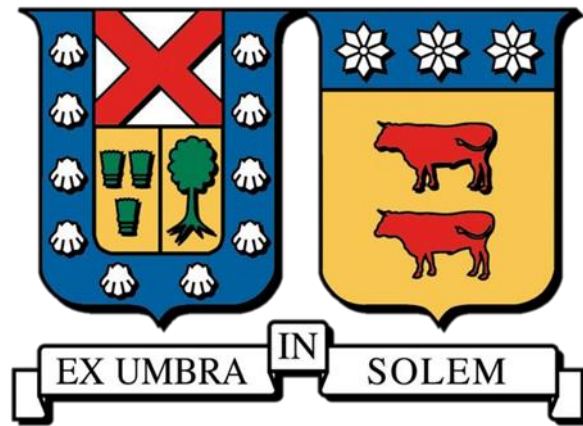


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA



**PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO
EN CONFIABILIDAD A PERFORADORA JUMBO SANDVIK DD-422I**

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

Alumno: Pablo Sebastian Silva Fuentes.

Profesor Guía: Mg. Ing. Pablo Andrés Duque
Ramírez.



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO
EN CONFIABILIDAD A PERFORADORA JUMBO SANDVIK DD-422I

Nombre del candidato(a): Pablo Sebastian Silva Fuentes

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial

Campus: Viña del Mar; Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Pablo Andrés Duque Ramírez., en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 23/09/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 23/09/2025

; Firma:

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

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla una propuesta de plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para la perforadora Sandvik DD-422i, un equipo esencial para las operaciones subterráneas de la mina Uva. Este equipo es el responsable de la creación de túneles, donde este presentó una disponibilidad bajo del 80% durante el 2023, inferior a la disponibilidad comprometida de un 85%. Esta situación generó costos adicionales, interrupciones operativas y afectando en la creación de túneles para la extracción de mineral.

Mediante herramientas como el análisis FMECA, diagrama de Pareto, se identificaron y priorizaron los modos de falla más críticos. Las principales problemáticas detectadas fueron las fugas de líquido hidráulico en los flexibles y cañerías y la baja presión en el sistema hidráulico, ambas causantes de pérdida de eficiencia, tiempo de inactividad significativo y un impacto negativo en los costos operativos. Además, se analizaron causa raíz de estas fallas, permitiendo un diagnóstico más preciso y enfocado.

El plan propuesto aborda estas fallas mediante acciones claves como: inspección y reemplazo de componentes críticos como flexibles y juntas, implementación de sistemas de monitoreo continuo de presión hidráulica y capacitación del personal en mantenimiento preventivo, predictivo y la fabricación de componentes. Estas estrategias buscan mitigar riesgos, extender la vida útil del equipo y garantizar la seguridad operativa.

En general, el enfoque RCM no solo resolverá los problemas actuales, sino que establecerá una metodología de mejora continua que permitirá optimizar la confiabilidad y disponibilidad del equipo a largo plazo. Este plan contribuirá directamente al cumplimiento de los objetivos productivos de la mina, fortaleciendo la sostenibilidad operativa y reduciendo costos en el mediano y largo plazo.

Keywords: RCM, Perforadora Sandvik DD-422i, Confiabilidad, Mantenimiento Preventivo, Análisis FMECA, Fallas hidráulicas, Monitoreo continuo, Disponibilidad operativa, Costos de mantenimiento.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 7

CAPÍTULO 1: IDENTIFICACIÓN LOS MODOS DE FALLA CRÍTICOS DE LA PERFORADORA DD-422i 9

1.2.1. ASPECTO TEÓRICO DEL RCM.....10

1.2.2. FLUJOGRAMA DE IMPLANTACION DEL RCM 11

1.2.3. FORMACION DEL EQUIPO NATURAL DE TRABAJO 11

1.2.4. RESEÑA DE LA EMPRESA 13

1.2.5. CASO DE ESTUDIO.....13

1.2.6. CONTEXTO OPERACIONAL 15

1.2.7. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO 15

1.2.8. FUNCIONES DEL EQUIPO 17

1.2.9. CRITICIDAD DEL EQUIPO 17

1.2.10. MATRIZ DE CRITICIDAD DEL EQUIPO.....18

1.2.11. ANÁLISIS DEL MODO, EFECTO Y CRITICIDAD DE LA FALLA 23

1.2.12. FALLAS FUNCIONALES 23

1.2.13. MODOS DE FALLA 23

1.2.14. EFECTOS DE FALLA 24

1.2.15. APLICACIÓN DEL FMECA 24

CAPÍTULO 2: IDENTIFICACIÓN DE LOS MODOS DE FALLA CRÍTICOS. 27

2.2.1. NÚMERO DE PIORIDAD DE RIESGO 28

2.2.2. PROBABILIDAD DE DETECCIÓN DE UN MODO DE FALLA (Pd).....28

2.2.3. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA (Po).....28

2.2.4. SEVERIDAD DE OCURRENCIA (So) 29

2.2.5. DIAGRAMA DE PARETO 30

2.2.6. DIAGRAMA DE DECISIÓN RCM 31

2.2.7. TAREAS PROACTIVAS 33

2.2.8. TAREAS PREDICTIVAS 34

2.2.9. APLICACIÓN DEL DIAGRAMA DE DECISION RCM 35

2.2.10. PROPUESTA Y DEFINICIÓN DE PLANES DE MANTENIMIENTO 36

2.2.11. VALIDACIÓN DE METODOLOGÍA DEL ENFOQUE RCM 37

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE ECONOMICO Y EVALUACIÓN TÉCNICA.....38

3.2.1. ANÁLISIS ECONÓMICO 39

3.2.2. IMPACTO EN LA DISPONIBILIDAD 43

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 49

RECOMENDACIONES 50

BIBLIOGRAFÍA.....51

ANEXOS 52

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1 “Flujograma de implantación del RCM”

Ilustración 1-2 “Integrantes de un equipo natural de trabajo para implementación RCM”

Ilustración 1-3 “Ubicación geográfica de la faena”

Ilustración 1-4 “Perforadora Sandvik DD-422i

Ilustración 1-5 “Perforadora Sandvik DD-422i

Ilustración 1-6 “Esquema de análisis de los modos y efectos de falla”

Ilustración 2-1 “Hoja decisión de RCM II”

Ilustración 2-2 “Diagrama de decisión RCM”

Ilustración 2-3 “Intervalo P-F en las tareas a condición”

ÍNDICE DE GRÁFICA

Gráfica1-1” Matriz de criticidad de equipos”

Gráfica 1-2 “Diagrama de Pareto de fallas DD-422i”

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 “Matriz de criticidad generada por la empresa.”

Tabla 1-2 “Categorización de frecuencias de falla por periodos”

Tabla 1-3 “Categorización de Seguridad”

Tabla 1-4 “Categorización de Medio ambiente”

Tabla 1-5 “Pérdida de Producción”

Tabla 1-6 “categorización de costos de mantenimiento”

Tabla 1-7 “Resultado de Matriz de Criticidad”

Tabla 1-8 “Aplicación de FMECA”

Tabla 2-1 “Probabilidad de detección de un modo de falla

Tabla 2-2 “Evaluación de ocurrencia “

Tabla 2-3 “Severidad de ocurrencia”

Tabla 2-4 “Asignación de NPR”

Tabla 2-5 “Aplicación de hoja de decisión RCM”

Tabla 3-1 ”Comparación de indicadores antes y después”

Tabla 3-2 “Indicadores económicos anuales de implantar RCM”

Tabla 3-3 “TPPR Total anual de todos los modos de falla sin RCM”

Tabla 3-4 “TPPR anual de los modos de falla al implantar RCM”

Tabla 3-5 “Resumen comparativo de Antes y después del RCM”

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

SIGLAS

- FMECA: Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA: Análisis de modos de falla, Efecto y Criticidad)
- RCM: Reliability Centered Maintenance (RCM: Mantenimiento centrado en confiabilidad)
- MTTR: Mean time to repair (MTTR: Tiempo medio de reparación)
- MTBF: Mean Time Between Failures (MTBF: Tiempo medio entre fallas)
- NPR: Número de prioridad de riesgo
- Po: Probabilidad de ocurrencia
- So: Severidad de ocurrencia
- Pd: Probabilidad de detención de un modo de falla
- MF: Modo de falla
- FF: Fallas operativas

UNIDADES DE MEDIDA

kW: Kilowatt

Hp: Horse power (Hp: Caballos de fuerza)

USD: dólares

INTRODUCCIÓN

La empresa opera en la comuna de Catemu, en la provincia de San Felipe, y cuenta con la mina subterránea Uva y planta Catemu, donde se producen cátodos de cobre mediante los procesos de lixiviación y electro-obtención. La mina Uva en una operación de mediana minería gestionada de forma tele-operada desde una sala de control externa, con altos estándares tecnológicos. Además de extraer mineral de la mina Uva, la planta Catemu realiza compras de material a pequeños mineros locales, consolidándose como un comprador clave en la región de Valparaíso.

En la empresa se encuentran 65 equipo móviles y estáticos para las operaciones internas y externas de la mina Uva, dentro de este estudio se va a priorizar la evaluación de la perforadora Sandvik DD-422i debido a que ocurrieron 54 de fallas y con un tiempo de reparación de 160 h entre todas las fallas dentro del año 2023. Se debe tener en cuenta que el equipo que se está evaluando es fundamental dentro de la faena ya que su función principal de esta es la creación de túneles para la extracción del material, además el equipo tiene características destacadas que sobresalen la capacidad de automatización de procesos para la perforación y voladura proporcionando datos completos para el control de los ciclos de perforación. Un aspecto clave que se debe tener en cuenta que dentro de la empresa se genera la fabricación de componentes necesarios para la realización del mantenimiento como la fabricación de flexibles y mangueras hidráulicas.

La empresa enfrenta un problema de indisponibilidad del equipo, dado que estos presentan una disponibilidad del 85%. Sin embargo, en el año del 2023, el equipo opero con un promedio de disponibilidad bajo del 80%, por debajo de lo acordado. Para asegurar que la confiabilidad cumpla o supere el establecido, donde se plantea desarrollar una propuesta de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad, que permita mejorar la disponibilidad del equipo y asegurar de los objetivos operativos.

Dentro del trabajo para la implementación del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para la perforadora DD-422i, se realizara un análisis detallado de la perforadora para identificar los componentes críticos para su operación, ya una vez generado esto se realizara un análisis de modo de falla y efectos (FMECA) de cada componente crítico identificado, así identificando los modos de falla, sus causa potenciales y los efectos asociados en la operación de la perforadora y la seguridad del personal. Con el fin de desarrollar una evaluación técnica económica para ver si es factible la implementación del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad.

OBJETIVO GENERAL

Proponer un plan de mantenimiento mediante herramientas del mantenimiento centrado en confiabilidad a una perforadora Jumbo Sandvik DD-422i aumentando la disponibilidad en un 10% más del equipo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar de un FMECA para detectar y prevenir fallos potenciales para el equipo DD-422i de Sandvik.
- Identificar los modos de falla críticos de los componentes claves de la perforadora DD-422i, mediante a diagramas de Pareto para la identificación de los componentes críticos del equipo
- Realizar una evaluación técnica económica para tomar decisiones racionales para un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad.

CAPÍTULO 1: **IDENTIFICACIÓN LOS MODOS DE FALLA CRÍTICOS DE LA**
PERFORADORA DD-422i

1.2.1. ASPECTO TEÓRICO DEL RCM

Según Moubray (1991), el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) es un método estructurado diseñado para determinar las necesidades de mantener un activo físico dentro de su contexto operacional específico. El propósito fundamental que busca es preservar la funcionalidad del equipo, optimizar la confiabilidad y la disponibilidad, y al mismo tiempo que se garantizan condiciones seguras y rentables para la operación del equipo. En el concepto del mantenimiento según la norma UNE-EN 13306:2002, abarca un conjunto de acciones técnicas, administrativas y de gestión destinada a conservar o restaurar a un estado donde se pueda realizar una función requerida, esto quiere decir, que el RCM representa una evolución del mantenimiento tradicional hacia un enfoque más estratégico y analítico.

Desde una perspectiva más amplia, Parra (1996), define el RCM como un proceso sistemático de gestión del mantenimiento, en el cual un equipo multidisciplinario analiza la criticidad de los activos, evaluando los posibles efectos de los modos de falla sobre la seguridad, medio ambiente, la continuidad operacional. Esta metodología permite establecer las políticas de mantenimiento basadas en el riesgo y la confiabilidad, priorizando aquellas tareas que aporten mayor valor en la prevención de las fallas funcionales.

La metodología RCM se basa en un conjunto de siete preguntas claves, formuladas originalmente por Bloom (2006), que orientan el análisis técnico del sistema:

1. ¿Cuáles son las funciones y los estándares de desempeño del activo en su entorno operativo actual?
2. ¿De qué manera puede fallar el activo en el cumplimiento de cada función?
3. ¿Qué causa cada modo de falla identificado?
4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
5. ¿Cuáles son las consecuencias de cada falla?
6. ¿Qué puede hacerse para prevenir o anticipar cada modo de falla?
7. ¿Qué acciones se deben tomar si no existe una tarea preventiva adecuada para dicha falla?

Con estas preguntas se van respondiendo a medida que se va avanzando en la implementación del RCM ordenadas y metódicamente, la herramienta que más nos ayudara a responder las siete preguntas ya planteadas es la creación del FMECA. Una vez ya respondidas las preguntas de manera correcta significa que la implementación de la metodología RCM está funcionando correctamente junto a la creación del plan de mantenimiento con la hoja de decisiones.

1.2.2. FLUJOGRAMA DE IMPLANTACION DEL RCM

La metodología del RCM contiene un flujograma en el cual detalla una serie de “Pasos” que se deben cumplir para poder alcanzar el objetivo final de poder crear un plan de mantenimiento de acuerdo con la hoja de decisión. En donde cada uno de estos pasos serán explicados a continuación.

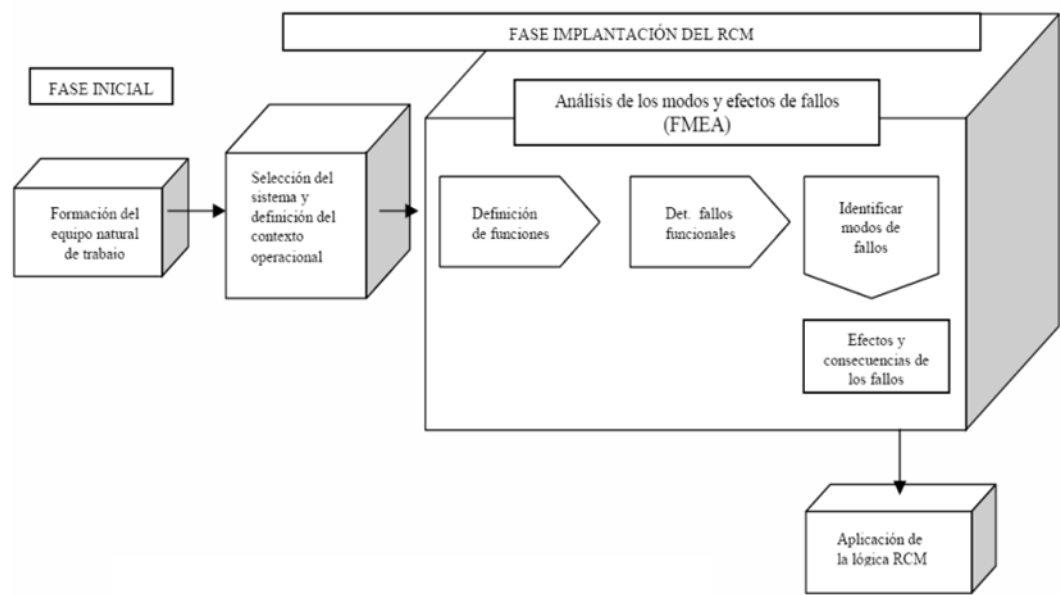


Ilustración 1-1 “Flujograma de implantación del RCM”

Fuente: Flujograma implantación RCM. Parra, Carlos

1.2.3. FORMACION DEL EQUIPO NATURAL DE TRABAJO

Como primer paso dentro de la fase inicial del flujograma de implantación del RCM, se encuentra la tarea fundamental de conformar el equipo natural de trabajo, este equipo debe estar conformado por personas con distintas funciones dentro de la organización, que posean tanto el conocimiento técnico necesario sobre le funcionamiento del equipo como una comprensión adecuada de la metodología RCM. La participación del personal con experiencia directa en la operación y el mantenimiento del activo es clave, ya que ellos son los que actúan directamente con el equipo, por lo que representan una gran fuente de información indispensable para generar el análisis. En este sentido, se recomienda integrar al equipo a miembros del área de mantenimiento, operadores y técnicos con experiencia en la maquina y sus componentes específicos.

