenimiento de relés	Inspección aislamiento de cables y relés de protección, mantenimiento grupo electrógeno	300 h de percusión	Técnico electricista, megóhmetro, equipo de calibración relés
7	Cables sobrecalentados / derivaciones a tierra	Inspección termográfica de tableros; revisión aislamiento; dispositivos protección	Detección cables calientes con cámara IR, revisión dispositivos de protección y conexiones	300 h de percusión	Técnico electricista, cámara IR, destornilladores dinamométricos
8	Falla en contactores de arranque / bobinado motor en cortocircuito	Monitoreo térmico de motores; mantenimiento predictivo (pruebas eléctricas); reemplazo programado contactores	Termografía motores, pruebas resistencia de aislamiento, cambio programado contactores de potencia	300 h de percusión	Técnico electricista, cámara IR, megóhmetro, contactores de repuesto
9	Aislamiento dañado / humedad en gabinetes	Pruebas aislamiento periódicas; sellado/deshumidificación gabinetes	Ensayo aislamiento con megóhmetro; aplicación de selladores; instalación deshumidificadores	300 h de percusión	Técnico electricista, megóhmetro, silicona selladora, deshumidificador
10	Sobrecarga prolongada / cables de sección inadecuada / conexiones flojas	Revisión secciones de conductores; inspección de conexiones; alarma sobrecarga	Evaluar calibre de cables; inspección de bornes con torque controlado; instalación alarma térmica	600 h de percusión	Técnico electricista, torquímetro eléctrico, conductores

No.	Modo de falla	Tarea de mantenimiento	Descripción	Frecuencia	Recursos
11	Disyuntor trabado / relé defectuoso	Pruebas periódicas disparo; calibración y certificación relés/disyuntores	Simulación fallas para disparo automático; calibración en banco pruebas; reemplazo preventivo	1200 h de percusión	Técnico electricista, equipo calibración, banco pruebas

4.12 Implementación

La implementación de la estrategia de RCM constituye la fase crítica que transforma los resultados del análisis en acciones prácticas aplicables al mantenimiento de la flota de equipos de perforación.

Este proceso requiere la integración de recursos humanos, tecnológicos y organizacionales, garantizando que el modelo sea sostenible en el tiempo y genere beneficios tangibles en términos de confiabilidad, disponibilidad y seguridad (Ortiz, 2024).

4.12.1 Planeación y alineación estratégica

La planeación constituye la base del éxito en la implementación. Es indispensable integrar el RCM como parte del sistema de gestión de mantenimiento, evitando que se perciba únicamente como un proyecto aislado. En este sentido, los objetivos deben alinearse con la misión, visión y metas operativas de la empresa. Asimismo, resulta fundamental establecer planes de acción en diferentes horizontes temporales (corto, mediano y largo plazo), respaldados con indicadores de gestión que permitan evaluar la efectividad de la implementación (Moubray, 1997; Ortiz, 2024).

4.12.2 Participación y gestión del talento humano

El éxito del RCM depende de la conformación de un equipo interdisciplinario compuesto por técnicos de mantenimiento, operadores, especialistas de proceso e ingeniería. A su vez, se requiere diseñar un plan de formación y capacitación que cierre las brechas de competencias y garantice la apropiación metodológica por parte del personal. La construcción de una cultura de confiabilidad, que articule el conocimiento tácito (experiencia del personal) con el conocimiento explícito (procedimientos, instructivos y normativas), se convierte en un factor clave para la sostenibilidad (Ortiz, 2024).

4.12.3 Definición y formalización de procesos

La implementación exige la documentación de procedimientos internos que aseguren la estandarización y eviten desviaciones metodológicas. De igual forma, las tareas de mantenimiento preventivo, predictivo e inspecciones deben integrarse en el ERP corporativo (DMS Advance).

La claridad en los roles y responsabilidades en cada etapa del ciclo de planeación, ejecución y control fortalece la transparencia y la trazabilidad de las acciones (Campbell & Jardine, 2001).

4.12.4 Soporte tecnológico y sistemas de información

Un soporte tecnológico adecuado garantiza la sostenibilidad del RCM. Para ello se contará con el ERP con el que cuenta la compañía, que ha resultado confiable dado que permite registrar, analizar y retroalimentar los resultados. Los datos críticos para la toma de decisiones (MTBF, MTTR) deben estar alineados con los registros del ERP.

Además, la adopción de técnicas predictivas, como la termografía, el análisis de vibraciones, el ultrasonido, el análisis de aceites y las pruebas eléctricas, se convierte en un pilar para la optimización de la programación de tareas.

4.12.5 Monitoreo, seguimiento y mejora continua

La efectividad de la implementación depende del monitoreo permanente mediante indicadores clave de desempeño (KPIs) como la disponibilidad operacional, la proporción de mantenimiento proactivo vs. reactivo, los costos de mantenimiento y el retorno sobre la inversión (ROI). Finalmente, la mejora continua requiere la optimización periódica del plan de mantenimiento, eliminando tareas de bajo valor y fortaleciendo las técnicas predictivas de mayor impacto (Ortiz, 2024; Moubray, 1997).

4.12.6 Indicadores de gestión: MTBF y MTTR.

El seguimiento y control de la efectividad del plan de mantenimiento se realizará a través de indicadores cuantitativos que permitan medir el desempeño de los equipos y la eficiencia de la

estrategia implementada. Entre los más relevantes se encuentran el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF, por sus siglas en inglés) y el Tiempo Medio Para Reparar (MTTR, por sus siglas en inglés), ambos reconocidos en la literatura como métricas fundamentales en la gestión de confiabilidad y mantenibilidad (Moubray, 1997).

Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF): Indicador de confiabilidad, utilizado para medir el tiempo promedio de operación que transcurre entre una falla y la siguiente. Un valor alto de MTBF refleja equipos más confiables y, por tanto, un menor número de paradas no planificadas.

$$MTBF = T_{op} / N_f$$

Donde:

T_{op} = Tiempo total de operación del equipo (horas).

N_f = Número de fallas ocurridas en el período de observación.

Tiempo Medio Para Reparar (MTTR): Indicador de mantenibilidad, que mide el tiempo promedio requerido para restaurar un equipo a su estado operativo tras una falla. Un valor bajo de MTTR refleja mayor eficiencia en los procesos de diagnóstico, reparación y puesta en marcha.

$$MTBF = T_m / N_r$$

Donde:

T_m = Tiempo total de mantenimiento correctivo (horas).

N_r = Número de reparaciones realizadas.

4.12.6.1 Aplicación en el plan de mantenimiento. El MTBF permitirá evaluar la efectividad de las tareas proactivas (preventivas y predictivas) en la reducción de la frecuencia de fallas. El MTTR reflejará la capacidad de respuesta del equipo de mantenimiento y la eficiencia en la ejecución de reparaciones.

Ambos indicadores se integrarán, alimentando reportes periódicos y facilitando la toma de decisiones para la mejora continua del plan.

De esta manera, la medición sistemática de MTBF y MTTR servirá como una herramienta para verificar si la implementación del RCM en los equipos Jumbo Epiroc Boomer S1D cumple con el objetivo de incrementar la confiabilidad y disponibilidad operativa, alineándose con los principios de la gestión de activos y la norma ISO 55000.

4.12.7 Alcance de la implementación

La implementación del RCM en los equipos Jumbo Epiroc Boomer S1D debe entenderse como un proceso sistémico, formal y sostenible, orientado a fortalecer la gestión de mantenimiento de la organización. El éxito dependerá de la articulación entre personas, procesos y tecnología, así como del compromiso de la alta dirección. De esta manera, los resultados del análisis RCM se transformarán en una estrategia práctica capaz de generar incrementos verificables en confiabilidad, disponibilidad y seguridad operativa (Smith & Hawkins, 2004).

5. Análisis y proyección de costos de mantenimiento

La gestión de costos en mantenimiento constituye un elemento esencial dentro de la estrategia RCM, pues permite evaluar el impacto financiero de las decisiones técnicas y establecer planes de sostenibilidad en la gestión de activos. Se deben desarrollar los conceptos, clasificaciones, metodologías y proyecciones de costos de mantenimiento aplicados a la flota de

equipos de perforación Jumbo Epiroc Boomer S1D de la empresa ESTYMA S.A., comparando los enfoques proactivo y reactivo.

5.1 Conceptualización de los costos de mantenimiento.

Los costos de mantenimiento se definen como el conjunto de recursos financieros invertidos para garantizar la confiabilidad, disponibilidad y seguridad de los activos durante su ciclo de vida (Campbell & Jardine, 2001). Estos incluyen gastos directos como repuestos, mano de obra y herramientas, así como costos indirectos asociados a pérdidas de producción, incumplimiento de metas de perforación, riesgos de seguridad, impacto al medio ambiente y afectaciones a la reputación corporativa.

En el contexto de RCM, la correcta identificación y control de los costos permiten demostrar la rentabilidad de las intervenciones proactivas frente a las consecuencias económicas del mantenimiento reactivo (Moubray, 1997).

5.2 Costos del mantenimiento reactivo vs proactivo

El mantenimiento reactivo, aunque puede parecer más económico en el corto plazo, concentra los mayores costos ocultos al generar paradas imprevistas, daños colaterales y riesgos de seguridad. En contraste, el mantenimiento proactivo distribuye los costos de manera programada, disminuyendo los impactos económicos por indisponibilidad (Moubray, 1997).

Estudios comparativos han demostrado que la adopción de un enfoque proactivo reduce entre un 30% y un 50% los costos totales de mantenimiento en industrias intensivas en equipos, gracias a la disminución de fallas catastróficas y la extensión de la vida útil de los activos (Bevilacqua & Braglia, 2000).

5.2.1 Análisis comparativos de costos en cada sistema seleccionado

Teniendo en cuenta lo desarrollado en el capítulo 3, específicamente en el apartado 0. “Comparación de costos entre mantenimientos reactivos y proactivos”, se elaboraron una serie de tablas por cada sistema, en las cuales se detallan los modos de falla identificados, los costos estimados de intervención bajo un enfoque reactivo y proactivo, así como el respectivo cálculo del retorno sobre la inversión (ROI).