Según Moubray (1991), el quipo natural de trabajo debe estar conformado por no menos de cuatro ni mas de siete integrantes, siendo lo ideal un grupo de cinco a seis personas. Esta cantidad permite un equilibrio adecuado entre diversidad de opiniones y eficiencia en la toma de decisiones, la composición típica del equipo puede incluir los siguientes roles:

- **Operador:** Un experto y conocedor de la máquina a estudiar y que viven diariamente trabajando con la misma. Fuente de valiosa información que no se debe ignorar.
- **Mantenedor:** Ideal que sea un mantenedor eléctrico o mecánico (dependiendo el equipo) que tenga experiencia la reparación de los activos y conozca sus efectos y consecuencias de las fallas. Si es un activo que funciona con electromecánica es recomendable tener un técnico eléctrico y mecánico.
- **Ingeniero de Procesos/Planificación:** Recurso humano que conozca del negocio de la empresa y sus proyecciones. Aportes valiosos en términos económicos (presupuesto).
- **Programador de Mantenimiento:** Conocimientos en los planes preventivos de los equipos, presupuesto anual destinado a mantención, datos de criticidad y acceso a base de datos de los activos como histórico de fallas.
- **Especialista Externo:** Al ser una persona experta en un área (dependiendo jerarquización) puede dar información asertiva y valiosa.
- **Facilitador:** Una persona asesora que sea experta en la metodología RCM, que conozca los procesos y que pueda hacer más fácil la implementación.

Un aspecto crítico para el éxito del proceso RCM es la capacidad del equipo para trabajar en consenso, donde cada miembro contribuye desde su experiencia en las distintas etapas del análisis, como la de identificación de funciones, determinación de los modos de falla, análisis de consecuencias y selección de tareas de mantenimiento. La sinergia de este equipo multidisciplinario permite desarrollar un plan de mantenimiento realista, eficaz y alineado con los objetivos de la organización.



Ilustración 1-2 “Integrantes de un equipo natural de trabajo para implementación RCM”

Fuente: Reliability Centered Maintenance. Moubray, John

1.2.4. RESEÑA DE LA EMPRESA

El complejo operacional de Catemu, de la provincia de San Felipe, esta conformado por dos importantes sectores cual se distribuyen como la Planta Amalia y Mina Uva, cual en Planta Amalia se encarga de los procesos de lixiviación y electro- obtención para la obtención de cátodos de cobre a la vez de por la agencia de compras, también se recibe mineral de pequeños mineros locales, así considerándose como un comprador relevante para la región de Valparaíso. La mina Uva es una operación subterránea que su principal se enfoca en la obtención de cobre, donde esta se opera desde una sala de control externa, los que la convierte en una operación única dentro de la mediana minería

El equipo DD422i de Sandvik que será objeto del estudio opera en el interior del yacimiento, utilizando la perforadora DD 422i de Sandvik. Este equipo es de vital importancia en la operación minera, y juega un papel crucial en la creación de infraestructuras subterráneas en la mina. Su tarea principal es perforar túneles, galerías y otros pasajes subterráneos que permiten un acceso seguro y eficiente a las zonas de extracción de minerales. Esto asegura que el personal y los equipos puedan acceder a las áreas de trabajo de manera segura, facilitando así el desarrollo de la actividad minera en el interior de la mina. Dentro del periodo que se facilitó información el equipo tuvo una cantidad de 54 fallas que se produjeron con un tiempo de reparación de 160 horas en las que estuvo detenido el equipo

1.2.5. CASO DE ESTUDIO

La compañía se encuentra establecida en la comuna de Catemu de la provincia de San Felipe, se encuentra desarrollando sus actividades mineras en espacios dotados de tecnologías avanzadas, tanto en la mina subterránea Uva como en la planta Catemu la cual produce cátodos de cobre mediante procesos de lixiviación y electro-obtención, además genera la compra de material a pequeños mineros del sector constituyéndose como un importante comprador en la región de Valparaíso. Los equipos que comprende en el sector de la mina son una cantidad de 65 equipos entre móviles y estáticos, los que son necesarios para llevar a cabo las actividades internas y externas. En este marco, el estudio estará orientado a la perforadora Sandvik DD-422i, cual presenta un alto índice de fallas en el 2023, con una disponibilidad menor al 80% siendo inferior al compromiso que se tenía que mantenerla sobre el 85% de disponibilidad, constituyéndose este equipo en un maquina central en la operación minera debido al papel en la creación de túneles por la extracción del mineral.

El propósito es proponer un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para la perforadora Sandvik DD-422i, de forma de mejorar la disponibilidad de esta, consiguiendo

elevar su confiabilidad a niveles más altos y así garantizar el cumplimiento de los objetivos operacionales. Para este propósito se apunta a una metodología cual implica varias etapas. Primero, se realiza un análisis minucioso de la perforadora, de forma de identificar los componentes más críticos que impactan demasiado en el desempeño y en la seguridad operativa. Luego, ya a los componentes identificados, se le ejecuta un análisis de Modos de Falla y Efectos (FMECA), donde se genera la identificación de modos de fallas del equipo.

La función de FMECA, se establecerá una metodología de conservación de equipos para prevenir que se consideren importantes. Dentro de la metodología estará incluido el mantenimiento preventivo, inspecciones de alerta anticipada y evaluación de activos en cuanto a la fabricación de partes para el mantenimiento. Una revisión del valor en el gasto se llevará a cabo para determinar si el gasto de la implementación de la metodología es viable, donde al generar el esquema de mantenimiento centrado en confiabilidad en la eficacia para la perforadora se traducirán en un nivel alto de disponibilidad igual o superior al 85%, donde se reducirán paradas de trabajo no planificados.



Ilustración 1-1 “Ubicación geográfica de la faena”
(Fuente: Google Maps)

1.2.6. CONTEXTO OPERACIONAL

En el contexto operativo de la empresa, la perforadora DD422i de Sandvik desempeña un papel fundamental en las actividades de perforación subterránea, específicamente en la preparación de túneles para la carga de explosivos. Con el objetivo de incrementar en la disponibilidad y reducir el impacto de las fallas, se propone un análisis de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).

El análisis permitió identificar las funciones críticas de la perforadora, cuyos fallos interrumpían significativamente el ciclo de producción. Al generar el estudio de los modos de fallas más frecuentes y sus consecuencias en términos de operatividad y seguridad, donde entre los componentes más críticos se destacan el sistema hidráulico, el sistema de perforación y los controles eléctricos, cuya adecuada operación es esencial para el rendimiento del equipo.

Con la propuesta del plan RCM, la empresa no solo busca optimizar los tiempos de operación de la perforadora, sino que también buscar reducir los riesgos de los fallos inesperados que en donde se podrían comprometer la seguridad y los costos de mantenimiento. Con este enfoque, basado en los estándares de confiabilidad, busca permitir asignar de manera eficiente los recursos, contribuyendo la estabilidad operativa del equipo y la productividad de la operación en la mina subterránea

1.2.7. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Sandvik DD422i es una perforadora de desarrollo multipropósito avanzado que proporciona un alto nivel de rendimiento para el desarrollo de minas subterráneas y túneles a pequeña escala, incluidas funciones integrales de perforación y soporte terrestre. Donde está equipado con un sistema inteligente de control de perforación con torque optimizado que ayuda a minimizar la desviación del orificio durante la perforación, reducir los atascos y maximizar la vida útil de la herramienta y la tasa de penetración. Las herramientas integrales de planificación, generación de informes y análisis de perforación ayudan a lograr resultados de alta calidad en la precisión de perforación y voladura y a maximizar la extracción por voladura.

Donde las principales características con las que cuenta:

1. Versatilidad: La perforadora es capaz de perforar agujeros de diferentes diámetros y longitudes, lo que la hace adecuada para una variedad de aplicaciones mineras
2. Automatización: Incorpora sistemas avanzados de la automatización y control que optimizan la productividad y la seguridad en el sitio del trabajo. Estos sistemas permiten una mejor operación más eficiente y reducen la intervención manual.
3. Tecnología de punta: Utiliza tecnología de vanguardia para garantizar una perforación precisa y eficiente. Esto incluye sistemas de navegación y posicionamiento para asegurar la alineación correcta de los barrenos.

4. Seguridad mejorada: Esta diseñada con características de seguridad mejorada, como sistemas de monitores de condiciones operativas y controles de acceso para garantizar un entorno de trabajo seguro para los operadores.

5. Mantenimiento simplificado: Se ha diseñado con un enfoque en la facilidad de mantenimiento, con acceso conveniente a los componentes claves para la inspección y reparación.

Especificaciones del equipo

Dimensiones:

- Longitud: 13 metros.
- Anchura: 2.5 metros.
- Altura: Varía según la configuración, generalmente entre 2.7 a 3.2 metros.

Peso:

- Peso total: 26.000 kilogramos (según las configuraciones).

Motor:

- Potencia de motor: Generalmente está equipado con un motor Diesel de alta potencia de alrededor de 200-250 kW (290-335 hp).

Capacidad de perforación:

- Diámetro de agujero: Puede perforar hasta agujeros de 127 milímetros, pero generalmente genera perforaciones de 43 a 64 milímetros.
- Longitud de agujero: La capacidad de perforación varía según las configuraciones y las condiciones de perforación, pero puede perforar agujeros de hasta 38 metros de longitud.

Velocidad de perforación:

- Velocidad de avance: Alrededor de 0,8 a 2 metros por minuto, dependiendo del tipo de roca y otros factores.
- Velocidad de rotación: Ajustable para adaptarse a diferentes condiciones de perforación, generalmente en el rango de 0-100 revoluciones por minuto.

Capacidad del carro de perforación:

- El carro de perforación puede desplazarse en múltiples direcciones para perforar en diferentes ángulos y direcciones, lo que permite una mayor flexibilidad en el sitio de trabajo.

Otros datos

En el 2023, la tasa de disponibilidad del equipo alcanzo una disponibilidad menor al 80% en comparación con el objetivo meta del 85%. Estas cifras apuntan a un bajo rendimiento motivado por las 54 fallas, lo que significa frecuencias de fallas más graves que afectan a la operación del equipo, así como a los costes respectivos. Dentro del plan presupuestado para el año 2023 con un total de 32.00 USD para el mantenimiento del equipo, que se divide en asignaciones mensuales de 5.400 USD, sin embargo, la elevada cantidad de averías registradas genero un gasto acumulado de 31.200 USD en los seis meses lo que representa un 97,5% del presupuesto anual planificado. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de revisa y optimizar el mantenimiento actual, a fin de reducir la frecuencia de fallas, mejorar la disponibilidad de equipo y garantizar la una gestión más eficiente de los recursos económicos destinados a las actividades de mantenimiento.



Ilustraciones 1-2 y 1-3 “Perforadora Sandvik DD-422i

(Fuentes: Pagina Sandvik y Fuente Propia)

1.2.8. FUNCIONES DEL EQUIPO

La aplicación rigurosa de la metodología RCM parte del análisis estructurado de las funciones del equipo en su entorno operativo actual. Según Moubray, el primer paso del RCM es identificar las funciones principales del equipo, auxiliares y de protección que debe cumplir el equipo. La perforadora Sandvik DD-422i, utilizada en la mina Uva para operaciones subterráneas, cumple múltiples funciones críticas para garantizar tanto la producción como la seguridad operativa. A continuación, se describen las funciones principales de equipo, las cuales contribuyen la base para la posterior identificación de las fallas funcionales y los modos de falla.

Funciones principales

- F1: Perforar barrenos en el frente de trabajo de acuerdo con los parámetros geométricos definidos (Diámetro, profundidad, ángulo, alineación)
- F2: Garantizar un ciclo de perforación continuo, con al menos un 90% de eficiencia operativa durante cada turno de trabajo (8 horas)
- F3: Transmitir energía hidráulica, eléctrica y mecánica de forma efectiva a los sistemas de perforación y tracción del equipo

Funciones Auxiliares

- F4: Retirar escombros del frente de trabajo posterior a la perforación (función del barredor)
- F5: Monitorear y registrar variables operacionales (Presión, temperatura, consumo de energía), a través de sensores y sistemas de control automáticos

Funciones de protección

- F6: Detectar condiciones anormales (baja presión hidráulica, sobrecarga eléctrica, falla de sensores) y activar alarmas p detener el sistema para evitar daños mayores o riesgo al personal.

1.2.9. CRITICIDAD DEL EQUIPO

La criticidad de equipo es un concepto clave que refleja su importancia esencial en los procesos de perforación y extracción de material, siendo un factor que puede determinar el éxito

de las operaciones mineras. Evaluar esta criticidad implica analizar diversos aspectos que afectan tanto al rendimiento del equipo como su contribución al funcionamiento global de la operación. Uno de los factores cruciales es la frecuencia de fallas, ya que equipos con un alto índice de averías demandan mayor atención y recursos de mantenimiento. A su vez, la gravedad de estas fallas también juega un rol importante, ya que una falla severa puede interrumpir significativamente el proceso, disminuyendo la disponibilidad del equipo y afectando de manera directa la productividad.

Además de la frecuencia y la severidad, otros aspectos fundamentales incluyen la facilidad de reparación, pues los equipos presentan problemas complejos que requieren mayor tiempo y personal calificado para ser reparados. También se considera el costo de los mantenimientos, ya que el presupuesto dedicado a estas actividades debe ser gestionado cuidadosamente para optimizar los recursos disponibles. La disponibilidad de repuestos en stock es otro factor clave, ya que una falta de piezas puede prolongar el tiempo de inactividad, afectando directamente la operación, donde el tiempo de inactividad causado por fallas y su impacto económico, medido en términos de la producción perdida, representan un punto crítico al evaluar la criticidad de un equipo.

Estos elementos permiten establecer una jerarquía de criticidad que guía la toma de decisiones, facilitando la priorización de acciones de mantenimiento y la asignación eficiente de recursos. La finalidad es asegurar un funcionamiento óptimo de los equipos, minimizando el tiempo de inactividad, reduciendo los riesgos operacionales y contribuyendo al objetivo de maximizar la productividad y rentabilidad de la operación. Esta jerarquización no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también permite una gestión preventiva de los riesgos, anticipando posibles fallas y planificando mantenimientos de forma proactiva para reducir su impacto en la producción total.

1.2.10. MATRIZ DE CRITICIDAD DEL EQUIPO

La matriz de criticidad es una herramienta clave utilizada para la evaluación de los riesgos asociados con los equipos o activos dentro de una organización. Esta metodología permite clasificar los equipos bajo dos criterios principales: La frecuencia de fallas por periodos y las consecuencias de las fallas. Al combinar estos dos criterios se genera una matriz que facilita visualizar los niveles de criticidad de cada equipo según la posición que se encuentra en la matriz. Este enfoque es crucial para poder priorizar las acciones de mantenimiento y optimizar la asignación de recursos para garantizar la continuidad operativa y minimizar los riesgos organizacionales.