Los valores consignados en estas tablas fueron obtenidos a partir de históricos de mantenimiento de la organización, referencias de catálogos de fabricantes, cotizaciones de proveedores y demás herramientas de estimación económica, lo que garantiza una aproximación confiable y representativa de la realidad operacional.

El análisis comparativo evidencia que la estrategia proactiva, si bien requiere una mayor inversión inicial en planificación, recursos técnicos y actividades de control, genera beneficios económicos y operativos significativos en el mediano y largo plazo. Entre estos beneficios destacan la reducción de fallas críticas, la disminución de paradas no programadas, el incremento de la disponibilidad de los equipos y una optimización del ciclo de vida de los activos, confirmando la superioridad del enfoque proactivo frente al reactivo en términos de costo-efectividad y sostenibilidad.

Para sustentar el análisis comparativo entre mantenimiento reactivo y proactivo, es necesario recurrir a métricas cuantitativas que permitan medir el impacto financiero de cada enfoque. En este estudio se destacan dos: el porcentaje de ahorro, que muestra la eficiencia en el uso de recursos, y el retorno sobre la inversión (ROI), que evidencia la rentabilidad de implementar acciones proactivas. Las fórmulas empleadas se presentan a continuación:

$$\% \text{ de Ahorro} = \left(\frac{\text{Costo}_{\text{Reactivo}} - \text{Costo}_{\text{Proactivo}}}{\text{Costo}_{\text{Reactivo}}} \right) \times 100$$

$$\text{ROI} = \frac{\text{Ahorro}}{\text{Costo}_{\text{Proactivo}}}$$

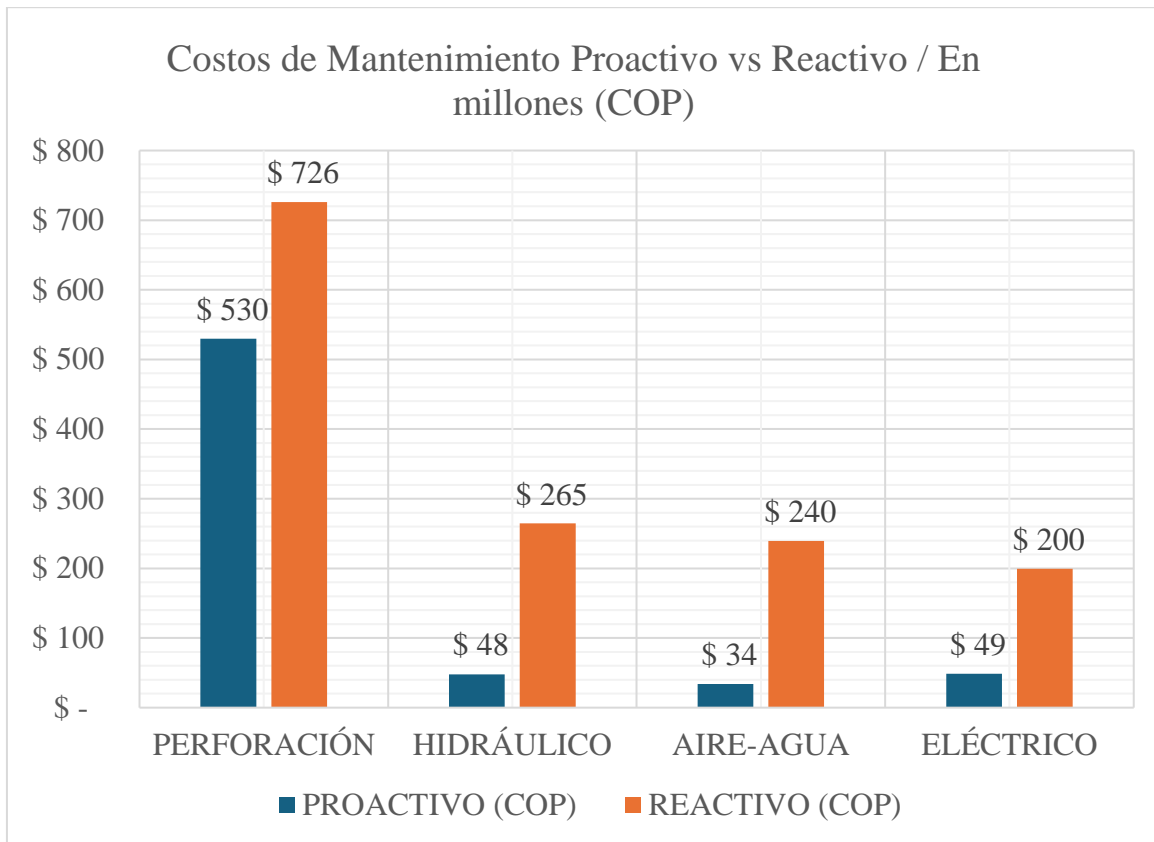
Tabla 35.

Comparación de costos de mantenimiento proactivo vs reactivo por sistema

Sistema	Proactivo (COP)	Reactivo (COP)	Ahorro (COP)	% de ahorro	ROI
Perforación	\$ 529.630.000	\$ 726.000.000	\$ 196.370.000	27%	0,37
Hidráulico	\$ 47.900.000	\$ 264.500.000	\$ 216.600.000	82%	4,52
Aire-agua	\$ 33.900.000	\$ 239.500.000	\$ 205.600.000	86%	6,06
Eléctrico	\$ 48.500.000	\$ 199.500.000	\$ 151.000.000	76%	3,11

Figura 14.

Comparación de costos de mantenimiento proactivo vs reactivo por sistema



El análisis comparativo de costos demuestra de manera cuantitativa que la adopción de estrategias de mantenimiento proactivo, enmarcadas dentro de la metodología RCM, representa una alternativa significativamente más eficiente y rentable que la práctica reactiva. Tal como se evidencia en la tabla, los sistemas evaluados alcanzan porcentajes de ahorro entre 27% y 86%, y un ROI que oscila entre 0.37 y 6.06, lo cual refleja que, por cada peso invertido en actividades proactivas, se generan retornos económicos que multiplican varias veces la inversión inicial.

Estos resultados permiten concluir que, aunque el mantenimiento proactivo exige un esfuerzo mayor en planificación, monitoreo y gestión de recursos, sus beneficios superan

ampliamente los costos asociados, no solo en términos financieros, sino también en confiabilidad, disponibilidad y seguridad operacional.

La evidencia presentada constituye, por tanto, un argumento sólido para la alta dirección, ya que confirma que la implementación de RCM no debe considerarse un gasto adicional, sino una inversión estratégica que garantiza sostenibilidad y competitividad en los proyectos de perforación minera y vial.

6. Plan de mantenimiento basado en RCM

El plan de mantenimiento derivado del análisis RCM aplicado a los equipos de perforación tipo Jumbo Epiroc Boomer S1D, pertenecientes a la flota de la empresa ESTYMA S.A., se fundamenta en los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, donde se identificaron los modos de falla críticos de los sistemas seleccionados y se evaluaron sus consecuencias funcionales y operacionales.

El objetivo principal es establecer un conjunto estructurado de tareas de mantenimiento preventivo, predictivo y de monitoreo de condición, alineadas con las necesidades reales de operación, que permitan aumentar la confiabilidad y disponibilidad operacional, reducir la frecuencia de fallas imprevistas y asegurar la continuidad productiva bajo condiciones de seguridad.

6.1 Enfoque metodológico

El plan de mantenimiento fue diseñado siguiendo los lineamientos metodológicos del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, que permite seleccionar las actividades de mantenimiento de acuerdo con la naturaleza de los modos de falla y sus consecuencias. El procedimiento adoptado comprende las siguientes etapas:

Identificación de funciones y fallas funcionales de los sistemas seleccionados.

Determinación de modos de falla más relevantes mediante el análisis FMEA desarrollado en el capítulo anterior.

Evaluación de consecuencias de falla (seguridad, disponibilidad, impacto económico).

Selección de tareas de mantenimiento aplicables, clasificadas como:

Preventivas: Tareas programadas que buscan evitar la ocurrencia de la falla a través de reemplazos, ajustes, limpiezas o calibraciones sistemáticas.

Predictivas: Actividades de diagnóstico y análisis que permiten anticipar la evolución de una falla mediante técnicas de monitoreo, medición o ensayos.

De monitoreo de condición: Inspecciones periódicas destinadas a detectar síntomas incipientes de deterioro, de modo que la intervención se realice solo cuando sea estrictamente necesaria.

Definición de frecuencias, responsables y criterios de intervención, estructurados en un plan formal.

La combinación de estas estrategias asegura un plan balanceado, en el cual las tareas no son excesivas ni redundantes, sino ajustadas a los riesgos y criticidad de cada modo de falla. De

esta forma se logra incrementar la confiabilidad de los equipos, optimizar los recursos y reducir los costos de indisponibilidad.

6.2 Desarrollo del plan de mantenimiento

El plan se organiza en cuatro apartados, correspondientes a los sistemas críticos seleccionados:

Sistema de perforación.

Sistema hidráulico.

Sistema aire – agua (watermist).

Sistema eléctrico.

6.2.1 Frecuencia de ejecución

La programación de las tareas de mantenimiento debe establecerse en función del tiempo efectivo de operación del equipo, el cual se controla a través del contador de horas del martillo o perforadora. Dicho parámetro constituye la referencia más confiable para determinar los intervalos de intervención, dado que refleja de manera directa la intensidad de uso y el desgaste asociado a los componentes.

En consecuencia, las actividades de mantenimiento preventivo, predictivo y de monitoreo de condición se organizan siguiendo una secuencia escalonada de frecuencias, que incluye inspecciones diarias, intervenciones semanales, revisiones mensuales y mantenimientos mayores cada cierto número de horas acumuladas de operación. Esta estructuración permite garantizar la

detección oportuna de fallas incipientes, la reposición sistemática de componentes críticos y la preservación de la confiabilidad global del sistema de perforación.

Tabla 36.