En primer lugar, la categorización por frecuencia de falla por periodos, esta clasifica los equipos según la recurrencia de las fallas durante intervalos de tiempo específicos. Esta clasificación no solo permite priorizar la asignación de recursos para el mantenimiento, sino que

también ayuda a identificar patrones de fallas recurrentes. Con esta manera es posible planificar de manera eficiente tanto acciones correctivas como preventivas

La matriz de criticidad resultante de este análisis facilita la toma de decisiones, ya que permite enfocarse en el mantenimiento de los equipos que representan un mayor riesgo y que son esenciales para la operación. Además, con esta herramienta constituye una base sólida para la planificación del mantenimiento, asegurando una gestión proactiva de los riesgos que no solamente contribuye a una sostenibilidad operativa, sino que también a la eficacia a largo plazo.

Frecuencia	5	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	4	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72	76	80
	3	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60
	2	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
	1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Cr = C x F		Consecuencia															

Tabla 1-1 “Matriz de criticidad generada por la empresa.”

(Fuentes: Gerencia de mantenimiento de la empresa)

Categoría	MTBF, periodos	Taza de fallas por periodos, fallas por año	Interpretación
5	MTBF< Semanal	$\Lambda > 1$	Es probable que ocurran varias fallas en una semana.
4	$\text{Semanal} \leq \text{MTBF} < \text{Mensual}$	$0,1 < \Lambda \leq 1$	Es probable que ocurran varias fallas en un mes, pero es poco probable que ocurra en una semana.
3	$\text{Mensual} \leq \text{MTBF} < \text{Trimestral}$	$0,01 < \Lambda \leq 0,1$	Es probable que ocurran varias fallas en un trimestre, pero es poco probable que ocurra en un mes.

2	Trimestral $\leq$ MTBF $\leq$ Semestral	$0,001 < \Lambda \leq 0,01$	Es probable que ocurran varias fallas en un semestre, pero poco probable que ocurran en un trimestre.
1	MTBF $\geq$ Anual	$0,001 \leq \Lambda$	Es poco probable que ocurran fallas en un año.

Tabla 1-2 “Categorización de frecuencias de falla por periodos”

(Fuente: Gerencia de mantenimiento de la empresa)

A. Categorización de las consecuencias: En las consecuencias se refiere a los efectos que tendría la falla o el mal funcionamiento del equipo en particular, estas pueden variar en gravedad y pueden afectar diversos aspectos de la operación de la organización. Al evaluar las consecuencias potenciales de la falla y es importante considerar como afectaría cada una de estas áreas.

Categoría	Seguridad
5	Riesgo de accidente con fatalidad al personal.
4	Riesgo de accidente con gravedad al personal.
3	Riesgo de accidente con tiempo perdido.
2	Riesgo de accidente sin tiempo perdido.
1	Riesgo de incidentes para las personas.

Tabla 1-3 “Categorización de seguridad”

(Fuente: Gerencia de mantenimiento de la empresa)

Categoría	Medio ambiente
5	Riesgos irreversibles al ambiente y que violen regulaciones y leyes ambientales.
4	Riesgos irreversibles al ambiente pero que violan regulaciones y leyes ambientales.
3	Riesgos ambientales arreglables sin violación de regulaciones y leyes ambientales.
2	Riesgos mínimos de daños ambientales sin violación de regulaciones y leyes ambientales.
1	Sin daños ambientales ni violación de regulación y leyes ambientales.

Tabla 1-4 “Categorización de Medio ambiente”

(Fuente: Obtenida de la empresa)

Categoría	Perdida de producción
5	Falla detiene completamente la línea.
4	Falla detiene de manera temporal la línea y afecta la producción general.
3	Falla detiene de manera temporal la línea y afecta la producción general parcialmente.
2	Falla detiene de manera temporal la línea, pero no afecta la producción general.
1	Falla no genera impacto operacional.

Tabla 1-5 “Categorización de Perdida de producción”

(Fuente: Obtenida de la empresa)

Categoría	Costos de mantenimiento
5	Costo mayor a US\$ 70.000
4	Costo entre US\$25.000 y US\$ 70.000.
3	Costo entre US\$ 10.000 y US\$ 25.000.
2	Costo entre US\$ 2.000 y US\$ 10.000.
1	Costo menor a US\$ 2.000.

Tabla 1-6 “Categorización de Costos de mantenimiento”

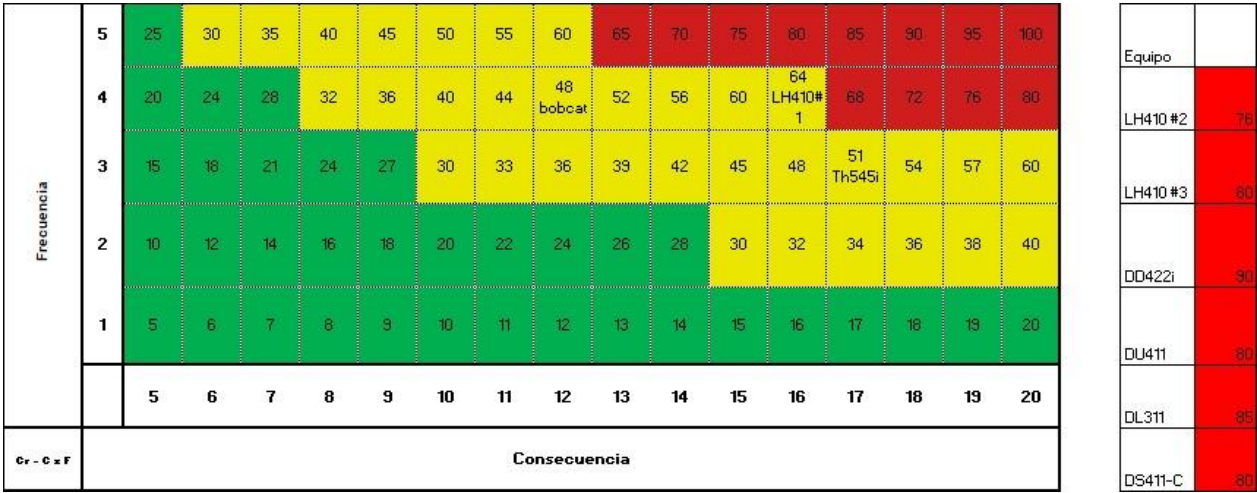
(Fuente: Gerencia de Mantenimiento de la empresa)

Resultados de la matriz de criticidad de equipos más críticos

Equipo	Seguridad	Medio Ambiente	Perdida Producción	Costos Mant	Impacto total	Frecuencia de fallas	Valor	Nivel	Criticidad
PERFORADORA DESARROLLO DD422i	5	5	4	4	18	5	90	A	ALTA
PERFORADORA SOPORTE DS411-C	5	4	4	3	16	5	80	A	ALTA
PERFORADORA FONDO ARTICULADO DU411	5	2	4	5	16	5	80	A	ALTA
PERFORADORA POZO LARGO DL311	5	3	4	5	17	5	85	A	ALTA
CAMIÓN SUBTERRANEO TH545i	5	3	5	4	17	3	51	M	MEDIO
TELEHANDLER BOBCAT SUBTERRANEA	5	1	3	3	12	4	48	M	MEDIO
CARGADOR PERFIL BAJO LH410 #1	5	3	4	4	16	4	64	M	MEDIA
CARGADOR PERFIL BAJO LH410 #2	5	4	5	5	19	4	76	A	ALTA
CARGADOR PERFIL BAJO LH410 #3	5	5	5	5	20	4	80	A	ALTA

Tabla 1-7 “Resultados matriz de criticidad”

(Fuente: Obtenida de la empresa)



Gafical-1” Matriz de criticidad de equipos”

Fuente: Elaboración propia

1.2.11. ANÁLISIS DEL MODO, EFECTO Y CRITICIDAD DE LA FALLA

El FMECA o análisis de modo de falla, efectos y criticidad, es una técnica sistemática utilizada para identificar y evaluar posibles modos de falla de un sistema, componente o proceso, así como los efectos de esas fallas y su criticidad en el funcionamiento global del sistema. El FMECA se lleva a cabo mediante una serie de pasos que incluyen la identificación de todos los posibles modos de falla, la evaluación de los efectos de falla y, finalmente, la priorización de acciones correctivas o preventivas según la criticidad de los modos de falla identificados. Esta técnica es comúnmente utilizada dentro de la industria ya que la fiabilidad y seguridad es de suma importancia.

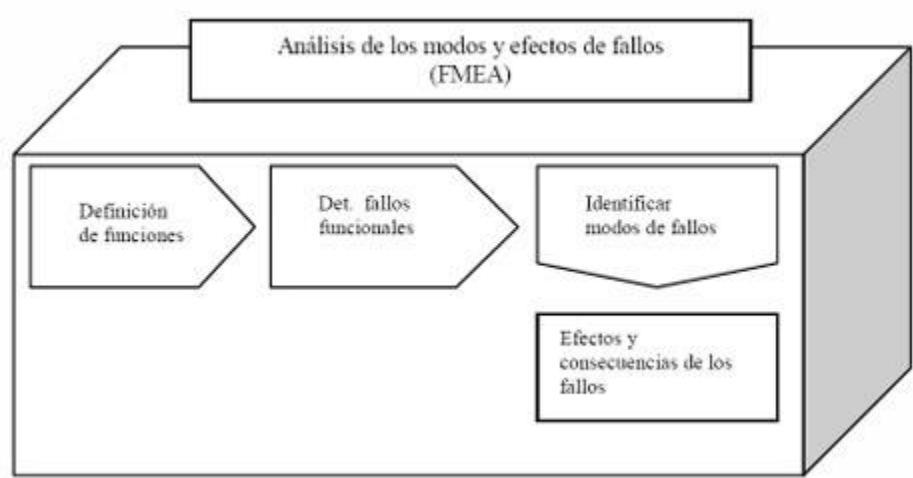


Ilustración 1-4 “Esquema de análisis de los modos y efectos de falla”

Fuente: Flujograma implantación RCM. Parra, Carlos

1.2.12. FALLAS FUNCIONALES

Las fallas funcionales o estados de falla constituyen una parte crucial en la identificación de todos los estados no deseados que pueden experimentar un sistema. Identificar las fallas funcionales es esencial para comprender las deficiencias potenciales del sistema y tomar medidas correctivas o preventivas adecuadas, este proceso se facilita una vez se han identificado todas las funciones deseadas del activo en cuestión. De esta manera se pueden trabajar en la mitigación de riesgos y en la mejora continua del rendimiento del sistema. (SAE 1011)

1.2.13. MODOS DE FALLA

Un modo de falla es una posible causa por la cual un equipo puede llegar a un estado de falla. Cada falla funcional suele tener más de un modo de falla, donde todos los modos de falla asociados a cada falla funcional deben ser identificados durante el análisis de RCM. Al identificar los modos de falla de un equipo o sistema es importante listar la causa raíz de la falla, donde el desglose en las causas que provocan la falla proporciona una comprensión precisa de por qué ocurre la falla y esta sugiere que medidas deben tomarse para manejarlas adecuadamente. (SAE 1011)

1.2.14. EFECTOS DE FALLA

Los efectos de falla describes las consecuencias que resultan de un modo de falla. Estos efectos pueden variar en severidad y pueden impactar la seguridad, la funcionalidad, la calidad, el costo o el tiempo de operación del sistema. Los efectos se evalúan a nivel local es decir que puede evaluarse a un componente afectado y a la vez de nivel global es decir que afecte al sistema completo. (SAE 1011)

1.2.15. APLICACIÓN DEL FMECA

	Funciones			Falla funcional		Modo de falla
1	Barredor	Limpiar el frente de trabajo eliminado al menos el 95% de escombros y fragmentos de roca después de cada perforación, en un tiempo menor a 10 minutos	1.1	Incapacidad total para limpiar adecuadamente el frente de trabajo de escombros y fragmentos de roca	1.1.1	Desgaste excesivo en el mecanismo de barrido, medido por inspección visual y pruebas de efectividad de limpieza
2	Breaker	Fragmentar material solido con una capacidad de 90% de fragmentación en menos de 5 minutos por ciclo	2.1	Incapacidad para romper y fragmentar material solido en el área de trabajo	2.1.1.	Fuga hidráulica en el sistema de accionamiento del breaker, observable mediante caída de presión hidráulica
3	Catalina	Transmitir el movimiento rotatorio con un 95% de eficiencia desde el motor principal hacia los sistemas de perforación	3.1	Pérdida de transmisión de movimiento de rotación	3.1.1	Desgaste excesivo de los dientes de la catalina, medible mediante inspección y análisis dimensional
					3.1.2	Rotura o fisura en el material de la catalina, observable con inspección visual o con pruebas no destructivas
4	Centralizador	Mantener la barra de perforación alineada con una desviación máxima de un 1 mm respecto al centro del agujero de perforación	4.1	Desalineación de la barra de perforación	4.1.1	Desgaste excesivo del componente del centralizador, detectable mediante inspección dimensional
					4.1.2	Bloqueo o atascamiento de las partes móviles del centralizador, medible por aumento de fuerza requerida en la operación

5	Culatín	Transmitir al menos el 90% de la energía de impacto necesaria para la perforación a través de la barra	5.1	Perdida de eficiencia en la transmisión de energía de impacto	5.1.1	Desgaste excesivo en los componentes internos del culatín, identificados por pruebas de eficiencia de impacto
6	Eléctrico	Proveer energía a todos los componentes eléctricos de la maquina con un tiempo de disponibilidad del 99%	6.1	Falta de suministro eléctrico a los sistemas críticos	6.1.1	Fallo en el cableado eléctrico, detectado por pruebas de continuidad eléctrica
7	Enchufe Potencia	Proveer la conexión eléctrica para suministrar energía a los sistemas y componentes principales del equipo	7.1	Interrupción en el suministro de energía	7.1.1	Daño en los contactos del enchufe, observable mediante inspección visual
8	Flexibles- Cañerías	Trasportar fluidos a los sistemas necesarios con una presión mínima del 90% para la operación del equipo	8.1	Fugas de fluido hacia los sistemas	8.1.1	Rotura en los Flexibles, detectable mediante inspección visual
					8.1.2	Obstrucción en las cañerías por acumulación de residuos, medible con caudalímetros
9	Fusibles	Proteger los circuitos eléctricos con una capacidad de cortar el suministro ante sobrecarga superiores al 120% del diseño	9.1	Interrupción repentina en el suministro eléctrico por un fusible quemado	9.1.1	Fusible fundido por sobrecarga eléctrica, observable por inspección directa
10	Pernos	Garantizar estabilidad y resistencia mecánica con una fuerza de fijación de al menos el 95% del diseño original	10.1	Desajuste de componentes debido a la falta de pernos fijadores	10.1.1	Aflojamiento o perdida de pernos fijadores, detectable por inspección y torque
11	Piola de avance	Transmitir el movimiento y la fuerza necesaria para el avance de la barra de perforación con un rendimiento del 90% del diseño	11.1	Imposibilidad de avanzar la perforadora debido a la falla de la piola de avance	11.1.1	Ruptura o desgaste de la piola de avance, medible por inspección visual
12	Piola de retroceso	Controlar el movimiento de retroceso de la perforadora con un tiempo máximo de operación de 5 minutos	12.1	Incapacidad para retraer la perforadora debido a la falla de la piola de retroceso	12.1.1	Ruptura o desgaste de la piola de retroceso, medible por inspección visual

13	Sensor	Monitorear parámetros operativos con una precisión mínima del 95%	13.1	Fallos en la recolección de datos o monitoreo de parámetros operativos	13.1.1	Fallo eléctrico o de conexión en los sensores, medible mediante diagnósticos electrónicos
----	--------	---	------	--	--------	---

Tabla 1-8 “aplicación de FMECA”

(Fuente: Elaboración propia)

CAPÍTULO 2: **IDENTIFICACIÓN DE LOS MODOS DE FALLA**
CRÍTICOS.

2.2.1. NÚMERO DE PRIORIDAD DE RIESGO

El número de prioridad de riesgo (NPR), se deriva de un análisis de los modos de fallo, sus efectos y su criticidad. Esta métrica proporciona una clasificación jerárquica de cada modo de fallo, teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia (Po), gravedad de las consecuencias (So) y la probabilidad de detección (Pd) asociada a cada uno. Estas variables se evalúan siguiendo los criterios establecidos por la norma SAE J1739, que asigna valores de 1 al 10 para indicar niveles de riesgo que van desde muy bajo hasta grave. Este enfoque permite identificar y priorizar los modos de fallo más críticos, facilitando así la implementación de medidas preventivas y correctivas adecuadas, Formula de NPR: **Po*So*Pd**

2.2.2. PROBABILIDAD DE DETECCIÓN DE UN MODO DE FALLA (Pd)

La probabilidad de detención (Pd) de un modo de fallo según la norma SAE J1739 se evalúa en una escala del 1 al 10, donde 1 indica la una alta probabilidad de detección y 10 una baja probabilidad de detección. Esta evaluación se realiza considera diversos factores, como la capacidad de los controles de detección existentes, la frecuencia y la eficacia de las inspecciones, y la posibilidad de errores humanos en la detección del modo de fallo.

Tabla: criterios sugeridos para la evaluación de detección

Detención.	Probabilidad de detención de un modo de falla	Ranking.
Casi imposible	No existen controles para detectar el modo de falla	5
Baja	Baja probabilidad de detención con controles actuales	4
Moderada	Moderada probabilidad de detención con los controles actuales	3
Alta	Alta probabilidad de detención con controles actuales	2
Casi cierta	Detección confiable con los controles actuales	1

Tabla 2-1 “Probabilidad de detención de un modo de falla”

(Fuente: Norma SAE J1739)

2.2.3. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA (Po)

La probabilidad de ocurrencia (Po) de un modo de fallo según la norma SAE J1739 también se evalúa en una escala del 1 al 10. En esta escala, 1 indica una probabilidad muy baja de ocurrencia mientras que 10 indica una probabilidad muy alta. Esta evaluación se basa en factores como la experiencia previa, el historial de fallos similares la fiabilidad de los componentes y los procesos, y la posibilidad de eventos aleatorios que puedan desencadenar el modo de fallo.

Tabla: criterio sugerido para la evaluación de la ocurrencia.

Probabilidad de falla.	Posible tasa de falla.	Ranking.
Muy alta	La falla es casi inevitable, ≥ 1 en 2	5
Alta	Generalmente asociadas a procesos con falla frecuentes, 1 en 8 - 1 en 20	4
Moderada	Asociadas a procesos con fallas ocasionales, 1 en 80- 1 en 2.000	3
Baja	Fallas aisladas asociadas a procesos similares, 1 en 15.000	2
Muy baja	Falla poco probable, 1 en 150.000 o menos	1

Tabla 2-2 “Evaluación de ocurrencia “

(Fuente: Norma SAE J1739)

2.2.4. SEVERIDAD DE OCURRENCIA (So)

La severidad de la consecuencia (So) de un modo de fallo, según la noma SAE J1739, también se evalúa en una escala de 1 a 10. Aquí, 1 indica consecuencias muy leves, mientras que 10 indica consecuencias extremadamente graves, esta evaluación se basa en el impacto potencial del modo de fallo en términos de seguridad salud, medio ambiente, costos y cumplimientos de requisitos legales y reglamentarios.

Tabla: criterio de severidad de ocurrencia.

Efecto.	Severidad del efecto.	Ranking.
Peligroso sin advertencia	Pone en peligro la seguridad del operario sin advertencia de la falla.	5
Peligroso con advertencia	Pone en peligro la seguridad del operario con advertencia de la falla.	5
Muy alto	Perturbación grave a la producción; equipo inoperable, pérdida total del producto.	4
Alto	Perturbación menor; producción parcialmente afectada, equipo operable con calidad reducida.	3
Moderado	Perturbación menor; equipo operable con insatisfacción del cliente.	2
Muy menor	Perturbación mejor; defectos menores notados por una minoría de clientes.	2
Ninguno	Sin efectos.	1

Tabla 2-3 “Severidad de ocurrencia”

(Fuente: Norma SAE J1739)

El NPR (Número de prioridad de riesgo) permite dar prioridad durante el mantenimiento, a ciertos métodos de avería que representan mayores peligros que otros, ya sea por la seguridad de los trabajadores, la producción u otras variables afectadas por una avería a través de este método. Se considera para este estudio los métodos de avería con un NPR superior “#”, realizando las tareas de mantenimiento correspondiente para cada uno en la hoja de decisiones RCM (Mantenimiento centrado en confiabilidad)

Asignación de numero de prioridad de riesgo según norma SAE J1739

Nº de MD	Modo de falla	Análisis de Criticidad			
		Po	So	Pd	NPR
1.1.1	Desgaste excesivo en el mecanismo de barrido	1	2	2	4
2.1.1	Fuga hidráulica en el sistema de accionamiento de barrido	1	5	2	10
3.1.1	Desgaste excesivo de los dientes de la catalina	2	3	3	18
3.1.2	Rotura o fisura en el material de la catalina	2	3	2	12
4.1.1	Desgaste excesivo del componente del centralizador	3	2	2	12
4.1.2	Bloqueo o atascamiento de las partes móviles del centralizador	2	2	3	12
5.1.1	Desgaste excesivo en los componentes internos del culatín	2	4	3	24
6.1.1	Fallo en el cableado eléctrico	2	4	1	8
7.1.1	Daños en los contactos del enchufe	2	2	1	4
8.1.1	Roturas en los Flexibles	4	4	2	48
8.1.2	Obstrucción en las cañerías por acumulación de sedimentos o residuos	2	4	1	8
9.1.1	Fusible fundido por sobrecarga eléctrica	1	4	2	8
10.1.1	Aflojamiento o pérdida de pernos fijadores	1	2	3	6
11.1.1	Ruptura o desgaste de la piola de avance	3	4	2	24
12.1.1	Ruptura o desgaste de la piola de retroceso	1	4	2	8
13.1.1	Fallos eléctricos o de conexiones en los sensores	2	4	3	24

Tabla 2-4 “Asignación de NPR”

(Fuente: Norma SAE J1739)

2.2.5. **DIAGRAMA DE PARETO**

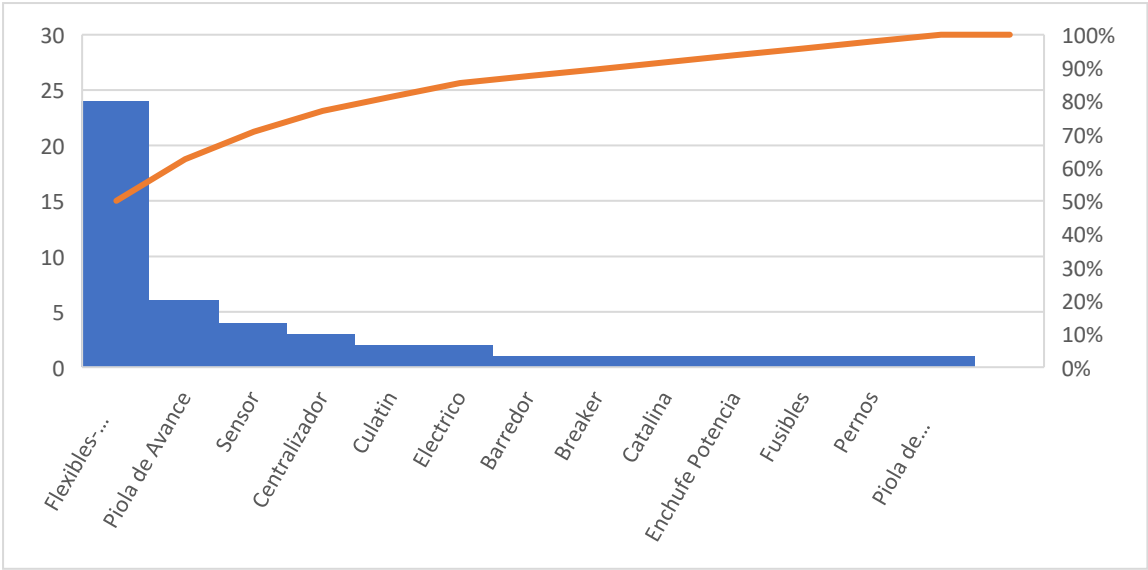
El diagrama de Pareto en el contexto del mantenimiento es una herramienta que se utiliza para identificar y priorizar los problemas o causas de los problemas relacionados con el mantenimiento en una instalación o equipo, se basa en el principio de Pareto, que sugiere que un pequeño número de causas (aproximadamente un 20%) suele ser el responsable de la mayoría de los problemas (aproximadamente 80%).

En un diagrama de Pareto de mantenimiento, las causas o problemas se representan en orden descendente de su frecuencia o impacto. Esto permite visualizar claramente cuáles son las principales áreas de enfoque para mejorar la eficiencia y efectividad del mantenimiento.

Aplicación del diagrama de Pareto.

Aplicar el diagrama de Pareto en la perforadora DD422i de Sandvik identificamos las fallas con mayor frecuencia y que afectan en su rendimiento y confiabilidad. Con esto generando problemas como el tiempo fuera de servicio, fallas mecánicas, problemas eléctricos.

En el siguiente gráfico de líneas se mostrará el porcentaje de cuáles son las fallas que están presente dentro de este análisis a la perforadora. Dentro del grafico en el eje “X” se representan las fallas que están presentes, mientras que en el eje “Y” representa el porcentaje que afecta las fallas al equipo.



Gráfica 2-1 “Diagrama de Pareto de fallas DD-422i”

(Fuente: Elaboración propia)

Acá se puede observar que la falla que más porcentaje se lleva es el de “Flexibles y cañerías”, luego lo sigue la “Piola de avance”, y como tercera falla más común es el “Sensor”.

A continuación, se presentará un diagrama de dispersión logarítmica con el fin identificar cual es el componente más crítico. Este análisis se complementará con el diagrama de Pareto ya que este permite identificar las fallas que tienen un mayor impacto en el equipo.

2.2.6. DIAGRAMA DE DECISIÓN RCM

El diagrama de decisión RCM, es una herramienta utilizada en el proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM). Donde su objetivo es ayudar a determinar las estrategias adecuadas para cada componente de un equipo. El diagrama de constituye a partir de los análisis de modo de falla y efectos de falla, cual consiste en una serie de preguntas y criterios lógicos que guían la selección de la estrategia de mantenimiento óptima para cada componente.

Dentro del conjunto de preguntas que entran en el diagrama de decisión son relacionadas con aspectos como la criticidad del equipo, la frecuencia y la forma de falla, las consecuencias de la falla en la seguridad, el medio ambiente, la producción, entre otros. Al responder esta pregunta se puede llegar a una conclusión sobre la estrategia de mantenimiento más adecuada para cada componente, que puede llegar a ser un mantenimiento preventivo basado en el tiempo o en el uso, hasta inspecciones no intrusivas o monitoreo de condiciones.

Muestra de hoja de decisión de RCM :

Modo de falla #	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión del RCM	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación	Responsable	Costos directos act. de mantto USD	Costos directos anuales USD/año

Ilustración 2-1 “Hoja decisión”

(Fuente: Elaboración propia a partir de Course of Reliability Centered Maintenance. Woodhouse, J.)

Diagrama de decisión RCM

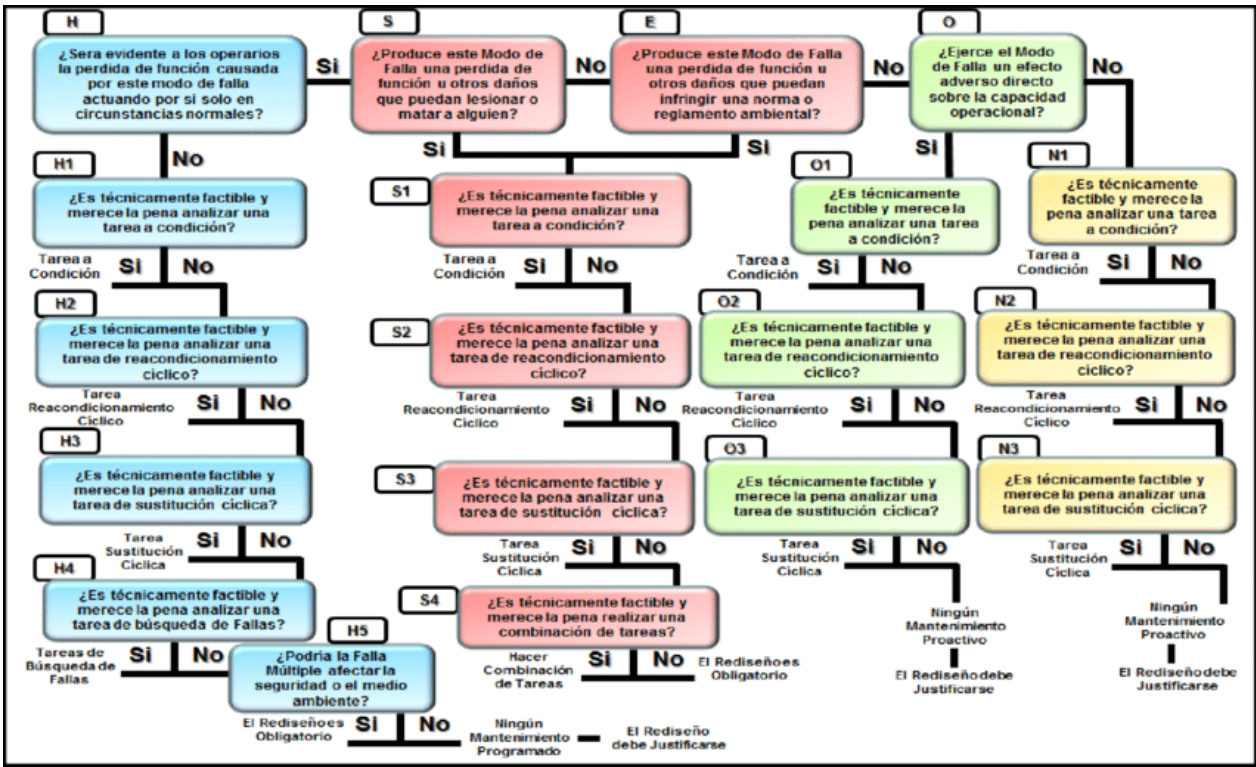


Ilustración 2-2 “Diagrama de decisión RCM”

(Fuentes: Norma SAE JA1011)

En las columnas H, S, E, O se representa la evaluación de consecuencias asociadas a cada modo de falla siendo que las fallas ocultas se representan por la “H”, la seguridad con la letra “S”, aspecto medio ambiental con la letra “E” y con la letra “O” corresponde a los aspectos operacionales y no operacionales.

En las siguientes tres columnas para cada categoría se utiliza para registrar si se realizara una tarea proactiva para abordar esa consecuencia especifica utilizando números del 1 al 3 para indicar la tarea proactiva que se realizara.

En las columnas H4, H5, S4, si están presentes esto indica que no se ha asignado una tarea proactiva, lo que se registra como “tareas a falta de”.

En la columna de “tareas de mantenimiento”, se especifica que tipo de tarea que se debe llevar a cabo para mitigar la falla funcional identificada para cada modo de falla. Con esto proporciona una guía clara para el personal de mantenimiento sobre las acciones necesarias para así mantener el equipo en condiciones óptimas y minimizar los riesgos asociados a las fallas potenciales. Y finalmente en la última columna que se refiere a “realizarse por” se registra el encargado de llevar a cabo la tarea de mantenimiento asignada.