Frecuencia o intervalos de ejecución

Rutina	Frecuencia	Unidad de medida
A	10	h
A1	20	h
A2	50	h
B	100	h
B1	200	h
B2	300	h
C	600	h
D	1200	h

Se debe considerar que las rutinas de mantenimiento están estructuradas de manera jerárquica y acumulativa, de tal forma que cada nivel superior comprende las actividades definidas en los niveles precedentes. En este sentido, la rutina A constituye el conjunto básico de tareas iniciales; la rutina A1 incluye las de A, más sus propias intervenciones adicionales; la rutina A2 incorpora las tareas de A1 y así sucesivamente hasta llegar a la rutina D, la cual engloba todas las actividades establecidas en las rutinas previas.

Este enfoque secuencial permite asegurar que, al ejecutar una rutina de mayor intervalo (por ejemplo, 1200 h), se garantice también el cumplimiento de las inspecciones y mantenimientos menores (10 h, 20 h, 50 h, etc.), evitando omisiones y consolidando un esquema integral de preservación del equipo.

6.2.2 Descripción de rutinas

El diseño de las rutinas se fundamenta en un enfoque progresivo, jerárquico y acumulativo, de manera que cada intervalo superior incorpora de forma sistemática las actividades definidas en los intervalos precedentes, adicionando nuevas tareas orientadas a un mayor nivel de inspección, sustitución de elementos y/o verificación funcional.

Esta estructura metodológica asegura la cobertura integral de los modos de falla identificados en el análisis RCM, optimizando la disponibilidad, la confiabilidad y la vida útil de los sistemas críticos.

Tabla 37.

Generalidades de las rutinas establecidas

Rutina	Frecuencia (horas)	Alcance técnico
A	10	Actividades básicas de inspección visual y lubricación. Verificación diaria del estado general del equipo, niveles de fluidos y condiciones de seguridad.
A1	20	Verificaciones de conexiones, ajustes menores y chequeo funcional de sistemas operativos.
A2	50	Inspecciones detalladas de componentes de desgaste, limpieza de filtros y comprobación de parámetros de operación.
B	100	Ajustes de torque, cambios parciales de consumibles y revisiones específicas de subsistemas hidráulicos y eléctricos.
B1	200	Inspecciones técnicas más profundas y reemplazo programado de elementos de desgaste periódico.
B2	300	Diagnósticos predictivos, como análisis de aceite, pruebas de presión y revisiones estructurales.
C	600	Mantenimientos intermedios, sustitución de componentes críticos, limpieza integral de subsistemas y recalibraciones.

Las rutinas del sistema de perforación se orientan principalmente a la conservación de la broca, el martillo o perforadora y los mecanismos de transmisión de energía, contemplando inspecciones periódicas, lubricación de guías, control de torque, análisis de desgaste y overhauls programados de componentes sometidos a esfuerzos cíclicos.

Figura 16.

Rutina sistema hidráulico

ITEM	SISTEMA HIDRÁULICO		10 h		20 h		50 h		100 h		200 h		300 h		600 h		1200 h	
	TAREA DE MANTENIMIENTO	DESCRIPCIÓN	A	A1	A2	B	B1	B2	C	D								
14	Inspección mangueras, juntas, acoples y racores	Verificar fugas				E		E		E		E		E		E		E
15	Inspección de acoplamiento y alineación	Estado de acoples, alineación bomba-motor							E		E		E		E		E	
16	Limpieza de succión	Limpieza de línea							E		E		E		E		E	
17	Prueba de válvula de alivio	Probar apertura y cierre de válvula							E		E		E		E		E	
18	Cambiodo filtros	Reemplazar filtros de succión y defogue									E		E		E		E	
19	Verificar vibraciones (cavitación)	Monitoreo de vibraciones									E		E		E		E	
20	Limpieza de intercambiador de calor	Drenaje y lavado									E		E		E		E	
21	Toma de muestra de aceite	Muestreo para envío a laboratorio											E		E		E	
22	Prueba de caudal y presión (calibración bomba)	Uso de flujómetro y manómetros											E		E		E	
23	Cambio de diafragma de alta y baja	Sustitución de diafragma											E		E		E	
24	Verificar de precarga de acumuladores	Verificación/recarga de nitrógeno											E		E		E	
25	Cambio de sellos y resortes de válvulas	Cambio de componentes internos													E		E	

Las rutinas del sistema hidráulico consideran el control de presión y caudal, análisis de condición del aceite, reemplazo preventivo de filtros, pruebas de estanqueidad y monitoreo de fugas internas y externas, a fin de garantizar la eficiencia energética y evitar fallas catastróficas por pérdida de presión.

Las rutinas para el sistema eléctrico contemplan pruebas de aislamiento, inspección de tableros, revisión de conexiones, control de protecciones eléctricas, así como la aplicación de técnicas predictivas (termografía, análisis de vibraciones en motores) para anticipar fallas en los sistemas de potencia y control.

De esta manera, las rutinas definidas para los cuatro sistemas no solo responden a los modos de falla más relevantes, sino que también configuran un esquema integral de mantenimiento progresivo y acumulativo, el cual asegura la continuidad operativa del equipo, reduce la probabilidad de fallas no planificadas y optimiza los costos de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida.