Respecto a cada modo de fallo requiere una respuesta a la primera pregunta “H”, y dependiendo de si la respuesta es SI o NO, se debe seguir por la siguiente rama correspondiente de decisiones hasta llegar a un tipo de tarea. Las tareas abarcan áreas de mantenimiento proactivo, preventivo, correctivo. Es crucial tener en cuenta estos para una planificación efectiva del mantenimiento y llevar un registro adecuando de las respuestas de la hoja de decisión.

2.2.7. TAREAS PROACTIVAS

Las tareas proactivas son actividades de mantenimiento planificado y ejecutadas con el propósito de prevenir los fallos y mantener los activos en condiciones óptimas de funcionamiento. A diferencia de las tareas reactivas, que se implementan cuando ocurre el fallo, las tareas proactivas se realizan antes de que ocurra el problema, con el fin de evitar las interrupciones inesperadas y prolongar la vida útil del equipo y los componentes. Aunque en RCM se utilizan términos de reacondicionamiento y sustitución cíclicos, y a continuación serán definidas.

- Tareas de reacondicionamiento cíclico: Las tareas de reacondicionamiento cíclico son intervenciones periódicas que buscan restaurar un componente o sistema a su condición original mediante reparaciones, ajustes y sustituciones de partes desgastadas. Estas tareas se programan con base en el análisis de la fiabilidad y el desempeño del equipo, y son parte integral de una estrategia de mantenimiento preventivo.

- Tarea de sustitución cíclica: Las tareas de sustitución cíclica son intervenciones programadas que implican la sustitución de componentes específicos del equipo en intervalos de tiempo preestablecidos. Estas tareas se implementan basándose en el análisis de fiabilidad e historia

de fallos de los componentes, buscando minimizar el riesgo de fallos funcionales y asegurar una operación continua y segura.

2.2.8. TAREAS PREDICTIVAS

Las tareas predictivas implican la utilización de tecnología y técnicas de monitoreo para evaluar regularmente la condición de equipos y prever fallos. Estas actividades se basan en la observación de indicadores de desempeño, como vibraciones, temperaturas, niveles de lubricación, para identificar cambios que pueden identificar el deterioro del equipo. El objetivo es identificar problemas incipientes y tomar medidas preventivas antes de que se produzcan fallos. Estas tareas se deben hacer en intervalos menores al intervalo P-F, que es el periodo del momento que ocurre la falla potencial hasta que se convierte en una falla funcional

El intervalo P-F representa la ventana de oportunidad para tomar medidas proactivas de mantenimiento antes de que ocurra un fallo funcional. Durante este intervalo, se implementan tareas de monitoreo, inspección o mantenimiento predictivo para así detectar signos tempranos de deterioro y tomar acciones correctivas antes del que el sistema falle.

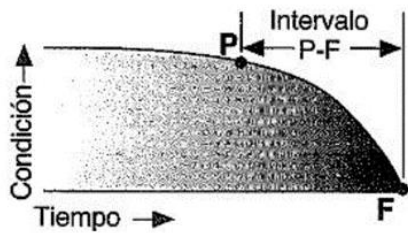


Ilustración 2-3 “Intervalo P-F en las tareas a condición”

(Fuente: SAE JA1012)

2.2.9. APLICACIÓN DEL DIAGRAMA DE DECISION RCM

Modo de Falla	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol logico de decisión del RCM	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de Aplicacion	Responsable	Costos directos act. De mannto USD	Costos Directos anuales USD/año
Desgaste excesivo en el mecanismo de barrido	Mantenimiento Preventivo basado en condición	Revisión y reemplazo del mecanismo de barrido	Mensual	Mecánico	120	1440
Desgaste excesivo de los dientes de la catalina	Inspección periódica	Inspección dimensional y reemplazo si aplica	Trimestral	Mecánico especialista	90	360
Rotura o fisura en la catalina	Revisión estructural y pruebas no destructivas	Sustitución de la catalina dañada	Semestral	Mecánico	180	360
Desgaste del centralizador	Control dimencional y analisis de desgaste	Reemplazo parcial o total del componente	Trimestral	Mecánico	110	440
Bloque en el centralizador	Mantenimiento Correctivo/ Lubricacion	Limpieza y lubricacion de parte móviles	Mensual	Mecánico	70	840
Desgaste en el componente del culatín	Evaluacion con pruebas de eficiencia	Reemplazo de componentes internos	Trimestral	Mecánico	150	600
Fallo en cableado eléctrico	Inspeccion de continuidad eléctrica	Reemplazo de cables o conexiones	Mensual	Eléctrico	60	720
Daño en contactos del enchufe	Inspeccion visual regular	Limpieza o sustitución de contactos	Bimensual	Eléctrico	40	240
Rotura en los flexibles	Inspeccion visual preventiva	Sustitucion de Flexibles	Mensual	Tecnico hidraulico	75	900
Obstruccion en cañerías	Verificacion con caudalímetro	Limpieza de lineas y filtros	Trimestral	Mecánico de planta	95	380
Fusible fundidos	Inspeccion de tableros	Reemplazo inmediato del fusible	Mensual	Eléctrico	20	240
Aflojamiento de pernos fijadores	Inspección visula y torqueado	Ajuste y torque de pernos	Mensual	Mecánico	45	540
Roptura de piola de avance	Revisión por fatiga	Reemplazo de piola	Trimestral	Mecánico	65	260
Roptura de piola de retroceso	Revisión por fatiga	Reemplazo de piola	Trimestal	Mecánico	65	260
Fallo en sensores	Diagnónstico electrónico	Sustitucion de sensor defectuoso	Mensual	Eléctrico	85	1020

Tabla 2-6 “Aplicación de Hoja de Decisión RCM”

(Fuente: Elaboración propia)

A partir de la Tabla anterior, se puede apreciar cómo se aplicó el árbol de decisiones correspondiente al RCM para establecer un programa de mantenimiento sistemático, centrado en la línea de producción donde se encuentra el sistema de accionamiento del breaker. Este documento marca un avance significativo hacia la implementación de una estrategia de mantenimiento más eficaz, que tiene como objetivo mejorar los indicadores de disponibilidad operativa, el tiempo medio de reparación (MTTR) y la frecuencia de fallas.

La adopción del RCM facilitó una adecuada clasificación de cada modo de falla, tomando en cuenta su impacto en la funcionalidad, la seguridad, los costos, y la capacidad de detección previa. De este modo, se asignaron actividades para el mantenimiento preventivo, predictivo o correctivo, en función de un análisis costo-beneficio y la importancia de cada componente.

Por ejemplo, problemas como “falla del breaker” o “desgaste interno del culatín” se manejaron mediante un mantenimiento predictivo, ya que permiten realizar intervenciones anticipadas a bajo costo (USD 80 y USD 250 por actividad, respectivamente), lo cual disminuye la probabilidad de paradas no previstas. Por otro lado, situaciones como la “rotura de piola de avance” o el “fusible fundido por sobrecarga” se gestionaron con un enfoque correctivo, dado que sus costos directos

son relativamente bajos y su ocurrencia es ocasional, lo que no justifica el uso de planes preventivos más costosos.

Es relevante señalar que no todos los modos de falla requieren la adopción de un mantenimiento preventivo o predictivo. Esta tabla muestra ejemplos en los que el costo anual del mantenimiento proactivo supera el de una intervención correctiva. Por lo tanto, el proceso de toma de decisiones debe considerar aspectos como el costo de materiales, logística, horas de trabajo y la criticidad del activo, para garantizar que la opción de mantenimiento seleccionada sea la más eficaz desde el punto de vista económico y operativo.

En conclusión, la hoja de decisión ha permitido formular un plan viable y sostenible, con una frecuencia de intervención adecuada para cada tipo de falla y un responsable técnico claramente designado. Esto no solo contribuye a la optimización de recursos al evitar mantenimientos innecesarios, sino que también representa una inversión estratégica a largo plazo, al minimizar paradas imprevistas y aumentar la confiabilidad del sistema.

2.2.10. PROPUESTA Y DEFINICIÓN DE PLANES DE MANTENIMIENTO

En base al análisis FMECA, la matriz de criticidad, el diagrama de Pareto y la aplicación del árbol de decisiones RCM, se establece en la presente propuesta de planes de mantenimiento para la perforadora Sandvik DD-422i. Este plan está orientado para maximizar la disponibilidad operativa, con tal de reducir la frecuencia de las fallas críticas del equipo y así poder optimizar de mejor manera los recursos técnicos y económicos. Donde la propuesta considera un enfoque mixto que integra mantenimiento predictivo, correctivo y proactivo, priorizando a la intervención de los componentes más críticos que influyen en la confiabilidad del equipo.

- **Mantenimiento Preventivo basado en tiempo y uso**

Este tipo de mantenimiento se aplicará a componentes cuya vida útil es predecible, y cuya falla afecte directamente en la operación del equipo y en la seguridad de sí misma. Donde en este mantenimiento se definieron intervalos de reemplazo o revisión basados en el MTBF, datos históricos de las fallas y la criticidad de cada uno de los sistemas, donde tiene como objetivo evitar las fallas más recurrentes por desgaste acumulativo.

- **Mantenimiento predictivo basado en condición**

Dentro de este mantenimiento se utiliza técnicas de monitoreo y diagnóstico con el fin de anticipar las fallas mediante el análisis del estado actual del componente del equipo. Con este enfoque será fundamental en los sistemas hidráulicos, eléctricos y de impacto, en donde una falla no anticipada en estos sistemas puede generar la paralización del equipo y para la

operación de sí misma, entonces con este mantenimiento tiene como objetivo detectar a tiempo el deterioro de los sistemas y poder evitar las fallas funcionales

- **Mantenimiento correctivo planificado**

Corresponde a intervenciones de mantenimiento que por su baja frecuencia o el impacto que se genera no se justifica para generar una estrategia proactiva. Se incluye para los modos de falla esporádicos o con bajo número de prioridad de riesgo, y se aborda de manera estructurada, con stock mínimo de repuestos y protocolos de respuesta inmediata, con el objetivo de minimizar costos sin comprometer la operación del equipo.

- **Mantenimiento Proactivo y rediseño.**

Este enfoque complementario es la que busca eliminar la causa raíz de las fallas más recurrentes, aplicando rediseño, cambio de materiales de fabricación, mejoras en las instalaciones de repuestos y en procedimientos operativos, con el objetivo de eliminar las fallas repetitivas de origen estructural u operacional basándose en el análisis de causa raíz (RCA).

- **Integración con sistema de gestión de activos**

Dentro del plan será integrado en el sistema de gestión de mantenimiento de la empresa con tareas programadas, responsables integrados y registros históricos de las fallas. Donde se recomienda incluir indicadores de rendimiento como MTBF, MTTR, cumplimiento de mantenimiento preventivo y tasa de disponibilidad, para asegurar la mejora continua del equipo.

2.2.11. VALIDACIÓN DE METODOLOGÍA DEL ENFOQUE RCM

La elaboración de esta propuesta de mantenimiento se desarrollo cumpliendo rigurosamente las etapas fundamentales de la metodología RCM, según lo establecido por Moubray (1997) y la norma SAE JA1011. Este enfoque estructurado considera:

1. Identificación de funciones claves del equipo en su contexto operativo.
2. Determinación de fallas funcionales asociadas a la pérdida de funciones.
3. Análisis de modo de falla que originan cada falla funcional, sus causas y efectos.
4. Evaluación de consecuencias de cada modo de falla.
5. Aplicación de árbol lógico de decisiones RCM con selección justificada de tareas de mantenimiento
6. Formulación de un plan realista, combinando mantenimiento predictivo, preventivo, correctivo y proactivo
7. Análisis técnico- económico, para asegurar viabilidad y optimización de recursos

CAPÍTULO 3: **ANÁLISIS DE ECONOMICO Y EVALUACIÓN**
TÉCNICA

3.2.1. ANÁLISIS ECONÓMICO

Una vez que se haya desarrollado el programa de mantenimiento para la perforadora Sandvik DD-422i, es esencial evidenciar su eficacia durante la fase de implementación práctica, considerando que representa una propuesta técnica fundamentada. Esta fase es crucial, ya que facilita la evaluación de si las acciones recomendadas en el programa logran los objetivos estratégicos del área de mantenimiento, tanto en términos de confiabilidad como de repercusión económica. Se llevará a cabo un análisis comparativo entre el plan de mantenimiento actualmente implementado, que no incluye la aplicación de la metodología RCM y el nuevo plan de mantenimiento propuesto, esta comparación facilitará la identificación de las ventajas operativas y económicas de aplicar la metodología RCM en un escenario práctico, utilizando el equipo crítico en el proceso de producción subterránea de la mina Uva.

- La evaluación se enfocará en dos métodos que permitirán cuantificar de manera objetiva el impacto del nuevo programa que se está evaluando:
- El ahorro económico potencial, que analice la diferencia de costos entre ambos escenarios, considerando los riesgos vinculados a fallos no gestionados.
- El riesgo económico anticipado, que ilustre las repercusiones financieras anuales ocasionadas por fallos tras la ejecución del plan de mantenimiento propuesto.

Estos indicadores no solamente permitirán justificar de manera técnica y económica la propuesta del programa basado en RCM, sino que también evidenciar su contribución directa a la disminución de pérdidas, al aumento de la disponibilidad operativa y al cumplimiento de las políticas internas de mantenimiento. En este marco, se utilizarán los indicadores de mantenimiento más relevantes para la gestión de activos dentro de la empresa, donde uno de los más cruciales es el tiempo promedio de reparación, el cual mide el tiempo total que un equipo está fuera de servicio debido a fallas o intervenciones correctivas. Donde la disminución del TPRR es considerada una prioridad estratégica por la administración, dado que cada hora de inactividad no planificada resulta en pérdidas de producción, sobre costos y algunas posibles sanciones debido a no cumplir con las metas productivas, al disminuir este indicador, se logra no solo una mayor disponibilidad del equipo para operar, sino que también una mejora directa en la eficiencia del proceso productivo.