6.3 Formato guía de mantenimiento

Constituye un instrumento de gestión y control diseñado para organizar, registrar y verificar la correcta ejecución de las rutinas programadas en los sistemas críticos del equipo de perforación. Permitiendo trasladar al plano operativo las actividades preventivas, predictivas y de monitoreo de condición que se derivan del análisis de modos y efectos de falla. De esta forma, el formato asegura la trazabilidad de las intervenciones, estandariza los procedimientos y facilita la planificación de tareas según las necesidades técnicas de cada subsistema.

La estructura del documento se encuentra organizada en cuatro secciones principales, correspondientes a los sistemas más relevantes del equipo: sistema de perforación, sistema hidráulico, sistema aire-agua y sistema eléctrico.

En cada sección se relacionan las tareas específicas de mantenimiento, acompañadas de una breve descripción técnica que orienta sobre el procedimiento a ejecutar, los puntos de

intervención y la naturaleza de la actividad (inspección, lubricación, sustitución, calibración, entre otras).

Las actividades se presentan en función de las rutinas de mantenimiento previamente definidas (A, A1, A2, B, B1, B2, C y D), asociadas a intervalos de horas de operación acumuladas, lo que asegura un esquema escalonado, progresivo y acumulativo. Cada columna del formato especifica la frecuencia en la cual debe realizarse la tarea, permitiendo visualizar de manera clara la relación entre la criticidad del modo de falla, la periodicidad de intervención y la estrategia de mantenimiento asignada.

Asimismo, el formato contempla apartados de identificación del equipo, fecha de ejecución, contador de horas, responsable de intervención y supervisor, garantizando la correcta asignación de responsabilidades técnicas y el cumplimiento de los procedimientos establecidos.

Este diseño no solo asegura la ejecución uniforme de las actividades de mantenimiento, sino que también permite integrar la información generada al sistema de gestión documental de la organización.


Adicionalmente, se constituye en un insumo estratégico para la medición y control de los indicadores de gestión del mantenimiento, tales como el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR), la disponibilidad operativa y los costos del ciclo de vida (LCC). La sistematicidad en el registro y validación de las tareas ejecutadas ofrece datos confiables para el análisis de tendencias, la identificación de desviaciones y la toma de decisiones orientadas a la mejora continua.

En este sentido, el formato no solo cumple una función operativa, sino que se integra como un instrumento de retroalimentación dentro del sistema de gestión de mantenimiento, permitiendo

que los resultados del plan RCM sean medidos, evaluados y optimizados con criterios objetivos y verificables.

Figura 19.

Formato guía de mantenimiento

		GUIA DE MANTENIMIENTO				VERSION 0.0 / EN REVISIÓN					
DESCRIPCION: <i>Nombre técnico del equipo</i>		CÓDIGO: <i>Identificación del equipo</i>									
RUTINA: <i>Mantenimiento según horas de percusión</i>		CONTADOR: <i>Horometro de ejecución</i>		FECHA: <i>Fecha de ejecución</i>							
E=EJECUTAR (MARCAR CON UNA "X" LA TAREA EJECUTADA)											
ITEM	SISTEMA DE PERFORACIÓN			10 h	20 h	50 h	100 h	200 h	300 h	600 h	1200 h
	TAREA DE MANTENIMIENTO	DESCRIPCION	A	A1	A2	B	B1	B2	C	D	
1	Lubricación de guías y perforadora	Engrase general	E	E	E	E	E	E	E	E	E
2	Verificación de hoguras	Comprobar tolerancias	E	E	E	E	E	E	E	E	E
3	Limpieza y purga de líneas	Lavado de líneas de lubricación			E	E	E	E	E	E	E
4	Revisión de mangueras	Estado de mangueras de aire, agua e hidráulicas			E	E	E	E	E	E	E
5	Verificar caudal y presión de trabajo (agua)	Evidenciar mediante manómetros y flujómetros				E	E	E	E	E	E
6	Limpieza de filtros y boquillas	Lavado de filtro y boquillas				E	E	E	E	E	E
7	Inspección de estado de brocas (afilado)	Evidenciar estado de brocas					E	E	E	E	E
8	Pruebas de estanqueidad	Verificar fugas					E	E	E	E	E
9	Torque general de perforadora	Ajuste de tornillería							E	E	E
10	Cambio kit se sellos y rodamientos	Reemplazo de empaquetadura y rodamientos							E	E	E
11	Calibración de válvulas de control	Prueba funcional y calibración							E	E	E
12	Limpiezas de válvulas	Inspección y limpieza							E	E	E
13	Cambio kit se sellos, rodamientos, bujes y pistón	Reemplazo de componentes								E	E
ITEM	SISTEMA HIDRAULICO			10 h	20 h	50 h	100 h	200 h	300 h	600 h	1200 h
	TAREA DE MANTENIMIENTO	DESCRIPCION	A	A1	A2	B	B1	B2	C	D	
14	Inspección mangueras, juntas, acoples y racores	Verificar fugas			E	E	E	E	E	E	E
15	Inspección de acoplamiento y alineación	Estado de acoples, alineación bomba-motor				E	E	E	E	E	E
16	Limpieza de succión	Limpieza de línea				E	E	E	E	E	E
17	Prueba de válvula de alivio	Probar apertura y cierre de válvula				E	E	E	E	E	E
18	Cambiodo filtros	Reemplazar filtros de succión y defoque					E	E	E	E	E
19	Verificar vibraciones (cavitación)	Monitoreo de vibraciones					E	E	E	E	E
20	Limpieza de intercambiador de calor	Drenaje y lavado					E	E	E	E	E
21	Toma de muestra de aceite	Muestreo para envío a laboratorio						E	E	E	E
22	Prueba de caudal y presión (calibración bomba)	Uso de flujómetro y manómetros						E	E	E	E
23	Cambio de diafragma de alta y baja	Sustitución de diafragma						E	E	E	E
24	Verificación de precarga de acumuladores	Verificación/recarga de nitrógeno						E	E	E	E
25	Cambio de sellos y resortes de válvulas	Cambio de componentes internos							E	E	E
ITEM	SISTEMA AIRE-AGUA (WATERMIST)			10 h	20 h	50 h	100 h	200 h	300 h	600 h	1200 h
	TAREA DE MANTENIMIENTO	DESCRIPCION	A	A1	A2	B	B1	B2	C	D	
26	Inspección de juntas y mangueras	Verificar fugas	E	E	E	E	E	E	E	E	E
27	Limpiezas de boquillas, filtro de agua	Lavado de boquillas y permisos		E	E	E	E	E	E	E	E
28	Verificación de presión (bomba-compresor)	Revisión de manómetros				E	E	E	E	E	E
29	Cambio de aceite unidad compresora	Reemplazar aceite de compresor					E	E	E	E	E
30	Cambio de válvulas mezcladoras (aspersión)	Reemplazar válvulas						E	E	E	E
32	Cambio de filtro de agua	Reemplazar filtro						E	E	E	E
33	Cambio de membranas de líneas de aire-agua	Reemplazar manguera tubing						E	E	E	E
34	Limpieza a sistema de refrigeración	Lavado de ductos y enfriador							E	E	E
35	Cambio de válvulas de retención	reemplazar válvulas de retención							E	E	E
ITEM	SISTEMA ELÉCTRICO			10 h	20 h	50 h	100 h	200 h	300 h	600 h	1200 h
	TAREA DE MANTENIMIENTO	DESCRIPCION	A	A1	A2	B	B1	B2	C	D	
36	Monitoreo de corriente/tensión	Medición de parámetros			E	E	E	E	E	E	E
37	Balanceo de cargas	Ajuste de distribución de cargas				E	E	E	E	E	E
38	Pruebas de continuidad	Pruebas en líneas secundarias				E	E	E	E	E	E
39	Inspección visual de barras y conectores	Ajuste de conexiones					E	E	E	E	E
40	Limpieza y protección anticorrosiva	Retirar sulfatación, aplicar grasa dieléctrica					E	E	E	E	E
41	Pruebas y calibración de protecciones	Ensayos funcionales de protecciones						E	E	E	E
42	Inspección a aislamiento de cables	Pruebas dieléctricas						E	E	E	E
43	Inspección termografica a motores y tableros	Detección de cables calientes						E	E	E	E
44	Pruebas de humedad en motores	Ensayo de aislamiento con megóhmetro							E	E	E
45	Revisión de alarma térmica	Verificar alarms de sobrecarga							E	E	E
46	Pruebas de disparo	Simulación de fallas para disparo automático							E	E	E
47	Calibración de relé/disyuntores	Verificación en banco de pruebas								E	E
OBSERVACIONES:											
EJECUTADO POR:						APROBADO POR:					
NOMBRE: _____						NOMBRE: _____					
CARGO: _____						CARGO: _____					
FIRMA: _____						FIRMA: _____					

7. Conclusiones

El diagnóstico inicial permitió evidenciar que la gestión de mantenimiento de los equipos Jumbo Epiroc Boomer S1D estaba basada principalmente en prácticas preventivas generales y correctivas, lo cual generaba paradas imprevistas, mayores costos asociados y riesgos de seguridad. Con este análisis se identificaron oportunidades de mejora que justificaron la implementación de una estrategia RCM.

Mediante el análisis de criticidad se establecieron las funciones críticas de los sistemas de perforación, hidráulico, aire-agua y eléctrico, determinando los riesgos asociados a su falla. Este ejercicio permitió priorizar recursos y esfuerzos de mantenimiento hacia aquellos modos de falla con mayor impacto en la continuidad operativa, la seguridad de los trabajadores y la sostenibilidad de las operaciones.

La aplicación de la metodología FMEA facilitó la identificación de los modos de falla más relevantes y sus consecuencias funcionales, operacionales, ambientales y económicas. De esta manera, se obtuvo una base técnica sólida para diseñar tareas de mantenimiento específicas y orientadas a mitigar los riesgos más significativos.