Por otro lado, se lleva a cabo un análisis del indicador de Riesgo Económico, cuyo objetivo es evaluar el impacto financiero anual resultante de las fallas operativas; teniendo en cuenta factores como la frecuencia de dichas fallas, el tiempo necesario para la reparación y los costos asociados por la falla. Este indicador es especialmente relevante en operaciones de alta criticidad, ya que permite prever situaciones económicas desfavorables

y priorizar las inversiones en mantenimientos preventivos, al optimizar tanto el tiempo de reparación, como la frecuencia de las fallas, se anticipa una notable reducción del riesgo económico, lo que fortalece la confiabilidad y la sostenibilidad del sistema. Con el fin de cuantificar el ahorro potencial que se espera lograr mediante la implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad, se aplicara la siguiente ecuación:

Ahorro Potencial

$$= \text{Riesgo actual}_{\text{SIN RCM}} - \text{Costo total plan mantto RCM} \\ - \text{Riesgo esperado}_{\text{CON RCM}}$$

Cada una de las variables que se mencionaron en la formula se medirá anualmente y en dólares (USD/año), lo que facilitará una evaluación objetiva y comparable. Este enfoque proporcionará apoyo a la toma de decisiones informadas por parte alta de la dirección y ofrecerá una base técnica para recomendar la adopción del mantenimiento centrado en confiabilidad como estrategia de mejora continua en los activos críticos de la operación minera

Indicador antes de implantar RCM												Indicador de ahorro potencial esperado después de implantar el RCM								
#	Función	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	FF falla/año	Efecto de Falla	TPPR horas	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo \$/año	Costos del plan Anual	FF esperada fallas/año	TPPR horas	Imp. Prod. \$/hora	Costos directos por falla \$/falla	Imp. SHA \$/falla	Riesgo Futuro esperado \$/año	Ahorro potencial
1	Limpiar el frente de trabajo eliminado al menos el 95% de escombros y fragmentos de roca después de cada perforación, en un tiempo menor a 10 minutos	1	Incapacidad total para limpiar adecuadamente el frente de trabajo de escombros y fragmentos de roca	1.1	Desgaste excesivo en el mecanismo de barrido, medido por inspección visual y pruebas de efectividad de limpieza	4	Evidente / No evidente: Evidente Afecta SHA: No afecta Efecto operacional (síntomas):Acumulación de escombros, astorpece la perforación. Acción correctiva: Reemplazo del mecanismo desgastado; mantenimiento preventivo	12	2000	145	0	96580	580	3	8	2000	145	0	48435	47565
2	Fragmentar material sólido con una capacidad de 90% de fragmentación en menos de 5 minutos por ciclo	2	Incapacidad para romper y fragmentar material sólido en el área de trabajo	2.1	Fuga hidráulica en el sistema de accionamiento del breaker, observable mediante caída de presión hidráulica	4	Evidente / No evidente: Evidente(figurable,pérdida de presión. Afecta SHA:Si (riesgo de contaminación y presión alta) Efecto operacional (síntomas): Pérdida de fuerza de impacto, ineficiencia. Acción correctiva: Cambio de sellos flexibles; revisión del circuito Hidráulico.	3	2000	150	2500	34600	1080	2	3	2000	150	2500	17300	16220
3	Transmitir el movimiento rotatorio con un 95% de eficiencia desde el motor principal hacia los sistemas de perforación	3	Pérdida de transmisión de movimiento de rotación	3.1	Desgaste excesivo de los dientes de la catalina, medible mediante inspección y análisis dimensional	2	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas):Pérdida de trasmisión rotacional, detención parcial Acción correctiva: Reemplazo de catalina o mecanizado de dientes	4	2000	2000	0	20000	4000	1	2	2000	2000	0	6000	10000
				3.2	Rotura o fisura en el material de la catalina, observable con inspección visual o con pruebas no destructivas	2	Evidente / No evidente: Si(Ruido anormal o falla total) Afecta SHA:Si(rotura puede generar fragmentos) Efecto operacional (síntomas):Detención del equipo, posible daño a otros sistemas Acción correctiva: Reemplazo inmediato del componente	4	2000	5000	3000	32000	5000	2	2	2000	5000	3000	24000	3000
4	Mantener la barra de perforación alineada con una desviación máxima de un 1 mm respecto al centro del agujero de perforación	4	Desalineación de la barra de perforación	4.1	Desgaste excesivo del componente del centralizador, detectable mediante inspección dimensional	3	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas):Desalineación progresiva de la barra, perforación errónea Acción correctiva:Reemplazo del centralizador y alineación	20	2000	500	0	121500	1000	2	15	2000	500	0	61000	59500
				4.2	Bloqueo o atascamiento de las partes móviles del centralizador, medible por aumento de fuerza requerida en la operación	3	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Imposibilidad de mantener eje central, desgaste acelerado Acción correctiva: lubricación, limpieza o sustitución	20	2000	750	0	122250	9000	2	15	2000	750	0	61500	51750
5	Transmitir al menos el 90% de la energía de impacto necesaria para la perforación a través de la barra	5	Pérdida de eficiencia en la transmisión de energía de impacto		Desgaste excesivo en los componentes internos del colafín, identificados por pruebas de eficiencia de impacto	4	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Disminución de energía de perforación, baja productividad Acción correctiva: Reemplazo de piezas internas, control de ciclos de impacto	8	2000	500	0	66000	1000	3	6	2000	500	0	37500	27500
6	Proveer energía a todos los componentes eléctricos de la máquina con un tiempo de disponibilidad del 99%	6	Falta de suministro eléctrico a los sistemas críticos	6.1	Fallo en el cableado eléctrico, detectado por pruebas de continuidad eléctrica	4	Evidente / No evidente: Parcialmente Afecta SHA: Si (riesgo de incendio o descarga) Efecto operacional (síntomas):Interrupción de sistemas críticos, detención Acción correctiva: Diagnóstico eléctrico; reparación o reemplazo de cables	8	2000	200	1500	70800	1200	3	6	2000	200	1500	41100	28500
7	Proveer la conexión eléctrica para suministrar energía a los sistemas y componentes principales del equipo	7	Interrupción en el suministro de energía	7.1	Daño en los contactos del enchufe, observable mediante inspección visual	3	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: Si (riesgo de arco eléctrico o cortocircuito) Efecto operacional (síntomas): Interrupción del suministro de energía, equipo inoperable Acción correctiva: Reemplazo de enchufe, verificación de terminales.	9	2000	270	1500	59310	1080	3	6	2000	270	1500	41310	16920
8	Transportar fluidos a los sistemas necesarios con una presión mínima del 90% para la operación del equipo	8	Fugas de fluido hacia los sistemas	8.1	Rotura en los Flexibles, detectable mediante inspección visual	12	Evidente / No evidente: Si(fugas visibles, pérdida de presión) Afecta SHA: Si(fuga de aceite, riesgo ambiental, resbalones) Efecto operacional (síntomas): Pérdida de presión, fallos hidráulicos Acción correctiva: Sustitución de flexibles/cañerías	45	2000	1500	6000	1170000	9000	8	35	2000	1500	6000	620000	541000
				8.2	Obstrucción en las cañerías por acumulación de residuos, medible con caudalímetros	12	Evidente / No evidente: Si(fugas visibles, pérdida de presión) Afecta SHA: Si(fuga de aceite, riesgo ambiental, resbalones) Efecto operacional (síntomas): Pérdida de presión, fallos hidráulicos Acción correctiva: Limpieza del sistema	20	2000	500	2000	510000	3000	10	17	2000	500	2000	365000	142000
9	Proteger los circuitos eléctricos con una capacidad de cortar el suministro ante sobrecarga superiores al 120% del diseño	9	Interrupción repentina en el suministro eléctrico por un fusible quemado	9.1	Fusible fundido por sobrecarga eléctrica, observable por inspección directa	4	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Detención súbita de funciones eléctricas Acción correctiva:Identificar causa de sobrecarga y reemplazar fusible	10	2000	150	1000	84600	520	3	8	2000	150	1000	51450	32630
10	Garantizar estabilidad y resistencia mecánica con una fuerza de fijación de al menos el 95% del diseño original	10	Desajuste de componentes debido a la falta de pernos fijadores	10.1	Allojamiento o pérdida de pernos fijadores, detectable por inspección y torque	6	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Inestabilidad estructural o pérdida de partes Acción correctiva: Verificación de torque; uso de traba pernos o reemplazar	6	2000	80	0	72480	400	4	5	2000	80	0	40320	31760
11	Transmitir el movimiento y la fuerza necesaria para el avance de la barra de perforación con un rendimiento del 90% del diseño	11	Imposibilidad de avanzar la perforadora debido a la falla de la piola de avance	11.1	Ruptura o desgaste de la piola de avance, medible por inspección visual	12	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Falta de avance de perforación Acción correctiva: Reemplazo inmediato de piola; inspección rutinaria	23	2000	450	0	557400	900	10	20	2000	450	0	404500	152000
12	Controlar el movimiento de retroceso de la perforadora con un tiempo máximo de operación de 5 minutos	12	Incapacidad para retraer la perforadora debido a la falla de la piola de retroceso	12.1	Ruptura o desgaste de la piola de retroceso, medible por inspección visual	6	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Imposibilidad de reubicar la barra de perforación Acción correctiva: Sustitución del componente; revisión de tensado	12	2000	350	0	146100	700	5	10	2000	350	0	101750	43650
13	Monitorear parámetros operativos con una precisión mínima del 95%	13	Fallos en la recolección de datos o monitoreo de parámetros operativos	13.1	Fallo eléctrico o de conexión en los sensores, medible mediante diagnósticos electrónicos	5	Evidente / No evidente: Si Afecta SHA: No Efecto operacional (síntomas): Pérdida de control o monitoreo automático Acción correctiva: Diagnóstico con multímetro; reparación o recambio.	23	2000	600	0	233000	1200	4	19	2000	600	0	154400	77400

Tabla 3-1 “Comparación de indicadores antes y después del RCM”
(Elaboración propia)

Se presenta el indicador de ahorro potencial que se podría alcanzar mediante la adopción del plan de mantenimiento basado en RCM, desglosado por cada tipo de falla identificada. Es importante mencionar que los costos relacionados con el impacto directo de las fallas, las pérdidas de producción por hora, las penalizaciones financieras por el tiempo de reparación, así como los efectos en la salud y la seguridad en el trabajo, permanecen constantes en comparación con lo que se definió en el análisis FMECA

En relación con el indicador TTR (Tiempo Total de Reparación), se prevé una disminución del 20%, gracias a la implementación de planes preventivos específicos para las fallas identificadas. Estos planes ayudarán a mejorar la logística de atención, prever recursos y asegurar la disponibilidad de piezas críticas, lo que disminuirá considerablemente los tiempos de respuesta ante fallas inesperadas. En cuanto al número de fallas (FF), se proyecta una reducción cercana al 40% después de poner en marcha el RCM. Esta mejora se basa en la realización sistemática de tareas de inspección programadas, que están incluidas en los planes preventivos. Esto permitirá identificar condiciones anormales antes de que se conviertan en fallas funcionales, mejorando así la confiabilidad operativa del sistema.

Del total de los 13 modos de fallo identificados en el FMECA anterior, 4 modos de fallo representan un 45% del riesgo total: 5.1; 8.1; 11.1, 13,1. Estos modos de falla se consideran los más críticos dentro de los sistemas que afectan al equipo, antes de aplicar el RCM. Para los demás modos de falla no se le aplico un mantenimiento preventivo, donde se observa una reducción en el riesgo económico tras la implantación del RCM.

COSTO TOTAL DE PLAN DE MANTENIMIENTO PLANIFICADO USD/AÑO	\$39.660
TOTAL RIESGO ANTES RCM USD/AÑO	\$3.396.620
TOTAL RIESGO DESPUES DE RCM USD/AÑO	\$1.281.395
TOTAL AHORRO AL IMPLANTAR RCM USD/AÑO	\$2.075.565

Tabla 3-2 “Indicadores económicos anuales al implantar RCM”
(Elaboración propia)

Se puede analizar que el riesgo total antes de aplicar el RCM era muy elevado, alcanzando USD 3.396.620 anuales. Este riesgo está relacionado con un equipo esencial en las operaciones subterráneas, en particular la perforadora Sandvik DD422i, que se utiliza en la mina Uva. Debido a su importancia en el mantenimiento del ciclo de producción minera, la alta incidencia de fallas y los largos tiempos de reparación causaban pérdidas significativas por falta de disponibilidad y una baja en la eficiencia operativa.

Después de implementar el plan de mantenimiento basado en RCM, el riesgo total se redujo a USD 1.281.395 cada año, lo que equivale a una disminución cercana al 35%. Esta mejora se asocia directamente con una reducción estimada del 65% en la frecuencia de fallas y una disminución del 20% en el tiempo total de reparación, lograda mediante la realización de inspecciones sistemáticas, la disponibilidad de piezas críticas y una planificación preventiva efectiva.

Asimismo, el indicador de ahorro económico tras la implementación del RCM alcanza un total de USD 2.075.565 al año, una cantidad considerable si se considera que el costo anual del plan de mantenimiento programado es de USD 39.660. Estos resultados muestran la gran rentabilidad y eficiencia de la metodología RCM, no solo al reducir el riesgo económico, sino también al mejorar la fiabilidad del equipo y la continuidad de las operaciones en la mina.

3.2.2. IMPACTO EN LA DISPONIBILIDAD

Dentro de las normas de mantenimiento de la compañía, se requiere que los equipos que forman parte de los equipos de mina mantengan una disponibilidad operativa de al menos el 85%. Sin embargo, el departamento de mantenimiento ha encontrado obstáculos para lograr este objetivo, principalmente por un aumento en la cantidad de fallas y por los largos tiempos de reparación en los últimos periodos. Estas circunstancias han causado una notable reducción en la producción de túneles para la extracción de material lo que impacta de manera directa en el cumplimiento de los estándares de operación y disminuye la disponibilidad total de los equipos. Frente a esta situación, la aplicación de la metodología RCM tiene como meta cambiar este panorama, sugiriendo medidas preventivas organizadas que ayudarán a disminuir tanto la cantidad de fallas como los tiempos de respuesta. Así, se espera asegurar una disponibilidad que sea igual o superior al 90%, en concordancia con las normas internas de mantenimiento y mejorando la fluidez y eficacia del proceso productivo.

Para el cálculo de la disponibilidad del equipo crítico, se utilizará la siguiente fórmula:

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

Dónde:

TTO: Tiempo Total Operativo en horas

TTR: Tiempo de reparación en horas

Cada uno de estos valores se analizarán en un periodo anualizado.

El tiempo de reparación anual es un dato que se puede calcular a través del FMEA, gracias a los históricos de falla, la fórmula para obtener el cálculo es la siguiente:

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

Dónde:

FFi = Frecuencia de Fallas del modo de falla i ocurridas en el año

TTR por fallai = Tiempo de Reparación para el modo de falla i

i = cada modo de falla identificado en el FMEA

n = número total de modos de falla considerados

S

Por lo que el TPRR total en horas que tiene el equipo sin aplicar el RCM es de

#	FF	TPRR	TPRR TOTAL HORAS
1	4	12	1606
2	4	3	
3	2	4	
3.1	2	4	
4	3	20	
4.1	3	20	
5	4	8	
6	4	8	
7	3	9	
8	12	45	
8.1	12	20	
9	4	10	
10	6	6	
11	12	23	
12	6	12	
13	5	23	

Tabla 3-3 TTR Total Anual de todos los modos de falla sin RCM
(Elaboración propia)

Para el caso del equipo crítico, y con la base en el reposte anual entregado por la empresa junto con los datos obtenidos FMECA, se considero que el equipo debe estar disponible de forma continua durante todo el año, los 7 días de la semana, bajo el siguiente esquema:

Días operativos al año: 364 días

Horas de operación por día: 16 Horas

Tiempo de reparación Anual: 1606 Horas

El tiempo operativo corresponde al período en el que la máquina esta disponible y efectivamente funcionando. Este se calcula multiplicando el número de días trabajados por la cantidad de horas operativas diarias, lo que representa la capacidad teórica total del equipo por año:

$$TTO = 364 \text{ dias} * 16 \frac{\text{horas}}{\text{día}} = 5.824 \text{ horas}$$

Esto termina indicando que el equipo opera con un total de 5.824 horas/año, Prácticamente el equipo debe estar disponible todo el año para poder ejecutar trabajos subterráneos. Ahora con cada uno de los antecedentes anteriores, se puede realizar el cálculo para obtener el porcentaje de disponibilidad anual del equipo.

$$A = \left(\frac{5824 - 1606}{5824} \right) * 100 = 72,42\%$$

A partir de los indicadores operativos actuales, se puede señalar que, sin implementar una estrategia de mantenimiento centrado en confiabilidad, el equipo tiene una disponibilidad operativa del 81,66%. Este porcentaje resulta directamente el total de fallas reportadas en el periodo evaluado, junto con los tiempos reales de reparación de cada una. Este numero indica un rendimiento que esta por debajo de la disponibilidad acordada con la gerencia que es del 85%. La diferencia entre la disponibilidad real y la meta fijada la necesidad de establecer un plan de mantenimiento más efectivo y proactivo, que permita anticipar las fallas más frecuentes, mejorar el uso de recurso técnicos y humanos, y disminuir de manera considerable los tiempos de inactividad no planificada. Por ello, es totalmente razonable optar por una metodología RCM, enfocada en aumentar la confiabilidad de los activos críticos, asegurar la continuidad del proceso de perforación, y apoyar la sostenibilidad y rentabilidad de la operación minera en su totalidad.