El desarrollo del plan de mantenimiento basado en RCM incorporó tareas preventivas, predictivas y de monitoreo de condición ajustadas a cada sistema crítico. Esta planificación asegura un enfoque balanceado que evita tanto la sobre intervención como la reacción tardía, contribuyendo a mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos.

El análisis comparativo de costos evidenció que la implementación del RCM genera ahorros significativos frente al enfoque reactivo, con reducciones que oscilaron entre el 27% y el

86% según el sistema, y un retorno de inversión positivo en todos los casos. Esto confirma que, aunque el enfoque proactivo requiere mayor inversión inicial, sus beneficios económicos, operativos y estratégicos superan ampliamente los costos.

En términos generales, la aplicación de RCM a los sistemas seleccionados contribuye a mejorar la productividad, asegurar la continuidad de las operaciones, fortalecer la seguridad de los trabajadores, disminuir los impactos ambientales y optimizar los costos de mantenimiento. A mediano y largo plazo, esta estrategia representa una inversión que fortalece la competitividad y sostenibilidad de la empresa.

8. Recomendaciones

Implementación progresiva del plan RCM. Se recomienda iniciar la aplicación del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad de manera gradual, priorizando los cuatro sistemas críticos analizados (perforación, hidráulico, aire-agua y eléctrico). Esto permitirá validar resultados tempranos, ajustar frecuencias de intervención y consolidar aprendizajes antes de expandir la metodología a otros subsistemas del equipo.

Seguimiento a indicadores de gestión. Establecer un sistema de control continuo sobre indicadores clave como MTBF, MTTR, disponibilidad y costos de mantenimiento, de manera que se pueda medir objetivamente el impacto de la estrategia RCM y tomar decisiones basadas en datos reales.

Fortalecimiento de la capacitación del personal. Invertir en la formación técnica y operativa de mecánicos, operadores y supervisores, garantizando que comprendan la lógica del RCM y la importancia de cada tarea definida. Esto favorecerá la correcta ejecución de los planes y reducirá errores humanos que puedan afectar la confiabilidad del equipo.

Integración con modelos de gestión de activos. Articular la estrategia RCM con estándares internacionales como la norma ISO 55000, lo que permitirá a la empresa evolucionar hacia una gestión integral de activos físicos, mejorando la trazabilidad, la planeación estratégica y la sostenibilidad.

Fortalecer el uso de tecnologías de monitoreo predictivo. Incorporar herramientas de análisis de condición, tales como sensores de vibración, temperatura, análisis de aceites y monitoreo eléctrico en tiempo real. Estas tecnologías aumentan la capacidad de anticiparse a las fallas y optimizan las intervenciones de mantenimiento.

Cumplimiento normativo y estandarización. La estrategia debe garantizar que las intervenciones se desarrollen bajo las normas internacionales que regulan el RCM (SAE JA1011, SAE JA1012 e IEC 60300-3-11). Esto permitirá que el plan de mantenimiento no solo sea técnico y económico, sino también seguro, ético y sostenible.

Consolidación de la seguridad operacional. Todas las actividades de mantenimiento derivadas del RCM deben estar alineadas con el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) de la compañía, asegurando que cada tarea contemple medidas de control de riesgos, permisos de trabajo, uso de EPP y planes de emergencia. Asimismo, se debe reforzar la capacitación en trabajo seguro en espacios confinados y con equipos de alta presión, mitigando riesgos para los técnicos, operadores y demás personal que intervienen en las actividades de ejecución de obra.

Gestión ambiental responsable. Asegurar que las prácticas de mantenimiento incluyan procedimientos para el manejo adecuado de aceites, residuos y emisiones, de modo que la estrategia RCM no solo mejore la confiabilidad de los equipos, sino que también contribuya a la sostenibilidad ambiental de las operaciones.

Replicabilidad del modelo en otros activos. Finalmente, se recomienda evaluar la aplicación del RCM en otros equipos de la flota minera y de construcción de túneles, aprovechando la experiencia adquirida y ampliando los beneficios de productividad, seguridad y reducción de costos a toda la organización.

Referencias bibliográficas

- Bevilacqua, M., & Braglia, M. (2000). The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety*, 70(1), 71–83.
- Bhadury, B. (2000). Application of reliability centered maintenance in mining industry. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 48(8), 239–243.
- Campbell, J. D., & Jardine, A. K. S. (2001). *Maintenance excellence: Optimizing equipment life-cycle decisions*. CRC Press.
- Epiroc. (2020). *Jumbo de perforación Boomer SID: Manual de operación y mantenimiento* (ID: PM No. 9852 2984 56d). Epiroc Group.
- International Electrotechnical Commission [IEC]. (2004). *IEC 60300-3-11: Dependability management – Application guide – Reliability centred maintenance*. IEC.
- International Organization for Standardization [ISO]. (2014). *ISO 55000:2014 — Asset management — Overview, principles and terminology*. ISO.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.
- SAE International. (1999). *SAE JA1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (RCM) processes*. SAE International.
- SAE International. (2002). *SAE JA1012: A guide to the reliability-centered maintenance (RCM) standard*. SAE International.
- Smith, A., & Hawkins, B. (2019). *Reliability-centered maintenance and safety*. CRC Press.