Ahora continuaremos generando el mismo análisis, pero con el impacto del RCM en el indicador de disponibilidad con la intención de obtener el valor exacto para realizar la comparación de disponibilidad entre el plan de mantenimiento actual y el plan de mantenimiento con RCM.

#	FF	TPRR	TPRR TOTAL HORAS
1	3	8	970
2	2	3	
3	1	2	
3.1	2	2	
4	2	15	
4.1	2	15	
5	3	6	
6	3	6	
7	3	6	
8	8	35	
8.1	10	17	
9	3	8	
10	4	5	
11	10	20	
12	5	10	
13	4	19	

Tabla 3-4 “TTR Anual de los modos de falla al implantar RCM”
(Elaboración Propia)

En la figura, se observa una disminución en los tiempos de reparación total asociado a la perforadora, evidenciando una mejora luego de aplicar la metodología RCM. Esta reducción en los tiempos de intervención se traduce directamente en una mayor disponibilidad operativa del equipo a continuación, el cálculo de disponibilidad después de la implementación del RCM:

$$A = \left(\frac{5824 - 970}{5824} \right) * 100 = 83,3\%$$

Este nuevo nivel de disponibilidad indica un aumento considerable de cerca del 10,88% en comparación con la situación inicial sin la implementación de mantenimiento RCM, en la que la disponibilidad era del 72,42%. Este incremento no solo ayuda a alcanzar, sino que también permite acercarse de manera más confiable a la meta estipulada, ya que se requiere una disponibilidad mínima del 85% para el equipo DD-422i. la mejora obtenida demuestra de forma clara la efectividad del enfoque de mantenimiento centrado en confiabilidad, estableciéndolo como una herramienta clave para aumentar la confiabilidad operativa del equipo, disminuir la frecuencia de fallas críticas y reducir el tiempo perdido asociado a mantenimientos inesperados. Como resultado, el uso del RCM no solo optimiza el rendimiento técnico del equipo, sino que también ayuda a disminuir las pérdidas económicas causadas por la falta de disponibilidad, mejorando la eficiencia del proceso productivo y alineándose con los objetivos estratégicos de continuidad operativa y la sostenibilidad en el ámbito minero

ANTES DEL RCM							
#	FF falla/año	FF en un año	TPPR horas	TPPR anual	Riesgo \$/año	Riesgo Total Año	Disponibilidad
1	4	86	12	1606	\$124.000	\$4.345.350	72,42%
2	4		3		\$62.000		
3	2		4		\$24.000		
	2		4		\$46.000		
4	3		20		\$154.500		
	3		20		\$153.600		
5	4		8		\$90.000		
6	4		8		\$120.000		
7	3		9		\$79.500		
	12		45		\$1.464.000		
	12		20		\$630.000		
9	4		10		\$119.200		
10	6		6		\$97.200		
11	12		23		\$704.400		
12	6		12		\$187.200		
13	5		23		\$289.750		

Tabla 3-5 “Resumen comparativa antes y después del RCM”
(Elaboración propia)

DESPUES DEL RCM								
Costos del plan Anual	Costos totales anuales de mantenimiento	FF esperada fallas/año	FF total esperada en un año	TPPR horas	TPPR TOTAL horas	Riesgo Futuro esperado	Riesgo Total Esperado	Disponibilidad
\$4.000	114400	3	65	8	970	\$63.000	\$2.666.900	83%
\$18.000		2		3		\$31.000		
\$4.000		1		2		\$7.000		
\$5.000		2		2		\$36.000		
\$3.000		2		15		\$78.000		
\$14.400		2		15		\$77.400		
\$5.000		3		6		\$52.500		
\$18.000		3		6		\$75.000		
\$4.000		3		6		\$57.000		
\$21.000		8		35		\$776.000		
\$6.000		10		17		\$450.000		
\$2.000		3		8		\$74.400		
\$3.200		4		5		\$54.800		
\$2.400		10		20		\$512.000		
\$2.400		5		10		\$131.000		
\$2.000		4		19		\$191.800		

Tabla3-6 “Resumen comparativa antes y después del RCM”
(Elaboración propia)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La implementación de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para la perforadora Sandvik DD-422i representa un paso esencial hacia la mejora de la confiabilidad y disponibilidad del equipo, dos factores críticos para la operación eficiente de la mina Uva. Este equipo al ser fundamental en la creación de túneles y otras infraestructuras subterráneas, tiene un impacto directo en la productividad minera, durante el análisis del 2023, se evidenció que la disponibilidad estaba por debajo del 80% estaba por debajo de lo comprometido que es el 85% de confiabilidad, lo que generó interrupciones operativas, aumentando gastos de mantenimiento y comprometiendo tiempos de producción.

A través de las herramientas como el FMECA y Pareto, se identificaron las fallas más recurrentes, entre ellas las relacionadas con los flexibles y cañerías hidráulicas, que representan un impacto tanto en costos como en tiempo de inactividad. Este análisis permitió priorizar los modos de falla críticos y comprender sus causas raíz, lo que orientó al diseño de estrategias de mantenimiento específicas y efectivas. Entre las principales causas destacaron las fugas de líquido hidráulico y la operación del equipo con baja presión, ambas validadas como factores que limitan la capacidad operativa del equipo.

El plan propuesto busca resolver los problemas actuales, sino también establecer un enfoque preventivo y predictivo que permita anticipar fallas futuras optimizando así el ciclo de vida de los componentes. Esto a la vez implica reducir las paradas no planificadas y sus costos asociados, sino que también mejorar la seguridad del personal, minimizar los riesgos ambientales y garantizar los compromisos operativos establecidos por la empresa. Además de la capacitación del personal en la identificación de fallas, en el uso de tecnologías predictivas y en la fabricación de componentes claves que es un pilar fundamental del plan, ya que garantiza que las estrategias de mantenimiento puedan ser ejecutadas con eficiencia y precisión. Con la integración de sistemas de monitoreo continuo, como sensores de presión análisis de fluidos, complementa esta propuesta al proporcionar información en tiempo real que permite tomar decisiones rápidas y basadas en datos.

En resumen, el desarrollo de esta propuesta de plan RCM refuerza el compromiso de la empresa con la innovación tecnológica y la excelencia operativa, estableciendo un método de mantenimiento que no solo aborda los problemas actuales, sino que también crea una base sólida para la mejora continua. Esto asegura que la perforadora Sandvik pueda operar de manera confiable, maximizando la productividad y contribuyendo en la operación minera.

RECOMENDACIONES

Implementación inmediata del plan RCM:

Adoptar las estrategias de mantenimiento propuestas, priorizando el reemplazo y mantenimiento de flexibles, conexiones y juntas hidráulicas para mitigar las fallas recurrentes

Capacitación continua del personal

Invertir en programas de formación para operadores y técnicos, centrados en la identificación temprana de fallas, el manejo del sistema hidráulico y la fabricación de componentes claves, asegurando una intervención oportuna y eficaz

Instalación de sistema de monitoreo continuo

Incorporar sensores de presión y análisis de fluido para monitorear en tiempo real las condiciones operativas del equipo, así anticipar fallas críticas y optimizando el intervalo P-F

Planificación de mantenimiento preventivos y predictivos

Establecer un calendario riguroso basado en los intervalos de falla más probables, con énfasis en inspecciones regulares y el uso de tecnología predictiva para extender la vida útil de los componentes

Revisión y evaluación periódica del plan

Actualizar el análisis de modos de falla y estrategias de mantenimiento cada seis meses, considerando datos operativos y posibles cambios en las condiciones de trabajo

Gestión adecuada de repuestos

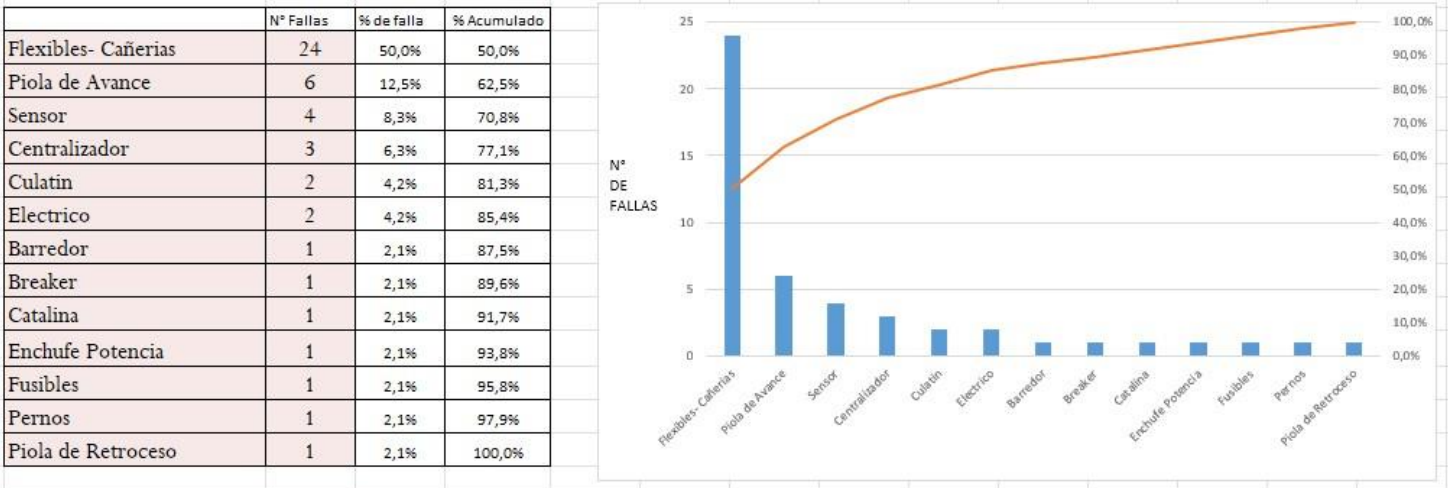
Mantener un inventario suficiente de componentes críticos, como flexibles y junta, para minimizar los tiempos de inactividad y garantizar la pronta ejecución de mantenimientos correctivos

BIBLIOGRAFÍA

1. Fracttal. (n.d.). ¿Qué es el árbol de fallas y para qué sirve? Recuperado de:
<https://www.fracttal.com/es/blog/que-es-el-arbol-de-fallas-y-para-que-sirve>
2. Fracttal. (n.d.). Análisis de fallos en mantenimiento. Recuperado de:
<https://www.fracttal.com/es/blog/analisis-de-fallos-en-mantenimiento>
3. MindOnMap. (n.d.). ¿Qué es el análisis FMECA y cómo realizarlo? Recuperado de:
<https://www.mindonmap.com/es/blog/fmeca-analysis/>
4. Ingeniería Industrial Online. (n.d.). Análisis del modo y efecto de fallas (AMEF). Recuperado de: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/lean-manufacturing/analisis-del-modo-y-efecto-de-fallas-amef/>
5. Sandvik. (n.d.). DD422i: Equipo de perforación subterránea. Recuperado de:
<https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/equipo/equipo-de-perforaci%C3%B3n-subterr%C3%A1neo/dd422i/>
6. Google Maps. (n.d.). Mina Amalia, Cemin. Recuperado de:
https://www.google.com/maps/place/Mina+Amalia+Cemin/@-32.7314956,-70.9647468,13.78z/data=!4m6!3m5!1s0x9688393ec2bf9f4d:0x17a7114c91842d9e!8m2!3d-32.7194625!4d-70.968922!16s%2Fg%2F11fhqrkcr4?entry=tту&g_ep=EgoyMDI0MTAyOS4wIKXMDS0ASAFQAw%3D%3D
7. Conscious Reliability. (n.d.). Norma SAE JA1011: Criterios de evaluación para procesos de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM). Recuperado de:
<https://consciousreliability.com/norma-sae-ja1011-criterios-de-evaluacion-para-procesos-de-mantenimiento-centrado-en-confiabilidad-rcm/>
8. SAE International. (2021). SAE J1739_202101: Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Including Design FMEA, and Process FMEA. Recuperado de:
https://www.sae.org/standards/content/j1739_202101/
9. Causas de las Fallas Comunes en los Sistemas Hidráulicos y cómo detectarlas recuperado de:
<https://isopetrol.net/causas-de-las-fallas-comunes-en-los-sistemas-hidraulicos-y-como-detectarlas/>
10. JXSC Machine. (2021). 9 tipos de causas y métodos de tratamiento de los fallos en sistemas hidráulicos. Recuperado de
<https://www.jxscmachine.com/es/nuevo/9-tipos-causas-metodos-de-tratamiento-averias-del-sistema-hidraulico/>
11. Parra, C., y Crespo, A. (2021). “Optimización de planes de mantenimiento: Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (MCF) Reliability Centered Maintenance (RCM). Editado por INGEMAN. Departamento de gestión industrial, Universidad de Sevilla, España. Escuela de ingeniería, Universidad de Sevilla, España.

ANEXOS

1. Anexo A (Diagrama de Pareto):



2. Anexo D (Tabla de costos de Mantenimiento)

Denom.clase de cost	Denominación del objeto del interlocutor	Mantenimiento US	Falla Op. Us	Gastos Us
Serv. Mant. Mec.	SERV 365 EXPERTISE ON-SITE DD422i 2023	4,74	0	4,74
Serv. Mant. Mec.	SERV 365 EXPERTISE ON-SITE DD422i 2023	949,77	0	949,77
Lubricantes	CHEQUEO INICIO TURNO MAS NIVELES: DD422	55,52	0	55,52
Mat.de mantencion	REPARAR FLEX ALIMEN BOM PRICIPAL: DD422i	63,54	0	63,54
Lubricantes	REPARAR FLEX ALIMEN BOM PRICIPAL: DD422i	249,85	0	249,85
Lubricantes	RELLENAR ACEITE HCO UNIVIS 68: DD 422i	111,04	0	111,04
Lubricantes	REVISION GENERAL Y NIVELES: DD422	55,52	0	55,52
Lubricantes	RELLENAR ACEITE HCO: DD422	55,52	0	55,52
Mat.de mantencion	CAMBIAR PERNOS MESA PERFO: DD422i	60,57	0	60,57
Lubricantes	TORQUEAR PERNOS CENTRALIZ FIJO B1: DD422i	83,85	0	83,85
Adherentes	CAMBIAR SENSOR ANGULO ROTACION B2: DD422i	26,4	0	26,40
Rep. Maq. y equipos	CAMBIAR SENSOR ANGULO ROTACION B2: DD422i	1729,14	0	1729,14
Mat.de mantencion	CAMBIAR FLEXIBLE LUBRACION B2: DD422i	38,82	0	38,82
Mat.de mantencion	CAMBIAR FLEXIBLE ROTACION 4TO TRA: DD422i	166,17	0	166,17
Lubricantes	REPARAR FUGA ACEITE ARTICU CENTRAL: DD422	111,8	0	111,80
Serv. Mant. Mec.	EVALUAR ESTADO SENSOR OSCILAC B2: DD422i	86,15	0	86,15
Serv. Mant. Mec.	SERV 365 EXPERTISE ON-SITE DD422i 2024	893,04	0	893,04
Mat.de mantencion	CAMBIAR FLEXIBLE AIRE 4TO TRAMO: DD422i	43,08	0	43,08
Mat.de mantencion	CAMBIAR FLEXIBLE CAMADA DE AGUA: DD422i	64,37	0	64,37
Mat.de mantencion	CAMBIAR FLEXIBLE 5TO TRAMO AGUA: DD422i	64,56	0	64,56
Lubricantes	REPONER PERNOS CENTRALI FIJO DELA: DD422i	52,7	0	52,70
Rep. Maq. y equipos	REPONER SENSOR DE AVANCE (IMAN) DD422i	1099,72	0	1099,72
Mat.de mantencion	CAMBIAR FLEX CILINDRO AVANCE B2 : DD422i	43,08	0	43,08
Lubricantes	CAMBIAR FLEX CILINDRO AVANCE B2 : DD422i	105,4	0	105,40
Serv. Mant. Mec.	SERV 365 EXPERTISE ON-SITE DD422i 2024	898,39	0	898,39
Serv. Mant. Mec.	SERV. REP. CILINDROS HIDRAULICOS DD422	438,99	0	438,99
Mat.de mantencion	CAMBIAR FLEXIBLE ALIMENTACION FAN: DD422i	68,76	0	68,76
Lubricantes	CAMBIAR FLEXIBLE ALIMENTACION FAN: DD422i	236,9	0	236,90
Art.electricos	CAMBIAR FLEXIBLE ALIMENTACION FAN: DD422i	1,96	0	1,96
Lubricantes	REPONER PERNOS CENTRALIZADOR MOV: DD422i	94,76	0	94,76
Mat.de mantencion	CAMBIAR FLEXIBLE AVANCE VIGA: DD422i	32,35	0	32,35
Lubricantes	CAMBIAR FLEXIBLE AVANCE VIGA: DD422i	94,76	0	94,76
Lubricantes	EVALUAR FUGA DE AGUA /NIVELAR HIDRAULICO	47,76	0	47,76
Lubricantes	C/CAMARA BARRIDO REPONER PERNOS MESA B2	191,06	0	191,06
Rep. Maq. y equipos	C/CAMARA BARRIDO REPONER PERNOS MESA B2	99,55	0	99,55
Mat.de mantencion	CAMBIAR MANGUERA LUBRICACION B2: DD422	67,59	0	67,59
Mat.de mantencion	CAMBIAR FAN A/C Y RODAM. CATALI B2 DD422	5,58	0	5,58
Rep. Maq. y equipos	CAMBIAR FAN A/C Y RODAM. CATALI B2 DD422	305,61	0	305,61
Mat.de mantencion	CAMBIAR FLEX. AVANCE B1: DD422i	42,2	0	42,20
Lubricantes	CAMBIAR FLEX. AVANCE B1: DD422i	259,98	0	259,98
Lubricantes	CAMBIAR CORREAS COMPRESOR: DD422	256,29	0	256,29
Rep. Maq. y equipos	CAMBIAR CORREAS COMPRESOR: DD422	305,61	0	305,61
Mat.de mantencion	CAMBIO FLEXIBLE SIST DE ENGRASE: DD422i	19,04	0	19,04
Mat.de mantencion	CAMBIO FLEXIBLE 4TO TRAMO : DD422i	34,63	0	34,63
Mat.de mantencion	REPARAR FLEXIBLE ENTRADA AGUA: DD422i	522,48	0	522,48
Mat.de mantencion	CAMBIAR FLEX 1ER TRAMO AVAN VIGA: DD422i	69,19	0	69,19
Art.electricos	CAMBIAR FLEX 1ER TRAMO AVAN VIGA: DD422i	4,37	0	4,37
Rep. Maq. y equipos	CAMBIAR FLEX 1ER TRAMO AVAN VIGA: DD422i	549,22	0	549,22
Mat.de mantencion	CAMBIAR CHICOTE AGUA BRAZO N 2: DD422i	142,77	0	142,77
Lubricantes	CAMBIAR CHICOTE AGUA BRAZO N 2: DD422i	83,59	0	83,59
Mat.de mantencion	CAMBIAR TUBO MANIFOLD FLEXIBLE: DD422i	1,09	0	1,09
Mat.de mantencion	CAMBIAR FLEXIBLE PERCUSSION B2: DD422i	100,65	0	100,65
Mat.de mantencion	CAMBIAR PERNOS MESA PERFORADORA: DD422i	15,19	0	15,19
Lubricantes	REPARAR SOPORTE BASTAGO CILINDRO: DD422i	47,76	0	47,76
Mat.de mantencion	REPARAR FLEXIBLE CAMARA AGUA: DD422i	44,59	0	44,59

4. Anexo F (Tabla de Criticidad de los equipos)

Item	Ubicación Técnica	COD_S AP	Descripción Equipo	CONSECUENCIAS					FRECUENCIA DE FALLAS					OCURRENCIA	RESULTADO		
				IS	IMA	IO	ICM	TOTAL IMPACTO	1 2 3 4 5								
									1	2	3	4	5				
1	C-EQU-MUE-001-0001	11097	CHANCADOR MUESTRERA MINA	1	1	1	1	4		1				1	4	B	BAJA
2	C-EQU-MUE-002-0001	11098	PULVERIZADOR MUESTRERA MINA	1	1	1	1	4						1	4	B	BAJA
3	C-EQU-MUE-003-0001	11099	CORTADOR MUESTRERA MINA	2	1	1	1	5		1				1	5	B	BAJA
4	C-EQU-MUE-004-0001	11192	HORNO A GAS MUESTRERA MINA	2	1	1	1	5						1	5	B	BAJA
5	C-EQU-MUE-005-0001	11193	EXTRACTOR DE POLVO MUESTRERA	1	1	1	1	4		1				1	4	B	BAJA
6	C-EQU-CFR-002-0002	20004	FR203 CARGADOR FRONTAL 966H	5	2	5	5	17		3				3	51	M	MEDIA
7	C-EQU-BUL-003-0001	20019	BD301 BULLDOZER D8T N°2	5	4	3	1	13		2				2	26	B	BAJA
8	C-EQU-EXC-006-0001	20028	EX500 EXCAVADORA 336DL	5	3	5	4	17		2				2	34	M	MEDIA
9	C-EQU-MOT-002-0001	20030	MN100 MOTONIVELADORA 140H N°1	5	2	3	3	13		4				4	52	M	MEDIA
10	C-EQU-PER-005-0002	20042	SONU6 SONDARJE U6 N°1	4	1	3	3	11		2				2	22	B	BAJA
11	C-EQU-PER-005-0002	20043	SONU62 SONDARJE U6 N°2	4	1	3	4	12		4				4	48	M	MEDIA
12	C-EQU-ROD-001-0001	20048	RC102 RODILLO CSS33E N°4	5	1	3	2	11		3				3	33	M	MEDIA
13	C-EQU-EME-002-0001	20050	GE06 GENERADOR FGWILSON MODELO P550E2	3	1	1	1	6		1				1	6	B	BAJA

Item	Ubicación Técnica	COD_S AP	Descripción Equipo	CONSECUENCIAS					FRECUENCIA DE FALLAS					OCURRENCIA	RESULTADO		
				IS	IMA	IO	ICM	TOTAL IMPACTO	1 2 3 4 5								
									1	2	3	4	5				
14	C-EQU-EME-002-0001	20052	GE100 GENERADOR CAT 3406C U6 N°2	3	1	1	1	6		1				1	6	B	BAJA
15	C-EQU-EME-002-0001	20060	GE117 GENERADOR LUREYE 60 KVA OFC. UVA	3	1	1	1	6						1	6	B	BAJA
16	C-EQU-EME-002-0001	20061	GE118 GENERADOR ATLAS COPCO 20 KVA CARD.	3	1	1	1	6		1				1	6	B	BAJA
17	C-EQU-EME-002-0001	20062	GE119 GENERADOR ATLAS COPCO 30K LUBRICA	3	1	1	1	6		1				1	6	B	BAJA
18	C-EQU-EME-003-0001	20079	HQ107 TELEHANDLER CAT TH407C	5	1	3	3	12		4				4	48	M	MEDIA
19	C-EQU-EME-004-0001	20085	CP109 COMPRESOR ATLAS COPCO XAS 375	3	1	1	1	6		1				1	6	B	BAJA
20	C-EQU-EME-004-0001	20086	CP110 COMPRESOR ATLAS COPCO 186 #2	3	1	1	1	6		1				1	6	B	BAJA
21	C-EQU-EME-004-0001	20087	CP111 COMPRESOR ATLAS COPCO 126	3	1	1	1	6		3				3	18	B	BAJA
22	C-EQU-EME-004-0001	20088	CP112 COMPRESOR SULLAIR 750 Q	3	1	3	1	8		2				2	16	B	BAJA
23	C-EQU-EME-004-0001	20089	CP103 COMPRESOR SULLAIR 750 H #1	3	1	3	2	9		3				3	27	B	BAJA
24	C-EQU-EME-004-0001	20093	CP116 COMPRESOR SULLAIR 750 H #2	3	1	3	2	9		3				3	27	B	BAJA
25	C-EQU-EME-005-0001	20100	CM100 LUBRICADOR DODGE 5500	5	1	1	1	8		1				1	8	B	BAJA
26	C-EQU-EME-006-0001	20102	LU101 LUMINARIA IR N°2 GENIEX TL 4000	3	1	4	1	9		3				3	27	B	BAJA

Item	Ubicación Técnica	COD_S AP	Descripción Equipo	CONSECUENCIAS					FRECUENCIA DE FALLAS					OCURRENCIA	RESULTADO		
				IS	IMA	IO	ICM	TOTAL IMPACTO	1 2 3 4 5								
									1	2	3	4	5				
27	C-EQU-EME-006-0001	20104	LU103 LUMINARIA IR N°4 TEREX RL 4001	3	1	4	1	9		2				2	18	B	BAJA
28	C-EQU-EME-008-0001	20122	CAMION PETROLERO NISSAN	5	1	2	1	9		1				1	9	B	BAJA
29	C-EQU-EME-008-0001	20126	CAMION PETROLERO MACK GRANITE 15000 L.	5	1	5	3	14		2				2	28	B	BAJA
30	C-EQU-EME-002-0001	20130	GE122 GENERADOR N°9 MOD CAT 3508 SUB.	4	1	3	1	9		1				1	9	B	BAJA
31	C-EQU-PER-007-0002	20135	PERFORADORA DESARROLLO DD422I	5	5	4	4	18		5				5	90	A	ALTA
32	C-EQU-PER-010-0001	20136	PERFORADORA SOPORTE DS411-C	5	4	4	4	17		5				5	85	A	ALTA
33	C-EQU-CTV-003-0001	20137	CM01M CAMIÓN SUBTERRANEA TH545I	5	3	5	4	17		3				3	51	M	MEDIA
34	C-EQU-CFR-007-0001	20138	PL01M CARGADOR PERFIL BAJO LH410 #1	5	4	5	5	19		4				4	76	A	ALTA
35	C-EQU-CFR-007-0001	20142	PL02M CARGADOR PERFIL BAJO LH410 #2	5	5	5	5	20		4				4	80	A	ALTA
36	C-EQU-EME-008-0001	20143	CAMIÓN HINO EXPLOSIVOS	5	1	4	2	12		1				1	12	B	BAJA
37	C-EQU-EME-008-0001	20144	TRACTO CAMIÓN NISSAN	5	1	3	2	11		1				1	11	B	BAJA
38	C-EQU-PER-008-0001	20146	PERFORADORA FONDO ARTICULADO DU411	5	2	4	5	16		5				5	80	A	ALTA
39	C-EQU-EME-002-0001	20148	GE125 GENERADOR N°8 MOD 3512	4	2	4	1	11		1				1	11	B	BAJA

Item	Ubicación Técnica	COD_S AP	Descripción Equipo	CONSECUENCIAS					FRECUENCIA DE FALLAS					RESULTADO		
				IS	IMA	IO	ICM	TOTAL IMPACTO	OCURRENCIA							
									1 Es poco probable que ocurran fallas en la vida útil	2 Es probable que ocurran varias fallas que ocurran en la vida útil	3 Es probable que ocurran varias fallas que ocurran en la vida útil	4 Es probable que ocurran varias fallas que ocurran en la vida útil	5 Es probable que ocurran varias fallas en una semana			
									VALOR	NIVEL	CRITICIDAD					
40	C-EQU-EME-008-0001	20151	CAMIÓN CHEVROLET EXPLOSIVO	5	1	4	2	12		1			1	12	B	BAJA
41	C-EQU-EME-003-0001	20152	HQ109 TELEHANDLER BOBCAT SUBTERRANEA	5	1	3	3	12		4			4	48	M	MEDIA
42	C-EQU-EME-004-0001	20153	CP117 COMPRESOR KAB11 DE AIRE SANDVIK	5	1	4	4	14		4			4	56	M	MEDIA
43	C-EQU-EME-004-0001	20154	CP118 COMPRESOR BOOSTER KR551 SANDVIK	5	1	4	2	12		3			3	36	M	MEDIA
44	C-EQU-EME-008-0001	20155	CAMIÓN FABRICA DE EXPLOSIVOS	5	1	5	2	13		4			4	52	M	MEDIA
45	C-EQU-PER-009-0001	20159	PERFORADORA POZO LARGO DL311	5	3	4	5	17		5			5	85	A	ALTA
46	C-EQU-CFR-007-0001	20160	PL03M CARGADOR PERFIL BAJO LH410 #3	5	3	4	4	16		4			4	64	A	MEDIA
47	C-EQU-EME-008-0001	20164	CAMIÓN HTH ACUÑADOR SCALAR GETMAN	5	2	4	4	15		4			4	60	A	MEDIA
48	C-EQU-ALI-001-0001	20167	ALJIBE #01 MODELO 3336K PATENTE: DBWR26	5	2	5	3	15		3			3	45	M	MEDIA
49	C-EQU-ALI-001-0001	20168	ALJIBE #02 MODELO 3336K PATENTE: DBWR23	5	2	5	3	15		4			4	60	A	MEDIA
50	C-EQU-MAR-001-0001	20173	MARTILLO S440 N°1 Nv 630	5	1	5	3	14		4			4	56	M	MEDIA
51	C-EQU-MAR-001-0001	20174	MARTILLO S440 N°2 Nv 680	5	2	5	4	16		4			4	64	A	MEDIA
52	C-EQU-EME-004-0001	20175	CP120 COMPRESOR SCHULTZ DODGE 5500	1	1	4	1	7		1			1	7	B	BAJA

Item	Ubicación Técnica	COD_S AP	Descripción Equipo	CONSECUENCIAS					FRECUENCIA DE FALLAS						RESULTADO		
				IS	IMA	IO	ICH	TOTAL IMPACTO						OCURRENCIA			
									1	2	3	4	5				
53	C-EQU-FED-001-0001	20176	FEEDER SH1655M Nv 540	5	1	5	1	12	3					3	36	M	MEDIA
54	C-EQU-FED-001-0001	20177	FEEDER SH1655M Nv 580	5	1	5	3	14	3					3	42	M	MEDIA
55	C-EQU-EME-010-0001	20178	CARGADOR JET-ANOL	4	1	3	1	9	1					1	9	B	BAJA
56	C-EQU-EME-001-0001	20179	CHOCRETERA	3	1	2	1	7	1					1	7	B	BAJA
57	C-EQU-EME-011-0001	20186	LECHADORA	3	1	2	1	7	1					1	7	B	BAJA
58	C-EQU-EME-004-0001	20189	CP121 COMPRESOR SCHULTZ MUESTRERA	1	1	1	1	4	1					1	4	B	BAJA
59	C-EQU-EME-004-0001	20190	CP122 COMPRESOR SCHULTZ LUBRICANTERA	1	1	1	1	4	1					1	4	B	BAJA
60	C-EQU-EME-012-0001	20191	BOMBA MANUAL 1	1	1	3	1	6	1					1	6	B	BAJA
61	C-EQU-EME-012-0001	20192	BOMBA MANUAL 2	1	1	3	1	6	1					1	6	B	BAJA
62	C-EQU-EME-004-0001	20193	CP123 COMPRESOR ATLAS COPCO GA45FF	5	1	4	3	13	1					1	13	B	BAJA
63	C-EQU-EME-008-0001	20198	CAMIÓN PLUMA GBXY 68	5	1	3	4	13	1					1	13	B	BAJA
64	C-EQU-EME-006-0001	20199	LU242 LUMINARIA IR N°242 ATLAS COPCO	3	1	4	1	9	1					1	9	B	BAJA
65	C-EQU-EME-006-0001	20200	LU233 LUMINARIA IR N°233 ATLAS COPCO	3	1	4	1	9	1					1	9	B	BAJA